CC BY 4.0

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья УДК 625.143.482:620.179.14 EDN: https://elibrary.ru/nqbdla

## Автоматизация измерения стыковых зазоров рельсового пути магнитным методом

#### А.А. Марков , А.Г. Антипов, Е.А. Максимова

АО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, Российская Федерация

#### **АННОТАЦИЯ**

**Введение.** Способы автоматического измерения стыковых зазоров рельсового пути обладают недостаточной точностью измерений или предусматривают использование дорогостоящей аппаратуры и датчиков. В силу этого мониторинг стыковых зазоров до сих пор во многих случаях производится вручную. Цель работы — экспериментально исследовать новый способ автоматического измерения зазоров в болтовых стыках рельсов с помощью магнитного (MFL) метода дефектоскопии.

**Материалы и методы.** В работе использованы результаты контроля реальных путей, выполненного вагономдефектоскопом на одной из железных дорог ОАО «РЖД». Специально разработанная программа по сигналам магнитного канала выделила места болтовых стыков рельсов и определила величину стыковых зазоров. Дополнительно проведено ручное измерение стыковых зазоров по видеоизображениям болтовых стыков, полученным с бортовой системы видеорегистрации рельсов.

**Результаты.** Получены выражения для расчета величины стыкового зазора по характеристикам сигналов магнитных датчиков. Малые зазоры (до 8 мм) оцениваются по амплитудному параметру, средние и большие зазоры (более 9 мм) — по пространственному параметру сигналов от стыковых зазоров. Проведен сравнительный анализ результатов измерений зазоров двумя указанными (визуальным и магнитным) методами.

**Обсуждение и заключение.** Подтверждено, что автоматическое выделение болтовых стыков и определение величины стыковых зазоров по сигналам магнитного метода дефектоскопии рельсов можно производить с достаточной для практики достоверностью. Сравнительный анализ полученных значений по данным видеоконтроля и по сигналам магнитного метода показал высокую точность измерения стыковых зазоров при использовании последнего. Отмечена высокая стабильность и повторяемость сигналов магнитного метода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железнодорожный путь, бесстыковой путь, болтовой стык, стыковой зазор, рельсовая дефектоскопия, магнитный метод, намагничивающая система, магниточувствительные датчики

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Марков А.А., Антипов А.Г., Максимова Е.А. Автоматизация измерения стыковых зазоров рельсового пути магнитным методом // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, №2. С. 149–160.

⊠anarmarkov@gmail.com (А.А. Марков)

© Марков А. А., Антипов А. Г., Максимова Е. А., 2024





Introduction. Methods of automatic measurement of rail track joint gaps are not accurate enough or require costly equipment and sensors. This is why joint gaps are still monitored manually in many cases. The work is intended to experiment and examine a new method of automatic measurement of gaps in bolted rail joints using magnetic flaw detection (MFL). Materials and methods. The paper uses actual track inspection results obtained by a flaw detection car on one of the railroads of Russian Railways. A specially developed programme used magnetic channel signals to highlight bolted rail joint locations and determine the magnitude of the joint gaps. The joint gaps were also measured manually using video images of bolted joints obtained by the on-board rail video recording system.

**Results.** The authors obtained expressions for calculating the joint gap value using magnetic sensor signals. Small gaps (up to 8 mm) are estimated by amplitude, medium and large gaps (above 9 mm) — by the spatial parameter of the signals from joint gaps. The authors compared the gap measurements from the two specified methods: visual and magnetic.

Discussion and conclusion. The research confirmed that automatic identification of bolted joints and determination of the value of joint gaps by magnetic rail flaw detection are sufficiently reliable for practical application. A comparative analysis of the values of the video inspection and the magnetic method showed high accuracy of joint gap measurement when using the latter. The magnetic method signals show high stability and repeatability.

KEYWORDS: railway track, continuous welded rail track (CWR), bolted joint, joint gap, rail flaw detection, magnetic method, magnetising system, magnetic sensors

measurement. Russian Railway Science Journal. 2024;83(2):149-160. (In Russ.).

FOR CITATION: Markov A.A., Antipov A.G., Maksimova E.A. Magnetic method of rail track joint gaps automated

⊠ anarmarkov@gmail.com (A. A. Markov)

#### Вестник ВНИИЖТ. 2024. Т. 83. № 2. С. 149–160

#### AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

**Original** article UDK 625.143.482:620.179.14 EDN: https://elibrary.ru/ngbdla

ABSTRACT

### Magnetic method of rail track joint gaps automated measurement

#### Anatoly A. Markov, Andrey G. Antipov, Ekaterina A. Maksimova

Radioavionica JSC, St. Petersburg, Russian Federation



(CC) BY 4.0

**Введение.** Количество болтовых стыков рельсов на железных дорогах России все еще существенно превосходит количество стыков сварных.

Во избежание возникновения значительных температурных напряжений бесстыковые сварные рельсовые плети разделяются комплектами из уравнительных рельсов, состоящими из 2-4 пар рельсов с болтовыми стыками [1]. При вырезке рельса с опасным дефектом (остродефектного рельса) в сварных плетях появляются места временного восстановления рельсовые вставки с болтовыми стыками. Только на временных рубках имеется более 0,66 млн болтовых стыков. Количество мест временного восстановления за последние 20 лет выросло почти в десять раз [2], и эта тенденция пока сохраняется, несмотря на постоянное восстановление плетей сваркой. По данным Дирекции диагностики и мониторинга инфраструктуры ОАО «РЖД» на май 2024 г., на всей сети железных дорог находится 331 тыс. рубок.

Зоны стрелочных переводов, станционные звеньевые пути, изолирующие стыки также соединяются с помощью болтовых стыков с конструктивными стыковыми зазорами. Величина зазоров в болтовых стыках рельсов и их годовая динамика — важный параметр при эксплуатации и техническом обслуживании рельсового пути. Периодическое измерение стыковых зазоров является одним из способов проведения мониторинга температурной работы сварных рельсовых плетей. Это позволяет прогнозировать надежность бесстыкового пути с целью предотвращения нежелательных последствий при наступлении экстремальных и близких к ним температур.

В теплое время года неконтролируемое температурное расширение сварной рельсовой плети может привести к внезапному «выбросу» пути и к сходу подвижного состава с рельсов. Для боковой устойчивости звеньевого пути в летнее время не допускается наличие более двух подряд нулевых зазоров для рельсов длиной 25 м или более четырех нулевых зазоров для рельсов 12,5 м<sup>1</sup>. При наличии нескольких подряд нулевых зазоров движение поездов закрывают, кроме случаев, когда нулевые зазоры являются нормальными. При низких температурах воздуха для предупреждения разрыва рельсовых стыков зазоры не должны превышать 22 мм для рельсов 25 м и при диаметре болтовых отверстий 36 мм. При зазорах 24—35 мм скорость движения поездов ограничивают, а при зазорах более 35 мм движение закрывают<sup>2</sup>.

Анализ возможных способов автоматизации измерения стыковых зазоров, выполненный в [3], показывает, что известные методики и устройства, основанные на акустических, вихретоковых, оптоволоконных системах, на использовании цифровых моделей пути<sup>3</sup>, обладают недостаточной точностью измерений или предусматривают создание специальной аппаратуры и датчиков, требуя значительных материальных и временных ресурсов при обслуживании. В связи с этим мониторинг стыковых зазоров, в соответствии с действующей нормативной документацией ОАО «РЖД», до сих пор во многих случаях производят вручную [4]. Очевидно, что ручные промеры трудоемки и не лишены субъективности.

В последнее десятилетие на диагностических комплексах путеизмерений и дефектоскопии рельсового пути повсеместно устанавливают системы сплошной видеорегистрации пути на базе линейных видеокамер [5–7]. На получаемых с нескольких ракурсов изображениях рельсов возможно вручную измерять стыковые зазоры с погрешностью 1–2 мм<sup>4</sup>, однако очевидно, что это тоже трудоемкий способ мониторинга.

Специалисты прикладывают большие усилия по совершенствованию сложных программ (алгоритмов) обработки видеоизображений с бортовых камер с применением искусственного интеллекта на базе сверточных нейросетей различных архитектур [8–11]. В настоящее время программное обеспечение диагностических вагонов позволяет с большей или меньшей достоверностью автоматически распознавать различные элементы железнодорожного пути, в том числе болтовые стыки. Результаты автораспознавания зависят от качества получаемых видеоизображений. В объективы камер могут попадать снег, дождь, загрязнения. Недостаточное или чрезмерное освещение рельсов, световые блики, тени, загрязнения, наледь на поверхностях головки рельса, смятия, выкрашивания, накат металла на концах рельсов, изолирующие

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р (с изм. от 02.11.2022). URL: https://base.garant.ru/71764006 (дата обращения: 16.03.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436р (ред. от 11.09.2020, с изм. от 01.04.2021). URL: https:// www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=569108#vaaKWDUMAMquf3KA1 (дата обращения: 16.03.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Патент № 2466235 Российская Федерация, МПК Е01В 35/04, Е01В 37/00. Способ текущего содержания инфраструктуры железных дорог с использованием цифровой модели пути: № 2011105742/11: заявл. 16.02.2011: опубл. 10.11.2012 / Гельфгат А. Г., Суворов А. В., Воронков А. А. [и др.]; заявитель ОАО «РЖД». EDN: https://www.elibrary.ru/hubvbr.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Патент № 101851 Российская Федерация, МПК G02B 27/00. Устройство видеоконтроля состояния поверхности рельсов и рельсовых скреплений: № 2010125393/28: заявл. 21.06.2010: опубл. 27.01.2011 / Архангельский С. В., Розенбаум Л. Б., Козин М. П. [и др.]; заявитель НПЦ ИНФОТРАНС. EDN: https://www.elibrary.ru/wtbozy.

вставки, высокий уровень снега на пути и прочие факторы ухудшают достоверность автораспознавания стыков и точность измерения зазоров. Значительные объемы видеоинформации (на разных системах, состоящих из четырех камер, размер файлов составляет 45–165 Гбайт на 100 км пути) усложняют ее передачу<sup>5</sup> с борта диагностического вагона в стационарные центры диагностики и мониторинга инфраструктуры [12, 13].

В работе исследован вопрос использования сигналов магнитного метода дефектоскопии рельсов с целью автоматической оценки величин стыковых зазоров. Выполнен сравнительный анализ результатов измерения зазоров по данным магнитного канала и системы видеоконтроля рельсов. Данные для анализа получены от типового вагона-дефектоскопа с активной системой намагничивания в процессе проездов по реальным участкам железнодорожного пути на скоростях до 60 км/ч.

Автоматизация выделения сигналов от болтовых стыков методами неразрушающего контроля. Исследование принципиальной возможности оценки стыковых зазоров рельсов с требуемой для практики достоверностью в автоматическом режиме в широком диапазоне температур магнитным методом было выполнено в 2023 г. [3]. Магнитный метод (в зарубежной литературе — Magnetic flux leakage (MFL) method) [14] предполагает формирование в объекте контроля магнитного потока высокой плотности (до 1,2 Тл) при помощи внешних источников постоянного магнитного поля — намагничивающей системы.

Так как предполагается на скоростях движения диагностических комплексов измерять весьма малые величины (зазоры от 0 до 35 мм), то и величина магнитного поля, используемого для измерения, должна сохранять высокую стабильность даже в динамических условиях перемещения подвижной единицы. Поэтому широко известные намагничивающие системы с навесными П-образными магнитами [15] и технологическим зазором z = 8-12 мм между полюсами магнита и контролируемыми рельсами для решения поставленной задачи подходят мало. Из-за неизбежных изменений зазора z в процессе движения уровень магнитной индукции в рельсе меняется, что будет влиять на результаты измерений искомых величин.

В связи с этим в качестве системы намагничивания авторами предлагается использовать систему намагничивания рельсов с электромагнитами на осях колесных пар специальной (индукторной) тележки, расположенной в средней части вагона-дефектоскопа [16, 17]. Колеса индукторной тележки служат полюсами электромагнита, а оси колес совместно с охватывающими их соленоидами создают магнитное поле, используемое для намагничивания участков рельсов между колесами. Колеса прокатываются по контролируемым рельсам и инжектируют магнитный поток через пятно контакта колесо — рельс. Сформированный магнитный поток рассеивается на несплошностях в рельсах, в результате чего вблизи поверхности рельса образуются возмущения магнитного поля, фиксируемые индукционным датчиком или датчиками Холла.

Преимуществами такой системы является эффективное использование конструкции индукторной тележки с минимальными дополнительными элементами (только подвеска соленоидов) и отсутствие технологического зазора (z = 0) между полюсами электромагнита и поверхностью катания рельса. Этот фактор совместно со значительным (3000 мм) межполюсным расстоянием и создает условия для создания стабильного магнитного потока в рельсе в процессе скоростного сканирования.

Эффективность вышеописанной системы намагничивания доказана более чем 25-летней успешной эксплуатацией на железных дорогах вагонов-дефектоскопов с аппаратурой «АВИКОН-03», реализующих в едином комплексе ультразвуковой, визуальный (видеорегистрация) и магнитный методы неразрушающего контроля рельсов (рис. 1). Магнитный метод позволяет эффективно обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты в головке рельсов на глубине залегания до 20 мм [18].

Выявлена высокая воспроизводимость (стабильность) сигналов магнитного канала от различных конструктивных элементов рельсового пути (болтовых и сварных стыков рельсов, элементов стрелочных переводов и т.п.). Как показал анализ дефектограмм магнитного канала (поз. 1 на рис. 1), полученных в разные времена года четырьмя вагонами-дефектоскопами (№ 324, 480, 486 и 494) на участках разной специализации (от преимущественно пассажирского движения до особо грузонапряженных участков), достоверность автоматического распознавания болтовых стыков составляет не менее 95% [19]. Использование характерных признаков стыков в ультразвуковых каналах (поз. 2 на рис. 1) позволяет повысить этот показатель. Можно утверждать, что автоматическое выделение зон болтовых стыков по сигналам магнитного и ультразвукового методов можно производить с достаточной для практики достоверностью.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Регламент проведения обработки, анализа, передачи и хранения информации, полученной в результате работы систем видеоконтроля, установленных на мобильных средствах диагностики ]Электронный ресурс}: утв. ЦДИ ОАО «РЖД» от 20.12.2019 № ЦДИ-1112/р. Доступ из АСПИЖТ.



Рис. 1. Отображение сигналов магнитного метода (1), ультразвукового многоканального метода от торцов рельсов (2) и от болтовых отверстий (3), двухракурсного визуального метода изнутри колеи (4) и снаружи (5) в диагностическом комплексе неразрушающего контроля рельсов

Fig. 1. Display of signals of magnetic method (1), ultrasonic multichannel method from rail ends (2) and from bolt holes (3), two-way visual method from inside the track (4) and outside (5) in the nondestructive rail testing package

Информативные характеристики сигналов магнитного метода от болтовых стыков. В зоне болтового стыка в непосредственной близости от стыкового зазора происходит выброс распространяющегося в рельсе магнитного потока в воздух. Магниточувствительный датчик реагирует на это, формируя на дефектограмме разнополярный импульс значительной амплитуды (поз. *1* на рис. 2).

Характеристики указанного импульса (сигнала) зависят от величины стыкового зазора. Особый интерес представляют характеристики, наиболее чувствительные к изменению стыкового зазора, по которым и возможно определить его величину с максимальной точностью.

Для выбора характеристик сигнала магнитного датчика, наиболее информативных с точки зрения определения величины зазора, в работе [3] выполнено трехмерное компьютерное моделирование процесса рассеяния магнитного потока в зоне болтового стыка. Уровни магнитной индукции в рельсе были приняты равными 1,1–1,2 Тл (именно такие уровни наблюдаются при использовании реальных намагничивающих систем рельсовой дефектоскопии) [3, 16]. По результатам моделирования сделан вывод, что при малых зазорах наиболее информативной характеристикой является размах сигнала по амплитуде, а при средних и больших зазорах — расстояние между экстремумами сигнала по продольной координате (рис. 3).



Рис. 2. Фрагмент дефектограммы участка рельса длиной около 1,5 м: *I* — сигнал магнитного датчика от стыкового зазора; *2, 3* — импульсы от концов стыковых накладок; *4* — автоматически распознанная программой зона болтового стыка

Fig. 2. Fragment of the flaw diagram of a rail section about 1.5 m long: I – signal of the magnetic sensor from the bolted joint gap; 2, 3 – pulses from the ends of the plates; 4 – bolted joint zone automatically recognised by the program

Также в работе [3] изучались сигналы магниточувствительных датчиков от более чем 600 болтовых стыков с известными зазорами. На основании этих данных были получены экспериментальные зависимости размаха по амплитуде (рис. 4, *a*) и расстояния между





Fig. 3. Information parameters of the pulse from the bolted joint gap (item *I* in Fig. 2): a -amplitude range;  $\delta -$ distance between extremes



Рис. 4. Зависимости размаха по амплитуде  $r_A(a)$  и расстояния между экстремумами  $d_{\chi}(\delta)$  сигнала от величины зазора болтового стыка, полученные по данным эксперимента [3]

Fig. 4. Dependences of the amplitude range  $r_A(a)$  and the distance between the extremes  $d_X(b)$  of the signal on the size of the bolt joint gap, obtained according to experimental data [3]

экстремумами сигнала от зазора стыка (рис. 4, *б*). Наблюдаемые зависимости качественно совпали с результатами компьютерного моделирования.

Для того чтобы решить задачу определения зазора по характеристикам сигналов магнитных датчиков, необходимо математически описать зависимости, изображенные на рис. 4. Обе зависимости удобно аппроксимировать дробно-линейными функциями, у которых в числителе и знаменателе находятся полиномы степени не выше двух. Такие функции, с одной стороны, обладают достаточным количеством неопределенных коэффициентов (настраиваемых свободных параметров), позволяющих учесть качественные и количественные особенности описываемых зависимостей. С другой стороны, функции относительно просты и дают возможность сформулировать обратное отображение, что необходимо при вычислении стыковых зазоров по характеристикам магнитных импульсов.

При аппроксимации экспериментальной зависимости размаха сигнала  $r_A$  (в условных единицах сигнала АЦП) от величины стыкового зазора  $\lambda$  (в мм) предлагается использовать дробно-линейную функцию

$$r_{A}(\lambda) = \frac{a_{1}\lambda}{\lambda^{2} + a_{2}\lambda + a_{3}} = \frac{48000\lambda}{\lambda^{2} - 4\lambda + 64}.$$
 (1)

Она отражает особенности зависимости, изображенной на рис. 4, *a*, а именно: обращение в ноль при нулевом зазоре, линейный рост при зазорах, близких к нулю (линейный коэффициент определяется отношением коэффициентов  $a_1 / a_3$ ), достижение максимума размаха, равного  $a_1 / (a_2 + 2\sqrt{a_3}) = 4000$  при зазоре  $\sqrt{a_3} = 8$  мм, и дальнейшее плавное снижение при увеличении зазора.

Обратная функция, позволяющая вычислять зазор  $\lambda$  по размаху амплитуды сигнала  $r_A$ , в заданном диапазоне  $0 < r_A \leq 4000$  имеет вид

$$\lambda(r_{A}) = \frac{\left(\frac{a_{1}}{r_{A}} - a_{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{a_{1}}{r_{A}} - a_{2}\right)^{2} - 4a_{3}}}{2} = \frac{\left(\frac{48000}{r_{A}} + 4\right) - \sqrt{\left(\frac{48000}{r_{A}} + 4\right)^{2} - 4 \cdot 64}}{2}.$$
 (2)

Зависимость расстояния между экстремумами сигнала по продольной координате  $d_x$  (мм) от величины зазора  $\lambda$  (мм) (рис. 4,  $\delta$ ) имеет совершенно иной вид, нежели зависимость размаха амплитуды. Тем не менее ее также можно успешно аппроксимировать дробнолинейной функцией

$$d_{X}(\lambda) = \frac{\lambda^{2} + b_{1}\lambda + b_{2}}{\lambda + b_{3}} = \frac{\lambda^{2} + 10\lambda + 130}{\lambda + 10},$$
(3)

у которой, в отличие от (1), полином второго порядка находится в числителе, а не в знаменателе. Функция (3) отражает особенности зависимости расстояния между экстремумами сигнала от зазора, а именно: конечное значение (около  $b_2 / b_3 = 13$  мм) при нулевом зазоре, малые отклонения от постоянного уровня при малых (8 мм и менее) зазорах, постепенный рост показателя при средних зазорах и почти линейный рост при зазорах больших.

Обратная к (3) функция, позволяющая рассчитывать величину зазора  $\lambda$  по расстоянию  $d_{\chi}$  между экстремумами сигнала, выглядит следующим образом:

$$\lambda(d_{X}) = \frac{(d_{X} - b_{1}) + \sqrt{(d_{X} - b_{1})^{2} + 4(b_{3}d_{X} - b_{2})}}{2} = \frac{(d_{X} - 10) + \sqrt{(d_{X} - 10)^{2} + 4(10d_{X} - 130)}}{2}.$$
 (4)

Формулы (2), (4) в совокупности позволяют вычислить величину зазора болтового стыка по характеристикам сигнала магнитного датчика во всем диапазоне встречающихся на практике зазоров.

Предварительно по расстоянию между экстремумами  $d_x$  по выражению (4) определяется величина стыкового зазора  $\lambda$ . Если данная величина составила 8 мм и менее, то дополнительно оценивается величина размаха амплитуды сигнала  $r_A$ , а величина зазора  $\lambda$  уточняется по выражению (2).

Коэффициенты, использованные в формулах (1)—(4), могут быть откорректированы в случае, когда параметры оборудования и условия контроля значительно отличаются от тех, при которых строились экспериментальные зависимости, изображенные на рис. 4. Однако качественные особенности зависимостей носят фундаментальный характер и должны сохраняться в широком диапазоне условий, при которых осуществляется регистрация данных магнитного контроля рельсов.

В ходе исследований авторы выполнили анализ двух файлов проездов эксплуатирующегося вагонадефектоскопа с активной системой намагничивания по двум участкам пути с преимущественно пассажирским и особо грузонапряженным движением. Проезды суммарной протяженностью 260 км проводились в ноябре и апреле при температурах рельсов 0 ... + 3 °C (определены с помощью бортовых пирометров). По сигналам магнитного канала с помощью специально разработанной программы и по выражениям (2), (4) автоматически определили величины зазоров в болтовых стыках и зафиксировали эти результаты в таблице.

Методика измерений стыковых зазоров по видеоизображениям. С целью оценки погрешности измерений стыковых зазоров по данным магнитного метода выполнен анализ изображений исследуемых болтовых стыков, полученных с бортовой системы видеорегистрации пути.

Программное обеспечение вагона-дефектоскопа имеет функцию автоматического распознавания и измерения стыковых зазоров по видеоизображениям. В связи с низкой точностью автоматических измерений, величину зазоров измеряли вручную по изображениям рельсов со стороны нерабочей грани головки, устанавливая измерительный курсор (курсор мыши) посередине высоты головки (рис. 5). В дальнейшем такой способ ручной оценки стыковых зазоров по видеоизображениям принят как наиболее приемлемый при массовом анализе измерений искомой величины.

В процессе ручных измерений старались исключить искажающие факторы (световые блики на блестящих поверхностях головки рельса, косые срезы торцов, наплывы металла (козырьки), выкрашивания и смятия на концах рельсов, как на рис. 6). Указанные дефекты торцов рельсов приводят к некорректным значениям зазоров при автоматических измерениях по видеокадрам.

На двух рассматриваемых участках пути имелись стыковые зазоры во всем допустимом диапазоне: от 0 мм (слепые стыки) до 26 мм (рис. 7). Выбросы в зоне



Рис. 5. Болтовые стыки с минимальным (*a*), номинальным (*б*) и максимальным (*в*) зазором; *ε* — изолирующий стык с недопустимо большим (20 мм) зазором. Значения отображаются при наведении курсором мыши на кадрах

Fig. 5. Bolted joints with minimum (a), nominal ( $\delta$ ) and maximum (s) gap; c – insulating joint with an unacceptably large (20 mm) gap. Values are displayed when the mouse cursor hovers over the frames



Рис. 6. Стыки с нарушениями: наплыв металла и косой срез торцов рельсов (*a*), выкрашивание поверхности катания (б), смятия концов рельсов (*b*)

Fig. 6. Joints with defects: metal influx and oblique cut of the ends of the rails (*a*), discoloration of the rolling surface ( $\delta$ ), crumpling of the ends of the rails ( $\theta$ )

8–9 мм вызваны наличием изолирующих стыков. Некоторый сдвиг величин зазоров в сторону средних и малых значений объясняется проведением измерений при температурах рельсов 0 ... +3 °C.

Результаты сравнительного анализа. Величины стыковых зазоров, измеренные вручную по видеоизображениям (приняты за эталонные значения), сравнили с автоматически определенными зазорами по сигналам магнитного канала (в одну таблицу сведены значения по 544 болтовым стыкам). Преобладающее количество (87%) измерений стыковых зазоров совпадают в пределах отклонения  $\pm 2$  мм. В то же время встречаются стыки, где магнитный канал показал значения, отличающиеся от измерений на кадрах на 3–6 мм. При детальном анализе таких отклонений было замечено, что в этих стыках часто имелись повреждения на концах рельсов (как на рис. 6), что привело к искажениям автоматических измерений.

Изменение скорости вагона-дефектоскопа (в пределах 20–60 км/ч), разная специализация и грузонапряженность на двух рассматриваемых участках пути не оказали влияния на точность измерений зазоров по магнитному каналу.

Как и ожидалось, амплитудный параметр при оценке малых величин зазоров (8 мм и менее) дает несколько большие отклонения: 80% автоматически определенных значений (рис. 8, *a*) имеют отклонения в пределах  $\pm 2$  мм от величин, определенных по видеоизображениям. Для средних и больших зазоров (9 мм и более) измерения по магнитному методу с пространственным параметром дают лучшие результаты: 91% стыков в пределах отклонений  $\pm 2$  мм (рис. 8,  $\delta$ ).



Fig. 7. Distribution of the values of the joint gaps on the considered sections of the railway track

Несмотря на измерение искомых величин методами, основанными на разных физических принципах (визуальный и магнитный), большинство полученных значений (в среднем почти 90%) практически идентичны. Эти методы, реализованные на вагонах-дефектоскопах, при измерении стыковых зазоров могут быть как взаимодополняемыми, так и взаимозаменяемыми.

Известно, что визуальный метод, несмотря на интуитивно понятное представление информации, требует специальной аппаратуры, корректной настройки оборудования и периодического технического обслуживания с соблюдением регламента. Кроме того, автоматизация процесса измерений требует программной обработки с применением сложных алгоритмов или искусственного интеллекта на основе нейронных сетей. Несмотря на выполнение этих условий нередко можно получить результаты, существенно отличающиеся от истинных значений искомой величины. Зависимость от погодных условий, ложные срабатывания на контрастных тенях и возможные пропуски на стыках с загрязнениями и изолирующими вставками требуют участия оператора (ручных промеров стыков) при анализе видеоизображений и формировании ведомости болтовых стыков с аномальными (слепыми или сверхнормативными) зазорами.

Магнитный метод в основном лишен этих недостатков, но, как отмечено выше, требует создания достаточно мощного магнитного потока в рельсе. Редко (не более 4,0%) можно наблюдать ложное срабатывание метода на алюминотермитных сварных стыках в накладках, но из-за значительных величин измеряемых параметров (более предельных значений) эти показания можно программно исключить из протокола. Учет сигналов ультразвуковых каналов также позволяет идентифицировать объекты, вызывающие получение ложных



Рис. 8. Отклонения величины стыковых зазоров, определенных по магнитному методу и по видеокадрам для: a — малых (8 мм и менее);  $\delta$  — средних и больших зазоров (9 мм и более)

Fig. 8. Deviations in the size of the joint gaps determined by the magnetic method and by video frames for: a - small (8 mm or less);  $\delta - \text{medium}$  and large gaps (9 mm or more)

значений. Поэтому для измерения стыковых зазоров рассмотренным способом<sup>6</sup> целесообразно использовать уже широко апробированные вагоны-дефектоскопы с активной системой намагничивания и электромагнитами на осях колесных пар [3, 6, 16, 19, 20].

К внедрению способа измерения стыковых зазоров магнитным методом. Процедура оценки величин стыковых зазоров в процессе рабочего проезда вагонадефектоскопа по сигналам магнитного метода включает следующие этапы:

1. Регистрация дефектограмм с координатной привязкой к контролируемому пути и определением температуры рельсов.

2. Автоматическое выделение сигналов от болтовых стыков.

3. Определение расстояния *d<sub>x</sub>* между экстремумами сигнала от стыкового зазора.

4. Оценка величины зазора λ по выражению (4).

5. Корректировка величины зазора  $\lambda$  по размаху амплитуд сигнала от стыкового зазора  $r_A$  и выражению (2) для величины  $\lambda = 8,0$  мм и менее, предварительно определенной по п. 4.

6. Формирование базы данных по этапам 4 и 5.

7. Обработка базы с целью выявления критических величин зазоров по действующим нормам содержания пути.

8. Формирование телеграммы по выявленным в п. 7 координатам болтовых стыков для принятия безотлагательных мер по обеспечению безопасности движения поездов.

9. Формирование пакета данных и запись в базу Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой (ЕК АСУИ) ОАО «РЖД» после завершения рабочего проезда.

Работоспособность процедур по пп. 1 и 2 подтверждена опытом многолетней эксплуатации более 10 вагонов-дефектоскопов с аппаратурой «АВИКОН-03» на сети дорог ОАО «РЖД». Этапы 3–6 выполняются программой в соответствии с вышеописанной методикой. Этапы 7–9 могут быть реализованы в кратчайшие сроки путем создания соответствующих программ. На начальном этапе внедрения способа при выполнении п. 8 возможна дополнительная операция по сопоставлению величин критических зазоров, полученных магнитным методом и ручными измерениями по видеоизображениям.

Обсуждение и заключение. Исследования показали, что измерения стыковых зазоров, выполненные с помощью магнитного метода, не зависят от климатических условий, не требуют дополнительного оборудования и могут быть автоматически обработаны непосредственно в момент проезда (в реальном масштабе времени) вагона-дефектоскопа с формированием протокола и передачей данных в ЕК АСУИ или в Систему комплексной диагностики и мониторинга железнодорожной инфраструктуры ОАО «РЖД» (СДМИ).

Высокая повторяемость и относительная простота обработки низкочастотного (не более 10 кГц) сигнала магнитного метода позволяет автоматизировать следующие процедуры:

• оперативное обнаружение стыковых зазоров с критическими значениями;

 определение двух и более подряд стыков с нулевыми зазорами;

• определение сумм зазоров в уравнительных звеньях;

• оценку зазоров вблизи изолирующего стыка;

• мониторинг состояния болтовых стыков при регулярной диагностике.

Показанная возможность оценки магнитным (MFL) методом стыковых зазоров в процессе скоростного сканирования является ценной, но не единственной дополнительной функцией систем диагностики с электромагнитами на осях колесных пар. Кроме основной функции — обнаружение дефектов в головке рельсов на глубине до 20 мм, системы намагничивания с нулевым технологическим зазором между катящимися по рельсу полюсами электромагнита и поверхностью контролируемого рельса позволяют:

• оценивать положение шпал (эпюр) и их нарушения;

• определять координаты и длины рельсов (рубок) в местах временного восстановления плети;

• обнаруживать сварные стыки и появление в них дефектов;

 автоматизировать процесс мониторинга продольно-напряженного состояния рельсовых плетей (при установке ферромагнитных меток в зоне маячных шпал);

• сформировать топограмму с указанием координат болтовых и сварных стыков, стрелочных переводов и других объектов рельсового пути.

По результатам работы следует заключить следующее:

1. Экспериментально доказана возможность оценки величины зазоров болтовых стыков магнитным методом. Программа обработки в качестве информативного параметра использует расстояние между экстремумами и размах амплитуды сигнала от стыкового зазора. Около 90% измерений стыковых зазоров по

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Патент № 2793171 Российская Федерация, МПК В61К 9/08, В61К 9/10, G01N 27/83. Способ оценки стыковых зазоров рельсов железнодорожного пути: № 2022131896: заявл. 06.12.2022: опубл. 29.03.2023 / Антипов А. Г., Марков А.А., Максимова Е.А. 13 с. URL: https:// www.elibrary.ru/abvcco.

данным магнитного метода и показаниям видеоконтроля совпадают в пределах отклонения ±2 мм.

2. Как показали предварительные исследования, имеется принципиальная возможность размещения оборудования MFL-метода на вагонах регулярных поездов при скоростях движения 120 км/ч и более, что является перспективой для диагностики пути на участках высокоскоростного движения в любых погодных условиях.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Вериго М.Ф. Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути. М.: Интекст, 2000. 184 с.

Verigo M. F. New methods in the establishment of standards for the device and maintenance of a seamless trac. Moscow: Intext Publ.; 2000. 184 p. (In Russ).

2. Карпущенко Н. И., Ардышев И. К. Новые проблемы содержания бесстыкового пути на особогрузонапряженных участках // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1 (64). С. 5–14. https://doi.org/10.52170/1815-9265\_2023\_64\_5.

Karpuschenko N.I., Ardyshev I.K. New problems of continuously welded rail track maintenance in high traffic areas. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(1):5-14. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265\_2023\_64\_5.

3. Антипов А. Г., Марков А. А., Максимова Е. А. Использование магнитного метода контроля для оценки зазоров в болтовых стыках рельсового пути // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 11–25. https://doi. org/10.52170/1815-9265 2023 64 5.

Antipov A. G., Markov A. A., Maksimova E. A. Using a magnetic flux leakage method to estimate railway track bolted joint gaps. *Defektoskopiya*. 2023;(6):11-25. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265\_2023\_64\_5.

4. Стоянович Г. М., Пупатенко В. В. Температурные деформации в зоне уравнительных пролетов бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 6. С. 34—37. EDN: https://www.elibrary.ru/ ncpqla.

Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V. Temperature deformations in the balance rails zone of the continuously welded rails. *Railway Track and Facilities*. 2019;(6):34-37. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/ncpqla.

5. Шилов М. Н., Алексеев Д. В., Третьяков А. А. Средства и технологии автоматизированной системы видеоконтроля объектов инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 9. С. 11–12. EDN: https://www.elibrary.ru/gmhxoc.

Shilov M. N., Alekseev D. V., Tretyakov A. A. Tools and technologies of the automated system of video control of infrastructure facilities. *Railway Track and Facilities*. 2021;(9):11-12. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/gmhxoc.

6. Xiong L., Jing G., Wang J., Liu X., Zhang Y. Detection of Rail Defects Using NDT Methods. *Sensors*. 2023;23(10):4627. https://doi. org/10.3390/s23104627.

7. Yilmazer M., Karakose M., Aydin I. Detection and Measurement of Railway Expansion Gap with Image Processing. In: *Proceedings of* 2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry. Conference Paper, 25–26 October 2021, Sakheer. Sakheer: IEEE; 2021. p. 515–519. https://doi.org/10.1109/ICDABI53623.2021.9655906.

8. Gibert X., Patel V. M., Chellappa R. Robust Fastener Detection for Autonomous Visual Railway Track Inspection. In: *Proceedings of 2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. Conference*  *Paper, 5–9 January 2015, Hawaii.* Hawaii: IEEE; 2015. p. 694–701. https://doi.org/10.1109/WACV.2015.98.

9. James A., Jie W., Xulei Y., Ye C., Ngan N. B., Yuxin L., et al. TrackNet – A Deep Learning Based Fault Detection for Railway Track Inspection. In: *Proceedings of 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, *12–14 December 2018, Singapore*. Singapore: IEEE; 2018. p. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641608.

10. Wang T., Yang F., Tsui K-L. Real-Time Detection of Railway Track Component via One-Stage Deep Learning Networks. *Sensors*. 2020;20(15):4325. https://doi.org/10.3390/s20154325.

11. Автоматический поиск рельсовых стыков с использованием методов обработки / Ю.А. Сухобок [и др.] // Актуальные теоретикометодологические и прикладные проблемы виртуальной реальности и искусственного интеллекта: материалы Междунар. науч. конф., Хабаровск, 27–28 мая 2021 г. Хабаровск: Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2021. С. 56–63. EDN: https://elibrary.ru/aekrdh.

Sukhobok Yu.A., Ten E.E., Ponomarchuk Yu.V., Shoberg K.A. Railway gap detection based on image processing and deep learning techniques. In: *Actual theoretical, methodological and applied problems of virtual reality and artificial intelligence, 27–28 May 2021, Khabarovsk.* Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2021. p. 56–63 (In Russ). EDN: https://elibrary.ru/aekrdh.

12. Гуров Е.А. Расшифровка данных видеоконтроля пути на Забайкальской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 8. С. 36–37. https://elibrary.ru/zivybk.

Gurov E.A. Zabaykalskaya track video monitoring data decoding. *Railway Track and Facilities*. 2021;(8):36-37. (In Russ.). https://elibrary.ru/zivybk.

13. Тарабрин В. Ф., Юрченко Е. В., Лохач А. В. ЕК АСУИ СДМИ — цифровая платформа для предиктивного анализа и управления состоянием железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 6. С. 25–28. https://elibrary.ru/oiflcu.

Tarabrin V. F., Yurchenko E. V., Lokhach A. V. EC ASUI SDMI – digital platform for predictive analysis and management of the state of railway infrastructure. *Railway Track and Facilities*. 2022;(6):25-28. (In Russ.). https://elibrary.ru/oiflcu.

14. Шур Е.А. Энциклопедия знаний о дефектах рельсов: рецензия на книгу К.-О Эделя., Г. Будницкого, Т. Шнитцера «Дефекты рельсов. Напряжения и повреждения». Том 1 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 3. С. 182–185. https:// doi. org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-182-185.

Shur E.A. Best practices about rail defects: a review of the book "Defects of rails. Stresses and Damages", Vol. 1 by K.-O. Edel, G. Budnitskiy, T. Schnitzer. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(3):182-185 (In Russ.). https://doi. org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-182-185.

15. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / А.К. Гурвич [и др.]. М.: Транспорт, 1983. 318 с.

Gurvich A. K., Dovnar B. P., Kozlov V. B., Krug G. A., Kuzmina L. I., Matveev A. N. *Non-destructive testing of rails during their operation and repair*. Moscow: Transport Publ.; 1983. 318 p. (In Russ.).

16. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03 / А.А. Марков [и др.] // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 3 (61). С. 74–79. https:// elibrary.ru/rtemhp.

Markov A.A., Politay P.G., Makhovikov S.P, Alekseev D.V., Kuznetsova E.A. The complex analysis of rail track condition with new AVIKON-03M flaw detector car. *NDT World Review*. 2013;(3):74-79. (In Russ.). https://elibrary.ru/rtemhp.

17. Antipov A. G., Markov A. A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. *NDT & E International*. 2018;(98):177-185. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.04.011.

18. Марков А.А., Антипов А.Г., Карелин М.В. Оценка достоверности автоматического распознавания сигналов от конструктивных элементов рельсового пути // Контроль. Диагностика. 2018. № 3. С. 16–27. https://doi.org/10.14489/td.2018.03.pp.016-027.

# Markov A. A., Antipov A. G., Karelin M. V. Reliability of automated recognition of mfl signals from rail track structure elements. *Kontrol'*. *Diagnostika*. 2018;(3):16-27. (In Russ.). https://doi.org/10.14489/td.2018.03.pp.016-027.

19. Марков А.А., Антипов А.Г. Магнитная дефектоскопия рельсов. Новые возможности. [Б. м.]: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 112 с.

Markov A.A., Antipov A.G. *Magnet rail flaw detection. New Opportunities.* [S. 1.]: LAP Lambert Academic Publishing; 2018. 112 p. (In Russ.).

20. Магнитный метод для оценки состояния бесстыкового пути / А. А. Марков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 2. С. 4–7. EDN: https://elibrary.ru/abfsfr.

Markov A.A., Antipov A.G., Karelin M.V., Maksimova E.A. Magnetic method to assess the condition of a jointless railway track. *Railway Track and Facilities*. 2024;(2):4-7. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/abfsfr.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Анатолий Аркадиевич МАРКОВ,

. . . . . . . . . . . . . .

д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального конструктора по развитию методов и средств неразрушающего контроля, АО «Радиоавионика» (190005, г. Санкт-Петербург, Троицкий пр., д. 4Б), Author ID: 378197, https://orcid.org/0000-0002-9090-3232

#### Андрей Геннадьевич АНТИПОВ,

канд. физ.-мат наук, старший научный сотрудник, научноисследовательская лаборатория неразрушающего контроля, АО «Радиоавионика» (190005, г. Санкт-Петербург, Троицкий пр., д. 4Б), Author ID: 128330

#### Екатерина Алексеевна МАКСИМОВА,

начальник лаборатории, научно-исследовательская лаборатория неразрушающего контроля, АО «Радиоавионика» (190005, г. Санкт-Петербург, Троицкий пр., д. 4Б), Author ID: 1038960

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

#### Anatoly A. MARKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy General Designer for the Development of Non-Destructive Testing Tools and Methods, Radioavionica JSC (190005, St. Petersburg, 4B, Troitskiy Ave.), Author ID: 378197, https://orcid.org/0000-0002-9090-3232

#### Andrey G. ANTIPOV,

Cand. Sci (Phys. and Math.), Senior Researcher, Non-Destructive Testing Research Laboratory, Radioavionica JSC (190005, St. Petersburg, 4B, Troitskiy Ave.), Author ID: 128330

#### Ekaterina A. MAKSIMOVA,

Head of the Non-Destructive Testing Research Laboratory, Radioavionica JSC (190005, St. Petersburg, 4B, Troitskiy Ave.), Author ID: 1038960

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Аркадиевич МАРКОВ. Постановка задач, обзор и анализ состояния вопроса, выводы (34%).

Андрей Геннадьевич АНТИПОВ. Получение выражений для расчета величин стыковых зазоров, разработка программ выделения сигналов от стыков и оценки зазоров (33%).

**Екатерина Алексеевна МАКСИМОВА.** Сбор и обработка экспериментального материала, сравнительный анализ (33%).

#### **CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**Anatoly A. MARKOV.** Setting tasks, reviewing and analysing the status of the issue, conclusions (34%).

**Andrey G. ANTIPOV.** Obtaining expressions for calculating the values of joint gaps, developing programmes for isolating signals from joints and evaluating gaps (33%).

**Ekaterina A. MAKSIMOVA.** Compilation and processing of experimental material, comparative analysis (33%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 09.04.2024, рецензия от второго рецензента получена 16.04.2024, рецензия от третьего рецензента получена 06.05.2024, принята к публикации 14.05.2024.

The article was submitted 29.03.2024, first review received 09.04.2024, second review received 16.04.2024, third review received 06.05.2024, accepted for publication 14.05.2024.

#### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

#### ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.