

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 629.4.054.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>

EDN: <https://elibrary.ru/efprsy>



Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК

А. С. Ададунов^{1, 3}✉, И. Ю. Савельев¹, М. А. Чепулис², К. Г. Аринушкина^{1, 4}

¹ ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Научный информационно-аналитический центр ВНИИЖТ (НИАЦ ВНИИЖТ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос разработки нового, более современного математического аппарата в системе автоматизированного контроля геометрических параметров колесных пар подвижного состава измерительного комплекса КОНЛОК. В комплексе используются бесконтактные лазерные 2D-профилометры для измерения параметров колес локомотивов при постановке в депо и вагонов в процессе их эксплуатации на железнодорожной инфраструктуре.

Материалы и методы. Применены методы математического моделирования с алгоритмами описания и оценки профиля колеса с учетом дополнительных требований на гладкость и непрерывность используемых функций. Выполнен анализ данных, полученных при фиксации фактического состояния профилей поверхности катания колесных пар грузовых вагонов, результаты сравнены с эталонным состоянием профиля поверхности катания колеса по ГОСТ 10791–2011.

Результаты. Разработан новый перспективный алгоритм описания и оценки профиля катания колеса. Точность измерения повышена за счет минимизации человеческого фактора, цифровизации технологических процессов и автоматизации контроля технического состояния подвижного состава в пути следования. Определены параметры профиля поверхности катания колеса грузового вагона с наработкой 450 тыс. км.

Обсуждение и заключение. Представленный алгоритм обработки данных позволяет бесконтактно и автоматизированно измерять геометрические параметры колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава, а также пассажирских и грузовых вагонов в движении на основе полученных с лазерного профилометра данных, а также автоматизировать процесс составления отчета о результатах измерения, включая информацию об обследуемом объекте, и рекомендациях по принятию решения об отправке колеса в ремонт. Применение новых алгоритмов и современных технических средств позволяет получать точные и надежные данные о геометрических параметрах колесной пары, производить перспективный анализ износа колесной пары в эксплуатации без обязательного обмера ручными средствами измерения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, колесная пара, лазерный профилометр, геометрические параметры колесных пар, дефекты поверхности катания колеса, неисправности колесных пар, КОНЛОК

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ададунов А. С., Савельев И. Ю., Чепулис М. А., Аринушкина К. Г. Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 247–256. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>.

✉ a.adadurov@vniizht-e.ru (А. С. Ададунов)

© Ададунов А. С., Савельев И. Ю., Чепулис М. А.,
Аринушкина К. Г., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.054.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>

EDN: <https://elibrary.ru/efprsy>



Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the CONLOC system

Aleksandr S. Adadurov^{1, 3}✉, Igor Yu. Savelev¹,
Michael A. Chepulis², Kseniya G. Arinushkina^{1, 4}

¹VNIIZhT-ENGINEERING,

St. Petersburg, Russian Federation

²VNIIZhT Scientific Information and Analytics Centre,

St. Petersburg, Russian Federation

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

St. Petersburg, Russian Federation

⁴Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications,

St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors examine the development of new, updated mathematics in the automated control of the geometry of rolling stock wheel pairs for the CONLOC measuring system. The system uses non-contact 2D laser profile gauges to measure the parameters of locomotive wheels when they are placed in a depot and cars during their operation on the railway.

Materials and methods. The researchers apply mathematical models with algorithms for describing and assessing the wheel profile given additional requirements to the smoothness and continuity of the functions in use. The paper analyses actual data on the state of the tread profiles of wheel pairs of wagons, and compared the results with the reference state of the tread surface profile under GOST 10791–2011.

Results. The authors develop a new promising algorithm for describing and assessing the wheel rolling profile and improved the measurement accuracy by reducing the human factor, digitalising processes and automating the monitoring of the health of rolling stock along the route. The research determine the parameters of the tread surface profile of a wagon wheel with an operating time of 450 thousand kilometers.

Discussion and conclusion. This data processing algorithm provides for non-contact and automated measurement of the geometry of wheel pairs of locomotives and multi-unit rolling stock, as well as passenger carriages and wagons in motion based on laser profile gauge data, as well as automated measurement reporting process, including information on the object under examination, and repair recommendations. The new algorithms and modern hardware provide accurate and reliable data on wheel pair geometry, predict the operating wear of the wheel pair without the need for manual measurements.

KEYWORDS: railway transport, wheel pair, laser profile gauge, wheel pair geometry, tread surface defects, wheel pair malfunctions, CONLOC

FOR CITATION: Adadurov A. S., Savelev I. Yu., Chepulis M. A., Arinushkina K. G. Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the CONLOC system. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):247-256. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>.

✉ a.adadurov@vniizht-e.ru (A. S. Adadurov)

© Adadurov A. S., Savelev I. Yu., Chepulis M. A.,
Arinushkina K. G., 2023

Введение. Внедрение различного рода средств диагностики инфраструктуры и подвижного состава направлено на повышение эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта. В содержание этого направления входит в том числе разработка комплекса мероприятий по сокращению непроизводительных потерь при обслуживании и ремонте инфраструктуры железнодорожного транспорта и подвижного состава. Важными составляющими являются обеспечение безопасности движения поездов и рациональное расходование ресурса верхнего строения рельсового пути за счет контроля состояния колесных пар [1, 2].

На сегодняшний день на сети используются как ручные средства измерения геометрических параметров профиля колес, так и автоматизированные системы [3–5]. В частности, на железных дорогах применяются различные системы, которые бесконтактным способом осуществляют измерения геометрических параметров бандажей колесных пар подвижного состава на ходу поезда в автоматическом режиме, регистрируют и обрабатывают результаты измерений, идентифицируют подвижной состав и колесную пару (колесо), оперативно передают полученную информацию на автоматизированные рабочие места в пункт технического обслуживания подвижного состава [5–10].

Для проведения дистанционного измерения геометрических параметров колесной пары, например, используется система контроля колесных пар на ходу 3DWheel. Система предназначена для бесконтактного автоматического измерения геометрических параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава (локомотивов, грузовых вагонов, вагонов метрополитена, трамваев) в реальном времени и использует комбинацию лазерных 2D-сканеров, установленных по обе стороны рельса. Система внесена в Реестр средств измерений, испытательного оборудования и методик измерений, применяемых в ОАО «РЖД». Недостатками данной системы являются ее дороговизна по сравнению с ручными средствами измерения и допускового контроля (шаблонами) и сложность выполнения калибровки в процессе длительной эксплуатации [11].

Также имеется возможность применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона, однако для описания профиля поверхности колеса используется ступенчатая функция, что не удовлетворяет новым

требованиям по обеспечению гладкости применяемых функций [12].

Каждое средство диагностики с различными системами сканирования может модернизироваться в соответствии с повышением требований к таким средствам диагностики или изменением (предъявлении вновь) требований государственных стандартов на сами изделия — объекты измерений и контроля. В данной работе более подробно рассмотрен комплекс КОНЛОК, предназначенный для проведения автоматических бесконтактных измерений геометрических параметров подвагонного пространства, в том числе колесных пар подвижного состава.

Комплексы цифровые диагностические для измерений геометрических параметров колесных пар подвижного состава «Комплекс-2 КОНЛОК» предназначены для проведения измерений геометрических параметров (например, толщина гребня, толщина обода) колес цельнокатанных, изготовленных по ГОСТ 10791–2011¹, колесных пар железнодорожных вагонов, изготовленных по ГОСТ 4835–2013², на ходу поезда в автоматическом режиме, регистрации показаний бесконтактным способом и оперативной передачи по результатам мониторинга полученной информации на ближайший пункт технического обслуживания грузовых вагонов или пункт технического обслуживания локомотивов. Комплекс КОНЛОК производит измерения геометрических параметров колесных пар при скорости прохождения подвижного состава через комплекс до 120 км/ч и обеспечивает выполнение следующих функций:

- автоматического тестирования функциональных блоков, узлов и установки в целом;
- автоматического включения измерительного режима при приближении объекта измерения к контрольной точке измерения в рабочей зоне датчиков;
- передачи и отображения в интерфейсе автоматизированного рабочего места обслуживающего персонала геометрических параметров подвагонного пространства и сопутствующей информации.

Комплекс прошел испытания в целях утверждения типа средств измерений, и в соответствии с приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Росстандарт) от 03.09.2021 г. № 1940 «Об утверждении типов средств измерений» на Комплекс утверждены тип и описание типа средства измерений. Комплексу присвоен регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений — 82914–21.

¹ ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия: дата введения 2012-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 40 с.

² ГОСТ 4835–2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 30 с.

Цель работы — разработка нового перспективного алгоритма описания и оценки текущего состояния профиля колеса по данным с комплекса КОНЛОК с учетом таких дополнительных требований, как гладкость и непрерывность получаемого профиля, в том числе и по данным с частичными пропусками точек в профиле. Это позволит более точно определять

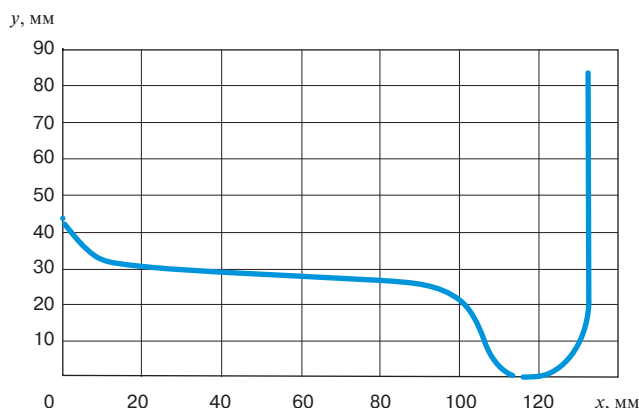


Рис. 1. Облако точек границы профиля колеса

Fig. 1. Wheel profile boundary point cloud

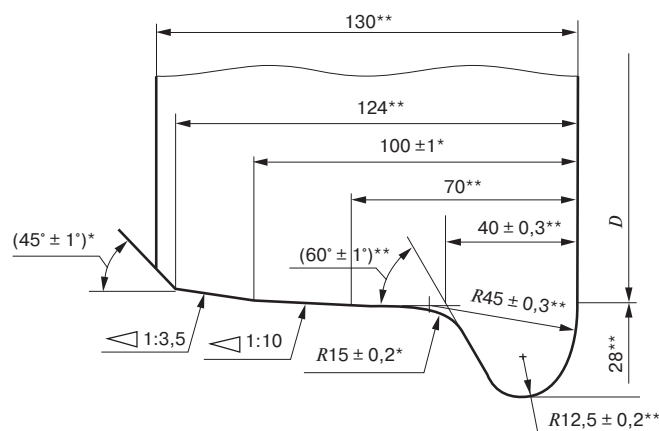


Рис. 2. Профиль колеса для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов, специального железнодорожного подвижного состава

Источник: ГОСТ 10791–2011 (приложение Б)³

* Размеры для справок.

** Размеры обеспечиваются инструментом.

Fig. 2. Wheel profile for wheel pairs of locomotive-hauled freight car truck and passenger carriages, non-motor cars of electric and diesel trains, special railway rolling stock

Source: GOST 10791–2011 (Appendix B)³

* Dimensions for reference only.

** Dimensions are ensured with a tool.

геометрические параметры, а следовательно, уменьшит количество ошибочных решений о постановке подвижного состава в неплановый ремонт.

Постановка задачи. Как уже сказано выше, комплекс КОНЛОК является системой бесконтактного измерения в автоматическом режиме геометрических параметров бандажей колесных пар подвижного состава в движении. Данный комплекс применяется для измерения колесных пар как локомотивов и моторов-вагонного подвижного состава, так и пассажирских и грузовых вагонов.

Среди определяемых комплексом показателей есть те, которые напрямую связаны с бандажом колеса:

- толщина гребня колеса;
- ширина обода колеса или бандажа;
- кольцевые выработки на поверхности катания у основания гребня колеса;
- разность толщин гребней колес в одной колесной паре.

В статье рассмотрен и описан алгоритм для определения параметров профиля поверхности катания колеса грузового вагона, который применим и для тягового подвижного состава. Авторы статьи использовали в качестве исходных данных облако точек, полученное на основе изображений с ПЗС-матрицы оптических датчиков приемника лазерного сигнала, отраженного от поверхности катания цельнокатаного колеса грузового вагона колеи 1520 мм, изготовленного по ГОСТ 10791–2011. Нарботка конкретной колесной пары составила ~450 000 км.

Облако точек (рис. 1) представляет собой множество пар $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, задающих границу профиля, точнее, траекторию луча лазера, отраженного от границы профиля. Так как измерение положения границы профиля происходит с погрешностью, а в некоторых местах возможны пропуски детектирования (например, луч оказался чем-то перекрыт), то естественным продолжением задачи поиска границы профиля становится задача регрессии. Решение данной задачи осуществляется средствами классического регрессионного анализа [13].

Эталонный профиль колеса соответствует конструкции и размерам колес для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов, специального железнодорожного подвижного состава и представлен в ГОСТ 10791–2011 и ГОСТ 11018–2011⁴. Данный профиль должен соответствовать профилю на рис. 2. Допустимые условия эксплуатации, определяемые в нормативных документах, являются уникальными для каждого типа колес.

³ ГОСТ 10791–2011. С. 25.

⁴ ГОСТ 11018–2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия: дата введения 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2012. 30 с.

На рис. 3 представлено описание профиля колеса с помощью функций. Однако в процессе эксплуатации геометрия колеса изменяется, из-за чего классами исходных функций становится невозможно описать новую (текущую) форму профиля с достаточной точностью. Поэтому было решено разработать описание профиля при помощи регрессионных моделей и класса кусочно-полиномиальных функций. Примерная структурная схема оценки параметров профиля колеса представлена на рис. 4.

Для описания профиля колеса использован класс линейных моделей, а точнее, полиномиальные модели. В целях уменьшения эффекта переобучения математической модели — эффекта снижения точности результатов из-за избыточной сложности модели — область определения разбивалась на отрезки (сегменты), на каждом из которых используется полином низкой степени, не выше пятой. Выбор границ сегментов при реализации нового алгоритма работы будет рассмотрен ниже.

Решение задачи регрессии нашлось в классе кусочно-полиномиальных функций. В дальнейшем границы области определения каждой части кусочной функции будем называть точками разладки или точками сшивки. Таким образом, решение имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} f(x; \beta_0), x < x_1; \\ f(x - x_1; \beta_1), x_1 \leq x < x_2; \\ \dots \\ \dots \\ f(x - x_{k-1}; \beta_{k-1}), x > x_{k-1}, \end{cases} \quad (1)$$

где k — количество сегментов; $\beta = (\beta^{(0)}, \dots, \beta^{(p)})$ — коэффициенты полинома, где p — степень полинома; $f(x; \beta) = \beta^{(0)} + \beta^{(1)}x + \dots + \beta^{(p)}x^{(p)} = \sum_{j=0}^p \beta^{(j)}x^{(j)}$ — полиномиальная функция.

В точках сшивки на значения функции накладываются дополнительные условия:

1) $f(x_i; \beta_i) = f(x_i; \beta_{i+1})$ — непрерывность самой функции;

2) $f'(x_i; \beta_i) = f'(x_i; \beta_{i+1})$ — непрерывность первой производной, что равносильно отсутствию изломов функции в точках разладки.

При использовании класса полиномиальных функций, ограничения приобретают следующий вид:

1) $\beta_{i+1}^{(0)} = f_i(x_i), i > 1$ — непрерывность функции;

2) $\beta_{i+1}^{(1)} = f'_i(x_i), i > 1$ — непрерывность производной,

где $f'_i(x) = f'(x - x_i; \beta_i)$.

Тем самым на каждом сегменте (кроме первого) фиксируются значения двух коэффициентов, а итоговое количество параметров в модели становится равно

$$(p+1)k - 2(k-1) = pk - k + 2. \quad (2)$$

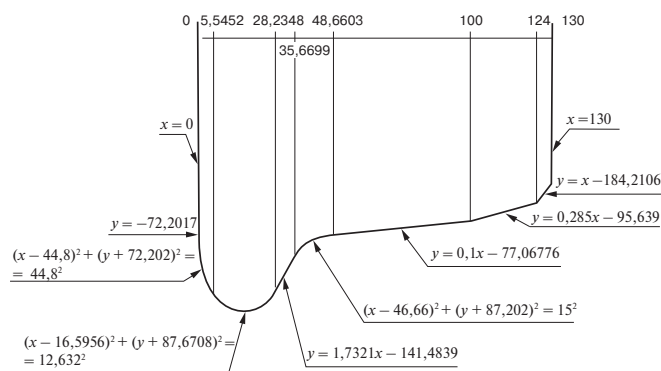


Рис. 3. Профиль обода колеса, описанный функциями

Fig. 3. Wheel tread profile as described by functions



Рис. 4. Структурная схема оценки параметров профиля колеса

Fig. 4. Block diagram for estimating wheel profile parameters

Безусловно, задача выбора положений точек разладки — отдельный вопрос, так как в рамках одного сегмента модель является неизменной. Решать его можно различными путями, в частности статистически оценивать вероятность наличия точки разладки

в том или ином месте, например, методом Чоу, применяемым в эконометрике. Эта процедура представляет собой проверку стабильности параметров регрессионной модели, наличия структурных сдвигов в выборке. Фактически тест проверяет неоднородность выборки в контексте регрессионной модели [14, 15]. Однако при проведении натурных экспериментов оказалось достаточно применения простого равномерного распределения точек по исходному множеству, т. е. деления исходного множества пар на подмножества сравнимой мощности.

Обработка сигнала. В кадре профиль колеса ограничен с краев вертикальными прямыми. Вертикали плохо описываются полиномиальными моделями, так как, по сути, они требуют бесконечно больших по модулю коэффициентов. Поэтому для решения задачи регрессии предварительно была выделена область построения регрессионной модели (профиль колеса между вертикальными границами), т. е. боковые вертикали были отделены от профиля поверхности катания, а также были определены количество и положение границ сегментов.

Все облако точек можно разбить на 3 подмножества (рис. 5):

- 1) левая вертикаль;
- 2) нижняя часть профиля колеса;
- 3) правая вертикаль.

Нижняя часть профиля ограничена вертикалями, однако из-за погрешностей измерения для их определения не получалось выбрать максимальные и минимальные координаты по оси абсцисс. Вместо этого было принято решение по поиску «нижней правой» и «нижней левой» точек профиля колеса. Для этого достаточно было выбрать точку вне колеса, далее определить ближайшую к ней точку самого профиля,

а в качестве меры расстояния была использована стандартная евклидова мера на плоскости

$$\forall x, y \in R^2, d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}. \quad (3)$$

Основная задача заключалась именно в выборе внешней точки, к которой определяется ближайшая точка профиля. Для определения «нижней левой» точки необходимо отступить от профиля вниз и влево, аналогично и для «нижней правой» — вниз и вправо. Варьируя величину отступа по разным осям, можно влиять на результат. Эмпирически были подобраны следующие величины:

- $x_{\min}$ — наименьшее значение по оси абсцисс;
- $x_{\max}$ — наибольшее значение по оси абсцисс;
- $y_{\min}$ — наименьшее значение по оси ординат;
- $y_{\max}$ — наибольшее значение по оси ординат;
- $width = x_{\max} - x_{\min}$ — ширина облака точек;
- $height = y_{\max} - y_{\min}$ — высота облака точек.

Соответственно, были определены координаты крайних точек профиля колеса с правой и левой сторон, по которым строятся вертикали:

- 1) левой нижней: $(x_{\min} - width, y_{\min})$;
- 2) левой верхней: $(x_{\min} - width, y_{\min} + 1,2height)$;
- 3) правой нижней: $(x_{\max} + 30width, y_{\min})$;
- 4) правой верхней: $(x_{\max} + 30width, y_{\min} + 1,2height)$.

Далее, имея границы вертикали, авторы разбили по ним облако точек на три подмножества:

- 1) от левой верхней до левой нижней — левая вертикаль;
- 2) от левой нижней до правой нижней — профиль колеса;
- 3) от правой нижней до правой верхней — правая вертикаль.

Так как ранее уже были определены множества точек, относящиеся к вертикалям, оставалось выбрать медианы этих множеств в качестве оценки положения вертикалей. Была использована именно медиана, а не выборочное среднее, например, так как она более устойчива к выбросам в данных и ошибкам измерений.

Аналитическое представление профиля колеса. Ранее был определен рассматриваемый класс функций — кусочно-полиномиальные с непрерывной нулевой и первой производными с суммарным числом параметров, равным

$$pk - k + 2.$$

Модель строилась только на множестве точек, которое составляет область основного интереса, т. е. для нижней части профиля колеса.

Для определения значений параметров модели использовался градиентный спуск и его реализация в библиотеке `numru` для языка программирования Python. Результат кусочно-полиномиальной регрессии

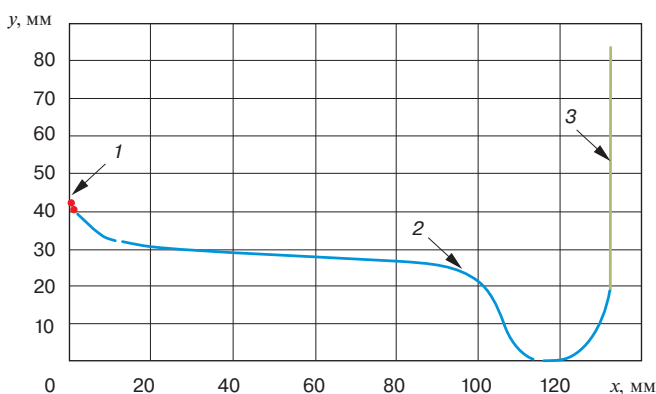


Рис. 5. Профиль колеса с выделенными подмножествами:
1 — левая вертикаль; 2 — нижняя часть профиля колеса;
3 — правая вертикаль

Fig. 5. Wheel profile with subsets highlighted:
1 — left vertical; 2 — wheel profile bottom;
3 — right vertical

с параметрами $p=5, k=8$ представлен на рис. 6. По нему видно, что все пропуски (например, в районе гребня) обработаны корректно и линия регрессии повторяет форму профиля.

Определение параметров колеса. Аналогично тому, как к реальному колесу для измерений прикладывается шаблон в качестве средства допускового контроля, так и в предлагаемом методе производятся замеры в точках согласно «виртуальному шаблону». Шаблон опирается на правую вертикаль и нижнюю точку гребня.

Алгоритм нахождения вертикали описан ранее (рис. 4), задача определения нижней точки гребня решается путем нахождения глобального минимума функции профиля на области определения, так как данные точки должны быть тождественны. Поиск данного минимума можно свести к определению минимального значения среди локальных минимумов для каждого из сегментов, так как на каждом сегменте функция имеет весьма простую структуру. Следует отметить, что в случае, когда нижняя точка гребня оказывается на границе сегментов, привязки шаблона могут искажаться, следовательно, и все прочие контрольные точки измерения теряют привязку. Данная проблема решена путем добавления «гладкости» профиля при сшивке сегментов и выбора количества сегментов.

Когда опорные точки определены, положение всех прочих контрольных точек можно задать через них согласно упомянутым ГОСТам или иному нормативному документу (в зависимости от типа подвижного состава), после чего рассчитать ключевые параметры колеса.

Результаты исследования. На основе математической модели, построенной по облаку точек, были вычислены ключевые параметры колеса, представленные в таблице. Восстановленный профиль с параметрами колеса показан на рис. 7. В рамках статьи было рассмотрено только одно колесо, поскольку его данные были репрезентативными, а также содержали пропущенные значения.

Решение о необходимости отправки колесной пары на ремонт (в обточку) может быть принято согласно допустимым диапазонам, определяемым в нормативных документах, которые являются уникальными для каждого типа колес (таблица)⁵.

Полученные значения параметров исследуемого колеса соответствуют допустимым диапазонам,

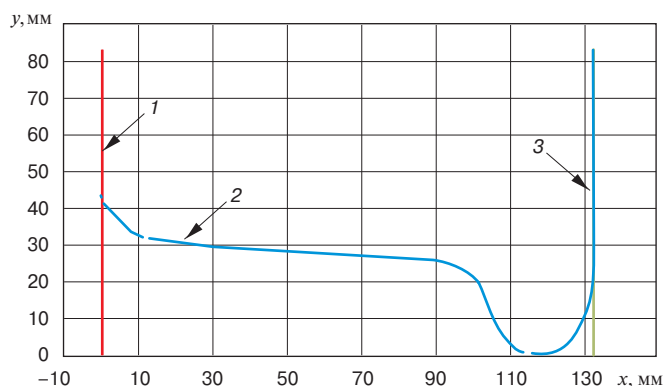


Рис. 6. Профиль колеса, построенный согласно модели кусочно-полиномиальной регрессии, $p=5, k=8$:
1 — левая вертикаль; 2 — нижняя часть профиля колеса;
3 — правая вертикаль

Fig. 6. Wheel profile built on a piecewise polynomial regression model, $p=5, k=8$:
1 — left vertical; 2 — wheel profile bottom;
3 — right vertical

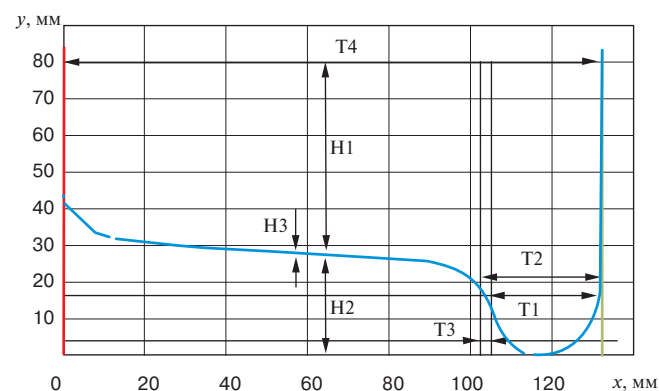


Рис. 7. Восстановленный профиль с параметрами колеса:
H1 — толщина обода колеса или бандаж; H2 — высота гребня;
H3 — прокат по кругу катания; T1 — толщина гребня на расстоянии 18 мм от вершины; T2 — толщина гребня на расстоянии 20 мм от вершины; T3 — крутизна гребня; T4 — ширина обода или бандаж

Fig. 7. Recovered profile with the wheel parameters:
H1 — wheel tread or tyre thickness; H2 — ridge height;
H3 — rolling circle; T1 — ridge thickness at 18 mm from the apex;
T2 — ridge thickness at 20 mm from the apex; T3 — ridge steepness;
T4 — tread or tyre width

определенным распоряжением ОАО «РЖД»⁶. Следовательно, данное колесо не будет забраковано, и его эксплуатация на подвижном составе будет продолжена.

⁵ Об утверждении Инструкции по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 22 декабря 2016 г. № 2631р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=679861&demo=1> (дата обращения: 10.04.2023); Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрику вагонов) № 808-2022 ПКБ ЦВ [Электронный ресурс]: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества: протокол от 8 декабря 2022 г. № 77. URL: <https://mintrans.gov.ru/storage/app/media/files/instr-808-2022.pdf?ysclid=1l0pu5l3xl704765662> (дата обращения: 10.04.2023).

⁶ Об утверждении Инструкции по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 22 декабря 2016 г. № 2631р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=679861&demo=1> (дата обращения: 10.04.2023).

Таблица
Ключевые параметры цельнокатаного колеса грузового вагона

Table

Key parameters of a solid-rolled wagon wheel

Параметр	Расшифровка параметра	Допустимый диапазон, мм	Полученное значение, мм
T1	Толщина гребня на расстоянии 18 мм от вершины	25–33	29,42
T2*	Толщина гребня на расстоянии 20 мм от вершины	—	31,07
T3*	Крутизна гребня	—	3,80
T4	Ширина обода или бандажа	126–133	132,04
H1	Толщина обода колеса или бандажа	>25	55,56
H2*	Высота гребня	—	27,70
H3	Прокат по кругу катания (разница проката эталонного колеса от исследованного)	0–7	0,30

* Данные параметры для исследуемого колеса не регламентированы.

* These parameters for the wheel under study are not regulated.

Ранее в комплексе КОНЛОК применялось описание профиля колеса с помощью ступенчатых функций, что не удовлетворяло новым требованиям к гладкости используемых функций. Разработанный алгоритм описания профилей учитывает дополнительные требования, что позволяет более точно описывать реальный объект.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты полностью соответствуют текущим целям работы, поставленные задачи выполнены в полном объеме. Были определены параметры колеса, обработка которых реализована по новому перспективному алгоритму, представленному в статье. Новый алгоритм описания и оценки профиля колеса учитывает дополнительные требования на гладкость и непрерывность используемых функций. Проверка производилась на цельнокатаных колесах грузового вагона колеи 1520 мм по ГОСТ 10791–2011.

Представленный алгоритм обработки данных позволяет бесконтактно и автоматизированно измерять геометрические параметры колесных пар подвижного состава в движении на основе данных, полученных с лазерного профилометра. Также данный алгоритм позволяет автоматизировать составление отчета о результатах

измерения, включая информацию об обследуемом объекте, и рекомендациях по принятию решения об отправке колеса в ремонт.

Основные ограничения алгоритма связаны с необходимостью получения данных с низким уровнем шума и ограниченным множеством оцениваемых видов колес. Каждый вид колеса требует отдельного подхода по причине отсутствия универсальных нормативных документов. Скорость съема данных также ставит ограничение на допустимую скорость движения поезда (до 120 км/ч).

В сравнении с данными обмеров, выполняемых ранее ручным методом, представленный алгоритм показал большую скорость и лучшую точность измерений без потери качества.

Совершенствование метода обработки данных связано с увеличением допустимой скорости движения состава за счет оптимизации механизма снятия и передачи данных, увеличения скорости обработки данных и качества передаваемых данных в суровых погодных условиях. Снег, дождь, град являются серьезными помехами, зашумляющими исходный сигнал. Также дальнейшая разработка может быть направлена на увеличение разнообразия типов анализируемых колесных пар, так как допустимые условия эксплуатации, определяемые в нормативных документах, являются уникальными для каждого типа колес.

Обязательным дальнейшим шагом адаптации нового алгоритма становится реализация модели перспективного анализа расчета износа колес и формирование цифровых двойников колесных пар, пройденных через комплекс КОНЛОК, на весь жизненный цикл эксплуатации колеса.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Влияние структуры и механических характеристик колесных стальных на изнашивание и режимы восстановления профиля

колесных пар / В.С. Кушнер [и др.]; под ред. И.А. Иванова, В.С. Кушнера. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2015. 224 с. [Kushner V.S., Krut'ko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E. *The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheel pairs*. Omsk: Publishing house of OmSTU; 2015. 224 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/vcbhmv>.

2. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О.С. Валинский [и др.]. Казань: Бук, 2022. 324 с. [Valinskiy O.S., Vorobyov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E., Krotov S.V., et al. *Improving the performance of wheel pairs of rolling stock*. Kazan: Buk; 2022. 324 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/txahyi>.

3. Ададуров А.С., Савельев И.Ю. Обзор существующих установок автоматизированного бесконтактного измерения геометрических параметров колесных пар // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 3(100). С. 48–51 [Adadurov A.S., Savelyev I.Yu. Review of existing installations for automated contactless measurement of geometric parameters of wheel pairs. *Transport of the Russian Federation*. 2022;(3):48-51. (In Russ.)]. EDN <https://www.elibrary.ru/lmfxxq>.

4. Ададуров А.С., Усмендеева А.Д. Система мониторинга состояния подвижного состава для формирования оптимизированных и сбалансированных планов ремонта и эксплуатации (часть 1) // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2018. № 3(43). С. 66–71 [Adadurov A.S., Usmendeeva A.D. The rolling stock condition monitoring system for the formation of optimized and balanced repair and maintenance plans (part 1). *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2018;(3):66-71. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xvvjad>.

5. Ададуров А.С., Тюпин С.В., Лапин А.М. Техническая диагностика колесных пар: современные методы и средства выявления дефектов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2013. № 4(24). С. 32–35 [Adadurov A.S., Tyupin S.V., Lapin A.M. Wheel set technical diagnosis: innovative methods of defect detection. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2013;(4):32-35 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ritrj>.

6. Li C., Luo S., Cole C., Spiryagin M. An overview: modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Vehicle System Dynamics*. 2017;55(7):1045–1070. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1296963>.

7. Буйносов А.П. Разработка и аппаратная реализация прибора для измерения геометрических параметров бандажей колесных пар // Транспорт Урала. 2010. № 3. С. 64–68 [Buynosov A.P. Development and hardware realization of the device for geometrical parameters of wheel pairs bandages measurement. *Transport of the Urals*. 2010;(3):64-68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/mvlhlyt>.

8. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Трофимов М.Н. Новый измерительный прибор // Локомотив. 1998. № 6. С. 40–41 [Buynosov A.P., Tsikhalevskiy I.S., Trofimov M.N. The new measuring instrument. *Locomotive*. 1998;(6):40-41. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yruwkwf>.

9. Репин М.Ю. Анализ приборов и устройств для контроля геометрических параметров бандажей колесных пар локомотивов // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 20 января 2018 г. Уфа: Аэтерна, 2018. Ч. 2. С. 107–112 [Repin M.Yu. Analysis of equipment and devices for monitoring geometric parameters of locomotive wheel pairs bandages. In: *Scientific revolutions: essence and role in the development of science and technology: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 20 January 2018, Ufa*. Ufa: Aeterna; 2018. Part 2. p. 107–112. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yozsov>.

10. Комиссаров А.В., Григорьев К.В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 3. С. 14–15 [Komissarov A.V., Grigoriev K.V. Automated diagnostic complex for measuring geometrical parameters of wheel sets. *Vagony i vagonnoe hozyaystvo*. 2011;(3):14-15. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/obfasb>.

11. Нуриев А.Г., Чистяков Э.Ю., Битюцкий Н.А. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 7–18 [Nuriev A.G., Chistyakov E.Yu., Bityutskiy N.A. Development of the Usage of Remote Measurements to Define Wheelset Geometric Parameters. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2023;(1):7-18. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-1-7-18>.

12. Лексотов И.С., Клюка В.П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 51–63 [Leksutov I.S., Klyuka V.P. To the possibility of using a linear scanner to create means of technical control of geometric parameters of the longitudinal section of the rolling surface of the railcar wheel. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;(3):51-63. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/tnmfx>.

13. Kutner M., Nachtsheim C., Neter J. *Applied Linear Regression Model*. 4th Edition. New York: McGraw Hill; 2004. 701 p.

14. Chow G.C. Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions. *Econometrica*. 1960;28(3):591–605. <https://doi.org/10.2307/1910133>.

15. Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М. Случайные процессы: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 3-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 447 с. [Volkov I.K., Zuev S.M., Tsvetkova G.M. *Random processes: coursebook for technical universities*. 3rd ed., corrected. Moscow: Bauman MGTU Publishing; 2006. 447 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич АДАДУРОВ,

канд. техн. наук, генеральный директор, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б); доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), Author ID: 540870, <https://orcid.org/0000-0002-9520-4596>

Игорь Юрьевич САВЕЛЬЕВ,

главный инженер, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б), Author ID: 1209857, <https://orcid.org/0009-0002-7511-7740>

Михаил Артемович ЧЕПУЛИС,

главный программист, Научный информационно-аналитический центр ВНИИЖТ (НИАЦ ВНИИЖТ, 196128, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 10, стр. 1), <https://orcid.org/0000-0001-7340-9323>

Ксения Геннадьевна АРИНУШКИНА,

инженер-технолог, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б); аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ, 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1), Author ID: 1163437, <https://orcid.org/0000-0002-1156-2071>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. ADADUROV,

Cand. of Sci. (Eng.), General Director, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.); Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, St. Petersburg, 9, Moskovskiy Ave.), Author ID: 540870, <https://orcid.org/0000-0002-9520-4596>

Igor Yu. SAVELEV,

Chief Engineer, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.), Author ID: 1209857, <https://orcid.org/0009-0002-7511-7740>

Michael A. CHEPULIS,

Chief Programmer, VNIIZhT Scientific Information and Analytics Centre (196128, St. Petersburg, 10/1, Blagodatnaya St.), <https://orcid.org/0000-0001-7340-9323>

Kseniya G. ARINUSHKINA,

Process Engineer, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.); Postgraduate, Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications (193232, St. Petersburg, 22/1, Bolshhevikov Ave.), Author ID: 1163437, <https://orcid.org/0000-0002-1156-2071>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Сергеевич АДАДУРОВ. Научное руководство, рецензирование, описание общей идеи, постановка задачи (35%).

Игорь Юрьевич САВЕЛЬЕВ. Руководство внедрением комплекса, корректировка результатов с учетом понимания процессов эксплуатации подвижного состава (10%).

Михаил Артемович ЧЕПУЛИС. Описание математического аппарата, написание программного кода для обработки сигналов, написание и редактирование текста статьи (45%).

Ксения Геннадьевна АРИНУШКИНА. Помощь в написании математического аппарата, написание и редактирование текста статьи (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Aleksandr S. ADADUROV. Academic advising, peer review, description of the general idea, terms of reference (35%).

Igor Yu. SAVELEV. System implementation management, adjustment of results considering the rolling stock operations (10%).

Michael A. CHEPULIS. Mathematical description, programme coding for signal processing, article writing and editing (45%).

Kseniya G. ARINUSHKINA. Assistance in mathematical modelling, article writing and editing (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023, рецензия от первого рецензента получена 18.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 25.05.2023, рецензия от третьего рецензента получена 26.05.2023, принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 13.04.2023, first review received 18.05.2023, second review received 25.05.2023, third review received 26.05.2023, accepted for publication 11.08.2023.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

Рожицкий, Дмитрий Борисович. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов / Д. Б. Рожицкий. — Москва : РАС, 2022. — 324 с.

Книга содержит необходимые сведения о структуре энергетики железнодорожного транспорта с учетом ее разделения на тяговую и нетяговую компоненты. Показаны доли этих составляющих. Рассмотрены базовые положения о формировании топливно-энергетических балансов и основы нормирования ресурсов применительно к нетяговой энергетике.

Приведены общие положения, методики и примеры расчета нормирования потребления электрической энергии на нетяговые нужды, котельно-печного топлива для котельных и теплоты для стационарных потребителей, включая потребности в ресурсах на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и различные теплотехнологии, основных

видов моторного топлива, применяемого как в автотранспорте, так и для обеспечения работы специализированной техники, осуществляющей работы по прокладке и ремонту железнодорожных путей, а также нормирование водопотребления и определение объемов водоотведения для железнодорожных потребителей.

Издание адресовано в первую очередь инженерам-энергетикам, инженерам по водоснабжению, занимающимся вопросами в области нормирования потребления топливно-энергетических и водных ресурсов, а также вопросами эффективного их использования на нетяговые нужды железнодорожного транспорта. Может быть использовано специалистами других отраслей при решении аналогичных задач, а также научными работниками и студентами высших учебных заведений соответствующих специальностей.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru