

## Лазерный профилометр

К.Г. Аринушкина\*

*Санкт-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*

*(Поступила в редакцию 29.05.2023; подписана в печать 08.07.2023)*

В статье анализируются основные неисправности вагонов, возникающие в процессе эксплуатации на Северо-Западных железных дорогах. Неисправные поверхности катания колесных пар были определены как одна из основных проблем на раннем этапе ремонта вагонов. Представлен обзор современных методов измерения поверхностей с помощью лазерной технологии. В статье рассматриваются принципы работы лазерных профилометров, их основные компоненты, а также методы обработки полученных данных. Описывается применение лазерных профилометров в различных областях, таких как промышленность, строительство, медицина и наука. Также обсуждаются преимущества и недостатки лазерных профилометров по сравнению с другими методами измерения поверхностей. Для сокращения времени остановки проходящих поездов предлагается вариант внедрения на железнодорожных путях лазерных профилометров. Как к реальному колесу прикладывается шаблон для измерений при техническом осмотре вагона подвижного состава, так и в предлагаемом способе измерения производятся в точках по шаблону. Технический результат — повышение точности измерений за счет минимизации человеческого фактора, глобальная цифровизация технологических процессов и автоматизация управления подвижным составом в пути следования. В ходе работы были проанализированы данные, полученные при измерениях различных профилей поверхностей грузовых вагонов, в том числе колесных пар в сравнении с эталонными профилями.

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

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагон, колесная пара, лазерный профилометр, дефекты поверхности катания, неисправности колесных пар.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам мониторинга состояния различного транспорта [1–5]. Одним из самых сложных для контроля участков является железная дорога.

На Северо-Западных железных дорогах наиболее распространенными неисправностями вагонов, возникающими в процессе эксплуатации, являются: износ колесных пар и осей, неисправности тормозных систем, износ и повреждения крепежных элементов, а также нарушение равномерности износа колес. В процессе эксплуатации подвижного состава на Северо-Западной железной дороге могут возникать следующие дефекты колесных пар: износ колес, колесообразные трещины, неправильный профиль колес, растрескивание колес, повреждение колес, нарушение геометрии колесной пары.

Для предотвращения возникновения этих неисправностей важно проводить регулярное техническое обслуживание вагонов, а также контролировать их состояние в процессе эксплуатации. Безопасность движения железнодорожного транспорта во многом зависит от качества материалов колесной пары, конструкции, технологии изготовления, ее осмотра и ремонта [6, 7]. Из-за больших статических и динамических нагрузок, а также нарушений правил технической эксплуатации

подвижного состава в колесной паре возникают различные дефекты. Для контроля состояния различных подвижных частей объекта и дефектов часто применяются оптические методы [8–13]. Требованиям к параметрам колесных пар в автоматизированной системе управления работой подвижного состава удовлетворяют лазерные профилометры.

Лазерный профилометр — это прибор, который используется для контроля геометрических параметров колесных пар. Он работает по принципу лазерной интерферометрии и измеряет высоту профиля колеса, расстояние между колесами, диаметр колеса и другие параметры, которые могут повлиять на безопасность и эффективность железнодорожного транспорта.

Контроль геометрических параметров колесных пар является важным элементом технического обслуживания и безопасности железнодорожного транспорта. Например, неправильное расстояние между колесами или изношенные колеса могут привести к повреждению гусеницы и даже к аварии. Поэтому регулярный контроль параметров колесных пар с помощью лазерного профилометра позволяет своевременно выявлять и устранять эти проблемы. Это повышает безопасность и надежность железнодорожного транспорта, а также снижает износ и эксплуатационные расходы.

### 1. ЛАЗЕРНЫЙ ПРОФИЛОМЕТР

Лазерные профилометры — это эффективные инструменты для измерения поверхностей, которые име-

\* k-arinushkina@mail.ru

ют свои преимущества и недостатки по сравнению с другими методами измерения поверхностей. Они обладают высокой точностью и скоростью измерений, безопасны в использовании, имеют широкий диапазон измерений, а также не требуют контакта с поверхностью, что является огромным достоинством по сравнению с ручным шаблоном. Однако лазерный профилометр обладает чувствительностью к изменениям условий измерения, имеют ограниченную глубину поля зрения, ограниченную применимость к определенным материалам, таким как сильно отражающие поверхности или неоднородные материалы.

Лазерный профилометр для определения геометрических параметров профиля поверхности содержит источник лазерного излучения с преобразователем лазерного луча в линию, оптический матричный приемник отраженного излучения и устройство обработки информации. Источник лазерного излучения выполнен в виде полупроводникового лазера, работающего в импульсном режиме. Вдоль отраженного луча перед оптическим матричным приемником вводится не менее одного узкополосного интерференционного светофильтра. Кроме того, используется полупроводниковый лазер, работающий в видимом красном диапазоне длин волн, система стабилизации температуры выполнена на основе элементов Пельтье с контроллером управления и датчиком температуры. Системы данных очень часто используются в различных оптических приборах для проведения технических измерений [1, 6, 8, 9, 12, 14–16]. Устройство обработки информации выполнено в виде программируемого логического контроллера с обработкой сигналов в реальном времени и расчетом профиля поверхности. Блок-схема лазерного профилометра представлена на рис. 1.

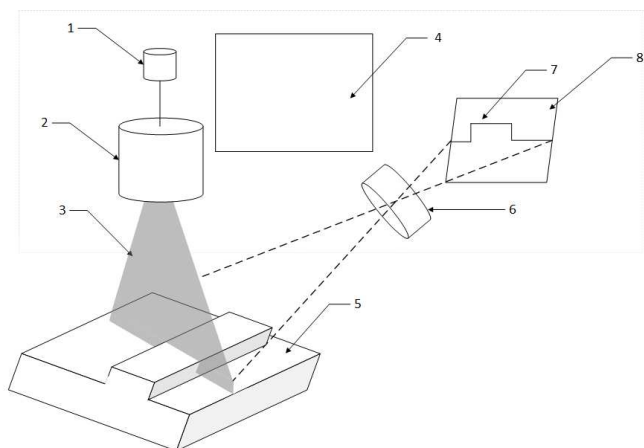


Рис. 1. Лазерный профилометр: 1 — лазерный модуль; 2 — генератор линии; 3 — плоскость лазерного излучения; 4 — контроллер на базе цифрового сигнального процессора; 5 — контролируемый объект; 6 — оптическая система фотоприемника; 7 — изображение линии зондирующего лазерного излучения на фотоприемнике; 8 — матричный фотоприемник

Лазерный профилометр предназначен для измерения: высоты гребня, прокатки, толщины гребня, крутизны гребня, толщины шины, а также обеспечивает снятие и анализ полного профиля качения колес, ведение электронной базы данных износа колесных пар, контроль допусков и сортировку при техническом освидетельствовании, ремонте и формировании железнодорожных колесных пар подвижного состава.

В отличие от применявшихся ранее шаблонов контроля параметров протектора колес, которые применялись работниками структуры железнодорожного транспорта, лазерный профилометр в автоматизированной системе управления подвижным составом полностью автоматизирует этот процесс.

Профилометр состоит из нескольких лазерных датчиков, установленных на пути и направленных на колеса проходящих поездов. Лазеры измеряют расстояние до колеса и фиксируют его профиль. Полученные данные передаются на компьютер, где они обрабатываются и анализируются.

Лазерный сигнал оставляет на фотоматрице широкую полосу, охватывающую сразу несколько точек. По облаку точек, полученному на основе изображения с фотоприемника, анализируется профиль колеса и рассчитываются контрольные значения. Поскольку в процессе эксплуатации геометрия колеса изменяется, становится невозможным описание новой формы профиля с достаточной точностью классами исходных функций.

Для решения этой задачи была разработана полиномиальная модель. Эта модель учитывает особенности искажения отраженного лазерного излучения от измененных профилей колеса при его движении. Учет этих особенностей позволяет более четко реализовать восстановление формы профиля колесной пары по сравнению с ранее использовавшимися методами.

Решение задачи регрессии искали в классе кусочно-полиномиальных функций [17, 18]. В дальнейшем границы области определения каждой части кусочной функции будем называть точками разногласия или точками согласования. Таким образом, решение выглядит так:

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

где  $p$  — степень полинома,  $k$  — количество сегментов,  $\beta = (\beta^{(0)}, \dots, \beta^{(p)})$  — полиномиальные коэффициенты,

$$f(x; \beta) = \beta^{(0)} + \beta^{(1)}x + \dots + \beta^{(p)}x^p = \sum_{j=0}^p \beta^{(j)}x^j - \text{полиномиальная функция.}$$

Лазерный сигнал оставляет на фотоматрице широкую полосу, охватывающую сразу несколько точек.

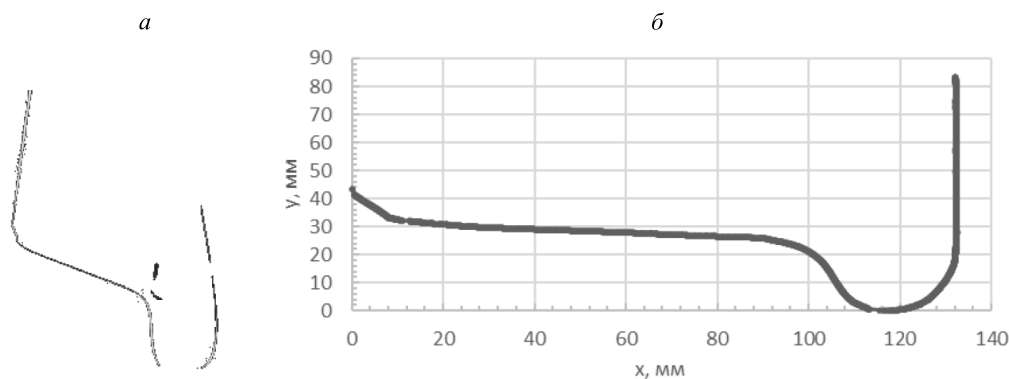


Рис. 2. Профиль колеса

Луч лазера расположен вертикально относительно матрицы, то есть вдоль ее короткой стороны. В этом случае объектами обработки изображения будет строка. При этом перевернутое изображение на матрице показано на рис. 2, а, а обработанное облако точек на рис. 2, б. По облаку точек, полученному на основе изображения с ПЗС-матрицы, анализируется профиль колеса и рассчитываются контрольные значения.

Анализ этих профилей позволяет установить наличие дефектов в колесной паре при движении автомобиля, что раньше сделать было сложнее.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известные недостатки в работе комплекса технических измерений, действующего на Северо-Западной железной дороге, влияющие на пропускную способность станций и пунктов технического обслуживания представляют собой низкую точность и ограниченный диапазон измерений, а также недостаточную скорость и производительность.

Одной из основных проблем на начальном этапе ремонта вагонов, связанной с выходом из строя поверхности катания колесных пар, является необходимость проведения ремонтных работ на подвижном составе, что может приводить к значительным затратам на оборудование и материалы, а также к длительным задержкам в эксплуатации.

Использование новой модели позволило с помощью лазерного профилометра создать автоматизированную систему, способную более точно контролировать геометрические параметры профиля поверхности, контурные размеры объекта, взаимное расположение деталей, отклонение от плоскостности. Автоматизированная система профилометра позволяет не только делать снимки, анализировать полученные данные на основе их сравнения с базовым эталоном, но и передавать информацию. Это помогает оценить количество ошибок в полученных измерениях и позволяет преобразовать их в цифровые данные.

По обработанным данным колесной пары был найден выход параметра ТЗ — крутизна гребня из допустимых пределов. Из чего было сделано предположение, что данная колесная пара подвержена длительному воздействию при прохождении односторонних криволинейных участков пути. Получен восстановленный профиль с параметрами колеса. Из чего можно сделать вывод, что система обработки данных и лазерный профилометр работают корректно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как к реальному колесу прикладывается шаблон для измерений при техническом осмотре вагона подвижного состава, так и в предлагаемом способе измерения производятся в точках по шаблону. Технический результат — повышение точности измерений за счет минимизации человеческого фактора, глобальная цифровизация технологических процессов и автоматизация управления подвижным составом в пути следования.

Таким образом, использование лазерного профилометра в автоматизированной системе управления подвижным составом является эффективным способом контроля геометрических характеристик грузовых вагонов и платформ. Однако для достижения наилучшего результата необходимо учитывать ряд особенностей лазерного профилометра, таких как выбор оптимальной высоты установки и угла сканирования, а также правильная обработка данных.

Кроме того, следует учитывать, что использование лазерного профилометра не является единственным способом контроля геометрических характеристик подвижного состава, и для достижения максимальной эффективности рекомендуется сочетать его работу с другими методами контроля: с автоматизированной системой управления подвижным составом.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование лазерного профилометра в автоматизированной системе управления подвижным составом является перспективным и эффективным методом контроля геометрических характеристик подвижного состава

при соблюдении определенных особенностей эксплуатации и учета технико-экономических ограничений. В целом использование данной технологии повышает качество контроля и повышает эффективность системы управления подвижным составом.

Автор выражает благодарность профессору В.В. Да-

выдову за неоценимый вклад в развитие науки и образования в области, которой посвящена данная работа. Благодаря его наставничеству, экспертизе и поддержке, данная работа была выполнена на научно-высоком уровне и способствует дальнейшему развитию науки и практики в данной области.

- 
- [1] Давыдов В.В., Кружалов С.В., Гребеникова Н.М., Смирнов К.Я. // Измерительная техника. **61**, N 4. 33. (2018).
- [2] Mihov E.D., Nepomnyashchiy O.V. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. **9**, N 4. 473. (2016).
- [3] Ryzhenko I.N., Lutsenko A.E., Varygin O.G., Nepomnyashchiy O.V. // Proceedings of 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON. 2019. P. 392. (2019).
- [4] Tarasenko M.R., Lenets V.A., Akulich N.V. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 10531, LNCS. 227. (2017).
- [5] Davydov R.V., Dmitrieva D.S., Pilipova V.M. et al. // Proceedings International Conference Laser Optics, (ICLO-2020), Accession Number: 20243738 (2020).
- [6] Chunsheng Li., Shihui L., Colin C. et al. // Vehicle System Dynamics. **55**, N 7. 1045. (2017).
- [7] Kutner M., Nachtsheim C., Neter J. // Technometrics. **26**, N 4. 165. (2004).
- [8] Zharikov I.A., Rud V.Yu., Rud Yu.V., Terukov E.I. // J. of Physics: Conference Series. **1410**, N 1. 012088. (2019).
- [9] Smirnov K.J., Glinushkin A.P. // J. Phys.: Conf. Ser. **1695**, N 1. 012090. (2020).
- [10] Kosolapov V.M., Cherniavskih V.I., Zarudny V.A. et al. // Agronomy. **12**. 76. (2022).
- [11] Myazin N.S., Dudkin V.I., Grebenikova N.M. et al. // Lecture Notes in Computer Science. **11660**. 744. (2019).
- [12] Smirnov K.J., Tushavin G.V., Glagolev S.F. // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, (EExPolytech-2018), 8564416. 209. (2018).
- [13] Wardal W.J., Mazur K.E., Roman K. et al. // Energies. **14**. 8584. (2021).
- [14] Kuzmin M.S., Rogov S.A. // Computer Optics. **43**, N 3. 391. (2019).
- [15] Yakusheva M.A., Davydov R.V., Isakova D.D. // IEEE Proceedings 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology, (ITNT-2022). 23-27 May 2022. Samara, Russia. 145. (2022).
- [16] Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. // Computer Optics. **44**, N 3. 295. (2020).
- [17] Gregory C. // Appl. Mathematics. **28**. 591. (1960).
- [18] Huber P.J. Robust statistics. New York: John Wiley & Sons, 1981.

## Laser profilometer

K.G. Arinushkina

Department of Photonics and Communication Lines  
The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications  
Saint Petersburg 193232, Russia  
E-mail: k-arnushkina@mail.ru

Аннотация The article analyzes the main malfunctions of cars that occur during operation on the North-Western Railways. Faulty wheelset treads were identified as one of the major problems in the early stages of car repairs. An overview of modern methods for measuring surfaces using laser technology is presented. The article discusses the principles of operation of laser profilometers, their main components, as well as methods for processing the obtained data. The application of laser profilometers in various fields such as industry, construction, medicine and science are described. The advantages and disadvantages of laser profilometers compared to other surface measurement methods are also discussed. To reduce the stopping time of passing trains, it is proposed to introduce laser profilers on the railway tracks. As a template is applied to a real wheel for measurements during the technical inspection of a rolling stock car, so in the proposed method, measurements are made at points according to the template. The technical result is an increase in the accuracy of measurements by minimizing the human factor, global digitalization of technological processes and automation of rolling stock control along the route. In the course of the work, data obtained from measurements of various profiles of the surfaces of freight cars, including wheelsets, were analyzed in comparison with reference profiles.

PACS: 42.62.Ci.

Keywords: railway transport, wagon, wheel set, laser profilometer, rolling surface defects, wheel set failures.

Received 29 May 2023.

### Сведения об авторах

Аринужкина Ксения Геннадьевна — аспирант 1 года обучения; email: k-arinushkina@mail.ru.