

Скоростные погрешности инерциального метода выявления коротких неровностей рельсов

А. В. Большакова[✉], А. М. Боронахин, Д. Ю. Ларионов,
Л. Н. Подгорная, А. Н. Ткаченко, Р. В. Шалымов, Э. Д. Чуряев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] avbolshakova@etu.ru

Аннотация

Введение. Для работы системы измерения и расчета коротких и импульсных неровностей на поверхности катания рельсовых нитей необходимо определять длину сигнала, соответствующую прохождению расстояний (нормативная максимальная длина дефекта и расстояние между колесными парами тележки вагона). При записи сигнала от времени из-за влияния скорости длина сигнала, соответствующая этим неизменным в пространственном отношении расстояниям, будет разниться.

Цель работы. Разработка алгоритма поиска дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров, установленных на буксовых узлах тележки вагона, при их неэквилидистантной пространственной записи.

Материалы и методы. Рассматриваются данные, полученные в результате проезда вагона-лаборатории с установленной на нем системой измерения и расчета коротких и импульсных неровностей на поверхности катания рельсовых нитей. Поиск и определение параметров неровности поверхности катания рельса осуществляются инерциальным методом. Для разработки алгоритма использовались методы нормировки, корреляционный анализ.

Результаты. Разработан алгоритм поиска дефектов поверхности катания рельсовых нитей инерциальным методом с учетом пространственной неэквилидистантности сигнала. Внедренный в алгоритм корреляционный анализ позволил скомпенсировать скоростную погрешность определения дефекта. В рассмотренном в статье примере относительная погрешность равна 0.4 %. Компенсация скоростной погрешности в разы снижает вероятность возникновения ошибки первого рода в определении дефекта.

Заключение. Разработанный алгоритм позволяет учесть скоростные погрешности при инерциальном методе выявления коротких неровностей. Использование корреляционного анализа снижает вероятность ошибки первого рода при поиске дефектов поверхности катания рельса.

Ключевые слова: диагностика рельсового пути, инерциальные датчики, корреляционный анализ, неэквилидистантная пространственная запись, дефект, скорость, скоростная погрешность

Для цитирования: Скоростные погрешности инерциального метода выявления коротких неровностей рельсов / А. В. Большакова, А. М. Боронахин, Д. Ю. Ларионов, Л. Н. Подгорная, А. Н. Ткаченко, Р. В. Шалымов, Э. Д. Чуряев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 101–110. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-101-110

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Результаты исследований, представленные в статье, получены при выполнении инициативной НИОКР «Управление движением и повышение энергоэффективности транспортных средств (НП/ПОПР-14)» (регистрационный номер: 122022200139-6), которая реализуется в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Статья поступила в редакцию 13.10.2022; принята к публикации после рецензирования 14.11.2022; опубликована онлайн 29.12.2022

Velocity Errors Associated with Application of Inertial Methods for Detecting Rail Surface Short-Wavelength Irregularities

A. V. Bolshakova[✉], A. M. Boronahin, D. Yu. Larionov, L. N. Podgornaya,
A. N. Tkachenko, R. V. Shalymov, E. D. Churyaev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉] avbolshakova@etu.ru

Abstract

Introduction. Efficient operation of a system for measuring rail surface short-wavelength irregularities depends on evaluation of the signal length with respect to travelled distances, i.e., the standard maximum defect length and the distance between the wheels of a car bogie. When recording an accelerometer signal with respect to time due to the effect of velocity, the signal length corresponding to these spatially constant distances will vary.

Aim. Development of an algorithm for determining rail running surface defects using the data obtained by accelerometers mounted on the axle boxes of a car bogie under their not equidistant spatial record.

Materials and methods. The data obtained when passing a laboratory car equipped with a system for measuring short-wavelength irregularities was used. The search and determination of irregularity parameters was carried out by an inertial method. The methods of normalization and correlation analysis were used.

Results. An algorithm for determining rail running surface defects based on an inertial method was developed, considering the spatial non-equidistance of the signal. The implemented correlation analysis allows compensation of high-velocity errors when determining the defects. In the considered example, the relative error equaled 0.4 %. Compensation of velocity errors reduces the probability of type I errors in defect determination.

Conclusion. The developed algorithm considers velocity errors associated with the application of inertial methods for detecting short-wavelength irregularities. The implementation of correlation analysis reduces the probability of type I errors when determining rail running surface defects.

Keywords: rail diagnostics, inertial sensors, correlation analysis, non-equidistant spatial record, defect, velocity, velocity error

For citation: Bolshakova A. V., Boronahin A. M., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Tkachenko A. N., Shalymov R. V., Churyaev E. D. Velocity Errors Associated with Application of Inertial Methods for Detecting Rail Surface Short-Wavelength Irregularities. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 101–110. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-101-110

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The research results presented in the article were obtained during the implementation of the initiative R&D "Motion Control and Energy Efficiency Improvement of Vehicles (NP/POPR-14)" (Registration number: 122022200139-6), which is part of the strategic academic leadership program "Priority-2030" in the ETU "LETI".

Submitted 13.10.2022; accepted 14.11.2022; published online 29.12.2022

Введение. Транспортная безопасность – одна из актуальных проблем современной России и мира в целом. В частности, для железнодорожного транспорта в обеспечение безопасности перевозок входит контроль состояния железнодорожного полотна. Специальными средствами измеряются как геометрические параметры пути (такие как ширина колеи, положение рельсовых нитей по уровню, просадки рельсовых нитей, положение пути в плане), так и дефекты поверхности катания рельсов (выкрашивания, смятия, рифлы и др.).

Для диагностики дефектов рельсового пути используются как ручные методы, так и специализированные вагоны-лаборатории [1–7]. Основными недостатками обоих методов являются необходимость изменения трафика на контролируемом участке и, как следствие, низкая частота измерений в течение года. Ликвидировать перечисленные недостатки можно, оснащая регулярно-курсирующие поезда встраиваемыми средствами диагностики. Примером такой системы может служить система измерения и расчета коротких и импульсных неров-

ностей на поверхности катания рельсовых нитей (КИН) инерциальным методом [8–11].

Работа системы КИН основана на измерениях вертикальной составляющей ускорения, приобретаемого колесом при прохождении дефекта. Акселерометры в составе КИН установлены на буксовых узлах тележки вагона [12]. Таким образом, при прохождении колесом дефекта в сигнале акселерометра, установленном на данном колесе, будет наблюдаться значительное увеличение амплитуды. Местоположение дефекта на рельсовом пути определяется путевой координатой. На вагоне информация о путевой координате формируется как пройденная дистанция от заранее заданной начальной координаты (обычно по показаниям датчика угла оборота колеса – одометра). Для однозначного определения факта наличия дефекта должна обеспечиваться повторяемость сигналов акселерометров, установленных на следом идущих колесах (проходящих по одному рельсу). Сигналы приводятся к одной путевой координате (вводится задержка, равная времени прохождения расстояния между осями колесных пар тележки), затем выполняется корреляционный анализ. Если сигналы имеют высокую степень корреляции, вычисляются параметры дефекта. Однако возникает противоречие: при приведении сигналов к единой путевой координате используется априорная информация о базе тележки (расстояние между осями колесных пар тележки), а запись сигналов осуществляется от времени. Таким образом, при различных скоростях движения состава необходимо смещать один сигнал относительно другого на разное число временных отсчетов. Аналогично при проведении корреляционного анализа [12] длина участка для анализа составляет максимальную длину короткой неровности – 25 см (в соответствии с распоряжением ОАО "РЖД" № 2499р от 23.10.2014 г.), которой также нужно поставить в соответствие набор временных отсчетов.

Из вышеизложенного стоит задача разработки алгоритма поиска дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров, установленных на буксовых узлах тележки вагона, при их неэквидистантной пространственной записи.

Разработка алгоритма. В настоящей статье используются данные, полученные в ходе проезда вагона-лаборатории с установленной на нем системой КИН. Для обработки сигнала акселерометров в задаче поиска рельсовых неровностей в первую очередь необходимо избавиться от влияния скорости на амплитуду сигнала, так как при прохождении одного и того же дефекта с разными скоростями вертикальное ускорение будет больше при больших скоростях движения вагона. Нивелировать влияние скорости можно, выполнив нормирование показаний акселерометров по квадрату скорости [12].

Поиск точки начала дефекта осуществляется следующим образом: строится огибающая модуля сигнала акселерометра для однозначного определения границ анализируемых участков. Затем выбираются точки, в которых амплитуда построенной огибающей выше порогового значения. Порог подбирается эмпирически, таким образом, чтобы учесть два фактора. Во-первых, не отбраковывать всплески, предположительно вызываемые прохождением дефекта или элементов конструкции рельсового полотна. Во-вторых, исключить ложные всплески, вызванные перераспределением энергии в системе вагон–рельсовый путь [13]. Пример огибающей модуля нормированного сигнала с порогом приведен на рис. 1.

Критерием определения дефекта является повторяемость сигналов акселерометров, установленных на следом идущих по одному рельсу колесах. Следовательно, чтобы подтвердить или опровергнуть наличие дефекта поверхности катания рельса, необходимо найти точки начала предполагаемого дефекта в сигналах акселерометров двух модулей, установленных

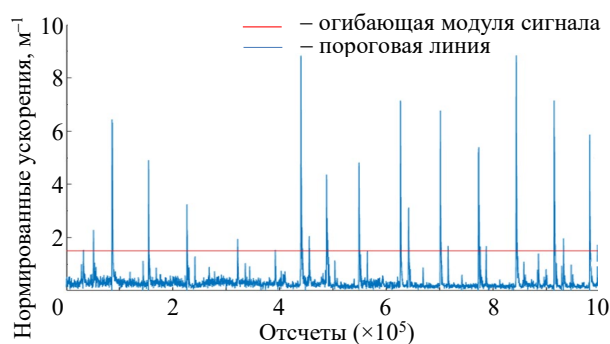


Рис. 1. График огибающей сигнала акселерометра и пороговая линия

Fig. 1. The accelerometer signal envelope and threshold line

на колесах, идущих по одному рельсу. Начало дефекта в сигнале модуля, установленном на впереди идущем колесе, – точка пересечения нормированного сигнала и пороговой линии, описанной ранее. Для следом идущего колеса точку начала дефекта можно вычислить следующим образом:

$$n_2 = n_1 + N_\tau = n_1 + \frac{Sf}{v}, \quad (1)$$

где n_2 – номер отсчета начала предполагаемого дефекта в показаниях модуля, установленного на позади идущем колесе; n_1 – номер отсчета начала предполагаемого дефекта в показаниях модуля, установленного на впереди идущем колесе; N_τ – число отсчетов, соответствующее прохождению расстояния, равного базе тележки S (расстояние между осями колесных пар тележки вагона для конкретной модели вагона и анализируемых в статье данных составляет 2.5 м); f – частота дискретизации; v – скорость движения поезда в момент прохождения дефекта впереди идущим колесом. В (1) сделано допущение, что скорость состава за время прохождения 2.5 м не изменяется или изменяется столь незначительно, что этим изменением можно пренебречь, так как существуют нормативные ограничения на ускорения железнодорожного состава, тем более вагона-лаборатории. На рис. 2 представлена одна из пар автоматически найденных точек начала дефекта по сигналам акселерометров, установленных на впереди идущем колесе и следом идущем за ним колесе.

После выявления начальной точки необходимо определить длину интервала сигнала, со-

ответствующую прохождению предполагаемого дефекта. В соответствии с нормативной документацией максимальная длина коротких неровностей ($L_{\max}$) составляет 0.25 м. Далее аналогично (1) вычисляются номера отсчетов, соответствующие концу предполагаемого дефекта (вместо базы тележки S берется величина $L_{\max}$) для сигналов акселерометров обоих модулей. Так, например, при движении поезда со скоростью 60 км/ч в рассматриваемый интервал, равный в максимальной длине короткой неровности, попадает 488 отсчетов, а при 20 км/ч – 1462 отсчета. На рис. 3 представлены рассматриваемые участки сигналов акселерометров с совмещенными в соответствии с (1) точками начала дефекта n_1 и n_2 .

Как упоминалось ранее, критерием определения дефекта является повторяемость сигналов акселерометров, установленных на следом идущих по одному рельсу колесах. Для оценки повторяемости используется коэффициент корреляции сигналов акселерометров [14].

Если корреляция сигналов выше 0.5, то можно сделать вывод о наличии дефекта. И далее требуется определить параметры дефекта. Если же корреляция сигналов отсутствует, то дефекта поверхности катания рельса нет. Повышение амплитуды сигнала акселерометра на одном из колес вызвано другими причинами, например дефектом поверхности катания колеса [15]. Далее более подробно будут рассмотрены примеры сигналов для обоих вариантов.

Из рис. 3 видно, что число отсчетов, на которое сдвигается сигнал следом идущего колеса, вычисленное по (1), неточное. Для устранения этой неточности был выполнен последова-

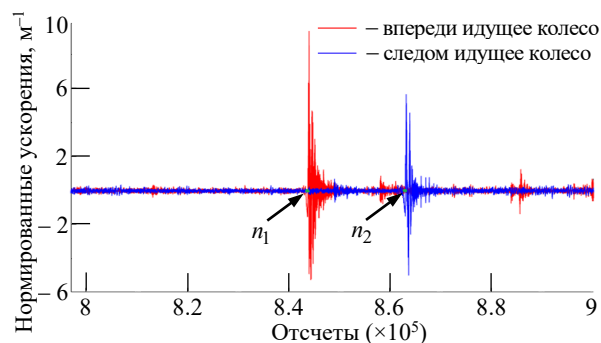


Рис. 2. Найденные точки начала дефекта в показаниях двух датчиков

Fig. 2. The points of the defect's beginning found by two sensors

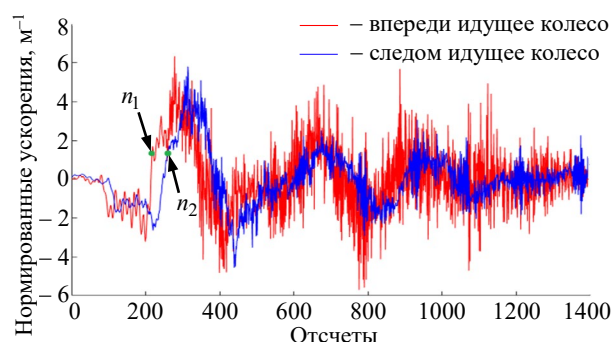


Рис. 3. Сигналы акселерометров на участке с дефектом

Fig. 3. Accelerometer signals in the area with a defect

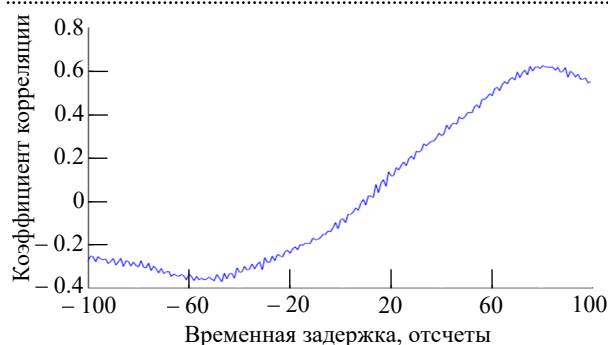


Рис. 4. Коэффициент корреляции двух сигналов акселерометров

Fig. 4. Correlation coefficient of two accelerometer signals

тельный сдвиг одного сигнала относительно другого с шагом в 1 отсчет и вычислен коэффициент корреляции при каждом сдвиге (рис. 4). Таким образом, можно видеть, что для точной пространственной синхронизации сигналов нужен дополнительный сдвиг на 80 отсчетов. На рис. 5 представлены пространственно синхронизированные сигналы акселерометров, установленные на колесах, идущих по одному рельсу, при прохождении рассматриваемого интервала, предположительно соответствующего короткой неровности.

После синхронизации сигналов сравнивается коэффициент корреляции в нулевом сечении, т. е. при нулевой временной задержке (рис. 6). Затем рассчитывается длина дефекта λ , которая равна расстоянию (с пересчетом в миллиметры) между ближайшими минимумами от максимума корреляционной функции (рис. 6).

При отсутствии дефекта пары найденных точек начала предполагаемых дефектов отбрасываются. Для примера на рис. 7 представлен пространственно синхронизированный сигнал акселерометров, установленных на следом

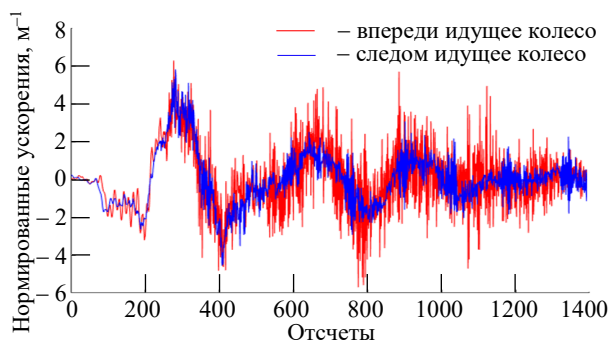


Рис. 5. Пространственно синхронизированные сигналы акселерометров на участке с дефектом

Fig. 5. Spatially synchronized accelerometer signals at the site with a defect

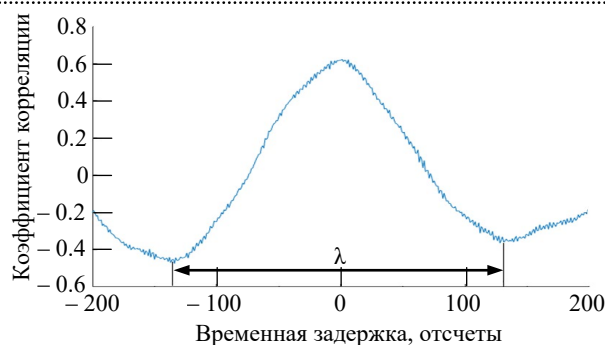


Рис. 6. Коэффициент корреляции двух сигналов акселерометров

Fig. 6. Correlation coefficient of two accelerometer signals

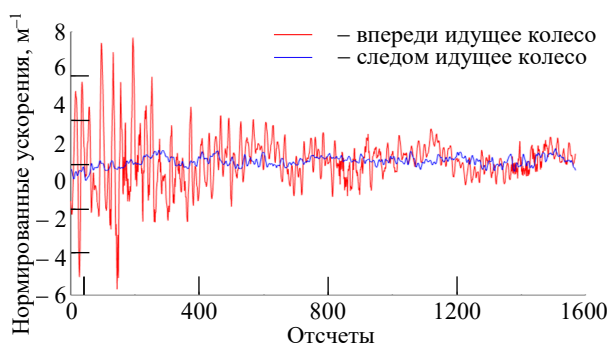


Рис. 7. Сигналы акселерометров на участке без дефекта

Fig. 7. Accelerometer signals in a defect-free area

идущих колесах, при отсутствии дефекта поверхности катания рельса. Подтверждающий данный факт график коэффициентов корреляции представлен на рис. 8.

Анализируя вышеприведенные действия, направленные на выявление коротких неровностей рельсов по показаниям акселерометров системы КИН, можно составить блок-схему обработки данных акселерометров. На рис. 9 приведена блок-схема разработанного алгоритма поиска дефектов поверхности катания при неэкви-дистантной пространственной записи.



Рис. 8. Коэффициент корреляции двух сигналов акселерометров при отсутствии дефекта

Fig. 8. Correlation coefficient of two accelerometer signals in the absence of a defect

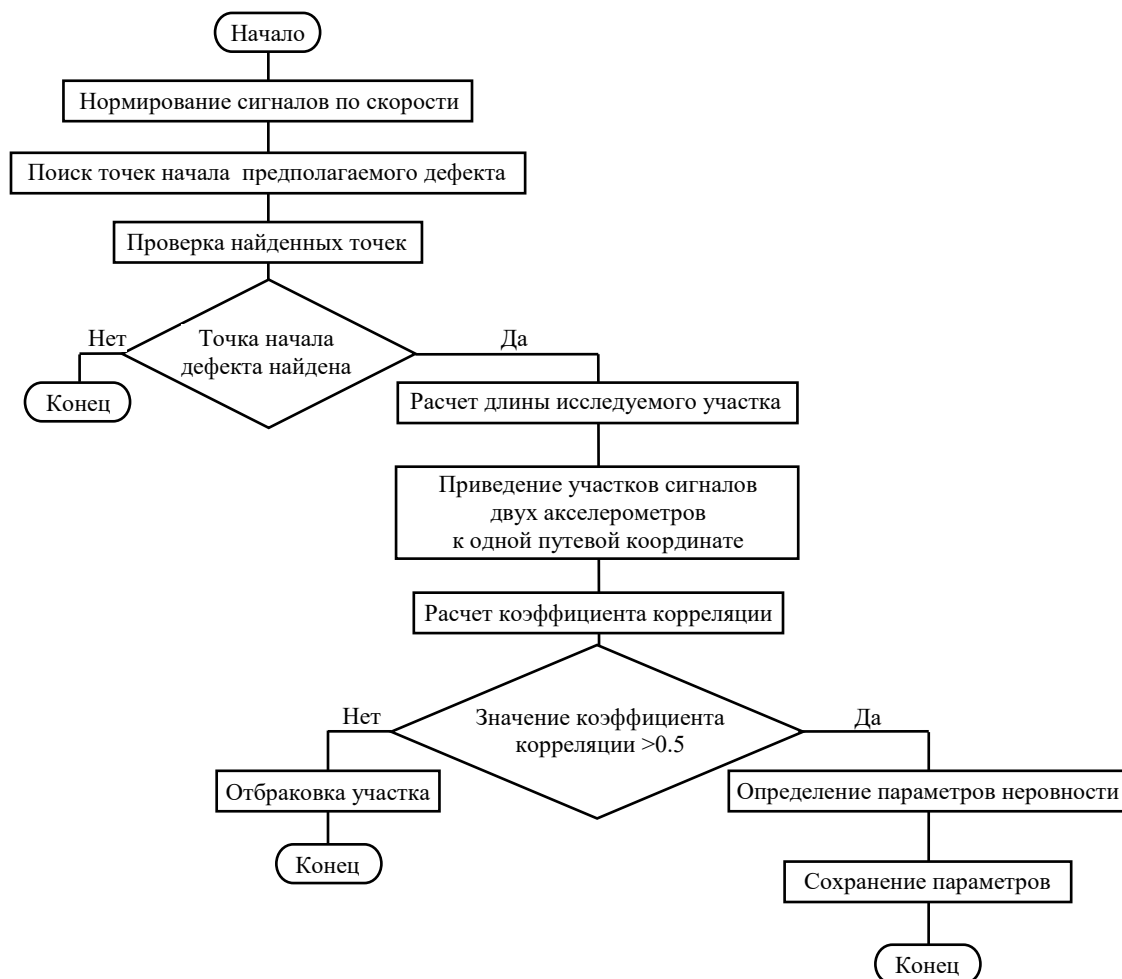


Рис. 9. Блок-схема алгоритма поиска коротких неровностей рельса
Fig. 9. Block diagram of the algorithm for detecting running surface defects

Результаты. Корреляционный анализ позволяет компенсировать скоростную погрешность определения дефекта, так как при использовании (1) допускается неизменность значения скорости на рассматриваемом интервале (относительная погрешность составляет 0.4 %), а также в разы снизить вероятность ошибки первого рода в определении дефекта, поскольку пороговое значение, определяющее дефект, применяется к нулевому сечению коэффициента корреляции. На рис. 3 значение коэффициента корреляции в нулевом сечении

составляет -0.1 , следовательно, данный отрезок сигнала был бы проигнорирован.

Закключение. Полученный в работе алгоритм позволяет осуществлять поиск дефектов поверхности катания рельсов в сигналах, установленных на буксовых узлах акселерометров, при различных скоростях движения состава, учитывая влияние скорости на длину рассматриваемого участка в отсчетах при используемой временной записи сигнала и нивелируя ее влияние на амплитуду исследуемых сигналов.

Авторский вклад

Большакова Александра Васильевна – разработка алгоритма.

Боронахин Александр Михайлович – постановка задачи и руководство научными исследованиями.

Ларионов Даниил Юрьевич – монтаж системы, проведение эксперимента.

Подгорная Людмила Николаевна – разработка системы.

Ткаченко Анна Николаевна – разработка системы.

Шалымов Роман Вадимович – монтаж системы, проведение эксперимента.

Чуряев Эдуард Дмитриевич – разработка алгоритма.

Author's contribution

Alexandra V. Bolshakova, algorithm development.

Alexander M. Boronakhin, problem statement and scientific research management.

Daniil Yu. Larionov, system installation, experiment.

Lyudmila N. Podgornaya, system development.

Anna N. Tkachenko, system development.

Roman V. Shalymov, system installation, experiment.

Eduard D. Churyaev, algorithm development.

Список литературы

1. Федотов А. С., Фазилова З. Т. Вагон-дефектоскоп нового поколения ВД-УМТ-1 // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 5. С. 19–22.
2. Марков А. А., Максимова Е. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестн. ИЖГТУ им. М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 22–32. doi: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32
3. Единый диагностический комплекс – две системы дефектоскопии / В. Ф. Тарабрин, О. Н. Кисляковский, О. Е. Чистякова, Д. А. Кононов // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 9. С. 34–37.
4. Самойленко А. Н., Кривошеев И. Н. Вагон-дефектоскоп как средство первичного контроля // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 1. С. 19–20.
5. Марков А. А., Шпагин Д. А., Шилов М. Н. Ультразвуковой многоканальный дефектоскоп для контроля железнодорожных рельсов с регистрацией сигналов // Дефектоскопия. 2003. № 2. С. 24.
6. Шилов М. Н., Мосягин В. В., Козьяков А. Б. О развитии съемных ультразвуковых дефектоскопов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 8. С. 14–17.
7. Innovative Diagnostics of the Railway Track Superstructure / J. Kanis, V. Zitrický, V. Hebelka, P. Lukáč, M. Kubín // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 53. P. 138–145. doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.017
8. Ng A. K., Martua L., Sun G. Dynamic modelling and acceleration signal analysis of rail surface defects for enhanced rail condition monitoring and diagnosis // 4th Intern. Conf. on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Singapore, 05–07 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 69–73. doi: 10.1109/ICITE.2019.8880246
9. Yurong Wang. Theoretical investigation into the measurability of rail unevenness and corrugation using the dynamic response of axle box and bogie // Proc. IMechE. Pt. F: J Rail and Rapid Transit. 2020. Vol. 235, iss. 3. P. 1–11. doi: 10.1177/0954409720923213
10. Zhu Feng, Luo Kegan, Zhou Wuxing. Measuring Railway Track Irregularities at high accuracy and efficiency based on GNSS/INS/TS Integration // IEEE Sensors J. 2022. Vol. 22, iss. 15. P. 15334–15344. doi: 10.1109/JSEN.2022.3183433
11. Кирьянов М. Ю., Орлов В. В. Применение инерциальных навигационных систем во внутритрубной диагностике // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7, № 3. С. 84–95.
12. Ларионов, Д. Ю., Подгорная Л. Н., Шалымов Р. В. Инерциальный метод диагностики пути в условиях его динамического взаимодействия с вагоном // Материалы докл. XIII конф. молодых ученых "Навигация и управление движением", Санкт-Петербург, 15–30 марта 2011 / ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2011. С. 357–364.
13. Анализ вибраций в системе "вагон-рельсовый путь" / А. В. Большакова, А. М. Боронахин, Д. Ю. Ларионов, Л. Н. Подгорная, А. Н. Ткаченко, Р. В. Шалымов // Приборы. 2022. № 1(259). С. 46–51.
14. Жаворонков А. В., Королев А. Л. Результаты применения коэффициентов корреляции Кендалла для выявления определенных параметров // Модернизация отечественной системы управления: анализ тенденций и прогноз развития: материалы Всерос. науч.-практ. конф. и XII–XIII Дридзеvских чтений. Москва, 21–22 нояб. 2013. / Ин-т социологии РАН. М., 2014. С. 191–196.
15. Vibration Analysis of a Railcar/Rail System using Inertial Sensors Mounted on Axle Boxes / N. V. Phap, A. V. Bolshakova, A. M. Boronachin, L. N. Podgornaya, R. V. Shalymov // Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. Moscow, 26–28 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1659–1662. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396332

Информация об авторах

Большакова Александра Васильевна – магистр по направлению "Приборостроение" (2019), аспирант, ассистент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – диагностика рельсового пути; вибрационный анализ; инерциальная навигация. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: avbolshakova@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9294-8338>

Боронахин Александр Михайлович – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Ларионов Даниил Юрьевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 60 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: lariondan@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6722-9211>

Подгорная Людмила Николаевна – кандидат технических наук (2010), доцент, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 100 научных публикаций. Сфера научных интересов – инерциальные навигационные системы; обработка данных; гироскопические приборы; диагностика рельсового пути.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: lnpodgornaya@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8466-2017>

Ткаченко Анна Николаевна – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – волоконно-оптическая сейсмология; диагностика рельсового пути; обработка информации.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: antkachenko@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4706-4859>

Шалымов Роман Вадимович – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 70 научных публикаций. Сфера научных интересов – инерциальные навигационные системы; обработка данных; гироскопические приборы; диагностика рельсового пути.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: rvshalymov@etu.ru

Чуряев Эдуард Дмитриевич – студент магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – вибрационный анализ; диагностика рельсового пути.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: edchuryaev@stud.etu.ru

References

1. Fedotov A. S., Fazilova Z. T. The Wagon-Detector of New Generation VD-UMT-1. Railway Track and Facilities. 2018, no. 5, pp. 19–22. (In Russ.)

2. Markov A. A., Maksimova E. A. Analysis of the Efficiency of Ultrasonic and Magnetic Channels of Flaw Detection Systems. Journals of the Izhevsk State Technical University. 2019, no. 2, pp. 22–32. doi: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32 (In Russ.)

3. Tarabrin V. F., Kislyakovskiy O. N., Chistyakova O. E., Kononov D. A. Unified Diagnostic Complex – Two Flaw Detection Systems. Railway Track and Facilities. 2022, no. 9, pp. 34–37. (In Russ.)

4. Samoylenko A. N., Krivishev I. N. The Car-Flaw Detector as a Means of Primary Control. Railway Track and Facilities. 2011, no. 1, pp. 19–20. (In Russ.)

5. Markov A. A., Shpagin D. A., Shilov M. N. Ultrasonic Multichannel Flaw Detector for Testing Rails with Signal Recording. Defectoscopy. 2003, no. 2, p. 24. (In Russ.)
6. Shilov M. N., Mosyagin V. V., Kozyakov A. B. On the Development of Removable Ultra-Sonic Flaw Detectors. Railway Track and Facilities. 2021, no. 8, pp. 14–17. (In Russ.)
7. Kanis J., Zitrický V., Hebelka V., Lukáč P., Kubín M. Innovative Diagnostics of the Railway Track Superstructure. Transportation Research Procedia. 2021, vol. 53, pp. 138–145. doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.017
8. Ng A. K., Martua L., Sun G. Dynamic Modelling and Acceleration Signal Analysis of Rail Surface Defects for Enhanced Rail Condition Monitoring and Diagnosis. 4th Intern. Conf. on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Singapore, 05–07 September 2019. IEEE, 2019, pp. 69–73. doi: 10.1109/ICITE.2019.8880246
9. Yurong Wang. Theoretical Investigation into the Measurability of Rail Unevenness and Corrugation Using the Dynamic Response of Axle Box and Bogie. Proc. IMechE. Part F: J Rail and Rapid Transit. 2020, vol. 235, iss. 3, pp. 1–11. doi: 10.1177/0954409720923213
10. Zhu Feng, Luo Kegan, Zhou Wuxing. Measuring Railway Track Irregularities at high accuracy and efficiency based on GNSS/INS/TS Integration. IEEE Sensors J. 2022, vol. 22, iss. 15, pp. 15334–15344. doi: 10.1109/JSEN.2022.3183433
11. Kiryanov M. Yu., Orlov V. V. Application of Inertial Navigation Systems for In-Line Inspection. Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 84–95. (In Russ.)
12. Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Shalymov R. V. *Inercial'nyj metod diagnostiki puti v uslovi-yah ego dinamicheskogo vzaimodejstviya s vagonom* [Inertial Method of Diagnostics of a Track in the Conditions of Its Dynamic Interaction with a Wagon]. Materials of Reports of the XIII Conf. of Young Scientists "Navigation and traffic Control". St Petersburg, 15–30 March 2011. SPb, Central Research Institute "Electropribor", 2011, pp. 357–364. (In Russ.)
13. Bolshakova A. V., Boronahin A. M., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Analysis of vibrations in a rail-car system. Instrumentation. 2022, no. 1(259), pp. 46–51. (In Russ.)
14. Zhavoronkov A. V., Korolev A. L. *Rezultaty primeneniya koeffitsientov korrelyatsii Kendalla dlya vyavleniya opredelennyh parametrov* [Results of the Application of Kendall Correlation Coefficients to Identify Certain Parameters]: Materials of the All-Russ. Scientific and Practical Conf. and the XII–XIII Dridze Readings. Moscow, 21–22 November 2013. Moscow, Institute of Sociology of the Russian Academy of Sciences, 2014, pp. 191–196. (In Russ.)
15. Phap N. V., Bolshakova A. V., Boronachin A. M., Podgornaya L. N., Shalymov R. V. Vibration Analysis of a Railcar/Rail System using Inertial Sensors Mounted on Axle Boxes. Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. Moscow, 26–28 January 2021. IEEE, 2021, pp. 1659–1662. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396332

Information about the authors

Alexandra V. Bolshakova, Master in instrumentation engineering (2019), Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: rail track diagnostics, vibration analysis, inertial navigation
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: avbolshakova@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9294-8338>

Alexander M. Boronakhin, Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020) of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Daniil Yu. Larionov, Cand. Sci. (2016) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: laronidan@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6722-9211>

Lyudmila N. Podgornaya, Cand. Sci. (2010) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 100 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation systems, data processing, gyroscopic devices, rail track diagnostics
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: lnpodgornaya@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8466-2017>

Anna N. Tkachenko, Cand. Sci. (2010) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: fiber-optic seismology, rail track diagnostics, data processing.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: antkachenko@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4706-4859>

Roman V. Shalymov, Cand. Sci. (2014) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 70 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation systems, data processing, gyroscopic devices, rail track diagnostics.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: rvshalymov@etu.ru

Eduard D. Churyaev, master student of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: vibration analysis, rail track diagnostics
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: edchuryaev@stud.etu.ru
