



20. Lakin I.K., Abolmasov A.A., Mel'nikov V.A. Primenenie statisticheskikh metodov pri diagnostirovaniy tpeplovozov [The use of statistical methods for the diagnosis of diesel locomotives]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 1(21). P. 20.
21. Mel'nikov V.A. Ispol'zovanie korrelyatsionnogo analiza pri diagnostirovaniy tpeplovozov 2TE116U [The use of correlation analysis in the diagnosis of 2TE116U diesel locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Materialy shestoi mezdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the sixth international scientific-practical conference]*. Irkutsk, 2015. Pp. 343–349.
22. Lakin I.K., Abolmasov A.A., Mel'nikov V.A. Primenenie statisticheskikh metodov pri diagnostirovaniy tpeplovozov [Application of statistical methods for the diagnosis of diesel locomotives]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2015. No. 1(21). Pp. 20–28.
23. Subbotin R. N., Abolmasov A.A., Mel'nikov V.A. Analiz narabotki na neplanovyi remont tpeplovozov 2TE116 [Analysis of operating time for unplanned repair of diesel locomotives 2TE116]. *Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov. Materialy vtoroi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Moscow: OOO Lokomotivnye tekhnologii Publ., 2015. Pp. 297–308.
24. Lakin I.K., Plyaskin A.K., Mel'nikov V.A., Dmitriev S.A. Sovershenstvovat' tekhnologiyu reostatnykh ispytanii tpeplovozov [Improve the technology of rheostatic tests of diesel locomotives]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2016. No. 5. Pp. 38–42.

Информация об авторах

Аболмасов Алексей Александрович – к. т. н., директор Департамента мониторинга технического состояния локомотивов и микропроцессорных систем ИЦ ООО «ЛокоТех». e-mail: a.a.abolmasov@tmh-service.ru.

Лисин Денис Олегович – генеральный директор ООО «Клевер Групп». e-mail: lisin.denis@clover.global.

Мельников Виктор Александрович – старший эксперт ООО «Клевер Групп», e-mail: melnikov.viktor@clover.global.

Authors

Aleksei Aleksandrovich Abolmasov – Ph.D. in Engineering Science, Director of Locomotive technical state monitoring and MCU department of EC of “LocoTech” OOO. e-mail: a.a.abolmasov@tmh-service.ru.

Denis Olegovich Lisin – Chief Executive Officer of “Clover Group” OOO. e-mail: lisin.denis@clover.global.

Viktor Aleksandrovich Mel'nikov – Senior Expert of “Clover Group” OOO. e-mail: melnikov.viktor@clover.global.

Для цитирования

Аболмасов А. А. Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления. А. А. Аболмасов, Д. О. Лисин, В. А. Мельников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 69–75. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69–75

Abolmasov A. A., Lisin D. O., Mel'nikov V. A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya elektricheskikh mashin lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya [Improving the methods of diagnosing electric machines of locomotives according to the data of microprocessor control systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 69–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69–75

УДК 6-65-654.654.9:654.92:654.922

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).75–81

Н. Н. Климов, А. А. Ермаков, Д. Ю. Померанцев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: 04 июня 2019 г.

РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ НА БЕССТЫКОВОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ

Аннотация. Проблема диагностики напряженного состояния бесстыкового пути существующая в настоящее время не обеспечивает контроль в реальном времени. Это приводит к выбросам пути, и в дальнейшем сходу поездов. В статье предлагается использовать для диагностики напряженного состояния бесстыкового пути изделие «Прочность», которое разработано группой сотрудников Томского политехнического института. Этот прибор позволяет определять спектр собственных колебаний бесстыкового пути, которые возникают в форме продольных, поперечных и изгибных волн рельсов, с целью определения их напряженного состояния. В работе приводятся формулы для различных типов волн и оценены их величины для бесстыкового пути в свободном состоянии. При измерениях частоты и скорости волн на бесстыковом пути зарегистрированы частоты в диапазоне от 300 до 5 500 Гц, а скорости от 719 до 3 300 м/с. Это указывает на возбуждение в рельсовом плете при боковом ударе поперечных и изгибных волн. Использование этого прибора возможно после проведения более детальных исследований напряженного состояния бесстыкового пути в условиях его растяжения, сжатия и при кувлевых напряжениях набора видов спектра, которые будут изменяться в зависимости от реальных напряжений. При предположении, что выброс обусловлен возникающей изгибной волной с продолжительностью выброса порядка 0,2 с. и размерах полуволны выброса порядка 40 м, это дает частоту 5 Гц, длину волны 80 м и, соответственно, скорость 400 м/с. Сравнение с оценкой скорости для данной частоты по формуле для изгибных волн дает величину порядка 100 м/с. Такая существенная разница демонстрирует, что теоретическое описание процесса выброса для реальных условий требует дополнительных исследований и измерений характеристик, определяющих механические свойства балластной призмы, рельсов, взаимодействия шпальной решетки с балластом.

Ключевые слова: напряженное состояние рельса, бесстыковый путь, скорости волн, диагностика, регистрация изгибных волн.



N. N. Klimov, A. A. Ermakov, D. Y. Pomerantsev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: June 04, 2019

DEVELOPMENT OF THE ACOUSTIC METHOD FOR DETERMINING THE STRESS STATE OF RAILS ON THE CONTINUOUS WELDED TRACK

Abstract. The problem of diagnosing the stress state of the continuous welded track, which currently exists, does not provide real-time monitoring. This leads to the track buckling that result in to the train derailments. In this paper it is proposed to use a «Durability» device which was developed by a group of employees of the Tomsk Polytechnic Institute to diagnose the stress state of the continuous welded track. This device allows determining the spectrum of natural oscillations of the continuous track that arise in the form of longitudinal, transverse and flexural rail waves in order to determine their stress state. This work provides formulas for various types of waves and estimations of their values for a continuous welded track in a free state. The frequencies in the range from 300 Hz to 5500 Hz and velocities from 719 m/s to 3300 m/s were recorded when measuring the frequency and velocity of waves on a continuous welded track. This indicates excitation in the rail bar with a side impact of transverse and flexural waves. The use of this device is possible after a more detailed study of the stress state of the continuous welded track under the conditions of its stretching, compression and zero voltages of a set of spectrum types, which will vary depending on the real stresses. Assuming that the buckling occurs due to a flexural wave with a buckling duration of about 0.2 sec and a buckling half-wave size of about 40 m, this gives a frequency of 5 Hz, a wavelength of 80 m and, accordingly, a speed of 400 m/s. Comparison with the speed estimate for a given frequency using the formula for flexural waves (4) results in a value of about 100 m/s. Such a significant difference demonstrates that the theoretical description of the buckling process for real conditions requires additional studies and measurements of the characteristics that determine the mechanical properties of the ballast prism, rails, and the interaction of the sleeper with the ballast.

Keywords: the stress state of the rail, continuous welded track, the speed of longitudinal, transverse and flexural waves, diagnostics by registering flexural waves.

Введение

По данным, представленным О. А. Сусловым в докторской диссертации, на железных дорогах России около 73 % от общей протяженности дорог путь является бесстыковым. Это составляет 91 тыс. км длины главных путей ОАО «РЖД».

В настоящее время отсутствует непрерывная диагностика его текущего состояния, особенно в части, связанной с вариациями его температуры. Это приводит к отказам, которые обусловлены потерей устойчивости пути из-за сжатия. Случаи потери устойчивости за 2003–2016 гг. составляют порядка 10 в год (из них 2,4 случая привели к сходу) [1].

Для оперативного контроля напряженного состояния бесстыкового железнодорожного пути используются несколько различных методов. Наиболее часто применяемым способом является определение по смещению меток на рельсах относительно таковых на шпалах, которые не прикреплены к рельсам [2]. С целью повышения надежности совместными усилиями научных учреждений Российской академии наук и железнодорожного транспорта было предложено использовать тензодатчики. Показания этих тензодатчиков в реальном времени обрабатывались микропроцессорами и передавались по радиоканалу в центр сбора данных [3]. Также имеется ультразвуковой прибор, разработанный в Нижнем Новгороде, который по высокоточным измерениям скорости распространения акустических

колебаний позволяет определять напряженное состояние изделий [4]. В Иркутском государственном университете путей сообщения в 2010–2012 гг был проведен цикл акустических измерений на пятнадцатикилометровом бесстыковом участке пути между станциями Гончарово и Большой Луг по определению спектра и скорости изгибных волн, возникающих в рельсах при ударе [5, 6]. В результате получены обнадеживающие результаты [6], однако ввиду отсутствия финансирования эти работы были прекращены.

Теоретические оценки скоростей различных типов волн в рельсах

Причиной выбросов бесстыкового пути являются напряжения, возникающие во время его сжатия за счет температурного расширения. В начале XVIII в. академиком Л. Эйлером была получена формула, позволяющая определить величину напряжения, при которой происходит выброс. Для шарнирно опретого стержня, сжатого по концам, с помощью формулы Эйлера определяются формы выброса в виде полуволны синусоиды (рис. 1):

$$P_s = \frac{\pi^2 EI_{min}}{l^2}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; I_{min} – минимальный главный центральный момент инерции поперечного сечения стержня (для рельса потеря устойчивости происходит относительно вертикальной оси в плоскости наименьшей изгибной жесткости); l – длина стержня [8].



Рис. 1. Выброс пути

Примечание. Фото взято из источника Railway track buckle – YouTube youtube.com. [7].

Для бесстыкового пути величина давления, даваемая формулой Эйлера, является сугубо ориентировочной. Условия выброса определяются такими факторами, как качество крепления рельсов к шпалам, сопротивление балластной призмы, выполнение технических условий укладки пути [1]. Существующие методы контроля напряженного состояния бесстыкового пути в полной мере не обеспечивают решение этой задачи [1]. Предлагается использовать акустический метод контроля в модификации, излагаемой далее.

Для этой цели может применяться прибор «Прочность», который, как полагают его разработчики, сотрудники Томского политехнического университета, измеряет при ударе о железобетонные конструкции низкочастотное электромагнитное излучение [9–15]. Исследования, которые были проведены совместно с разработчиками прибора показали, что конструкция прибора реализована таким образом, что измеряются механические колебания контролируемого изделия в диапазоне звуковых частот, воспринимаемых человеком [16]. Оказалось, что полученная авторами эмпирическая зависимость между прочностью бетона и наблюдаемым спектром хорошо определяет прочность строительных конструкций и мостовых сооружений [13–15].

Приемная антенна прибора работает как конденсаторный микрофон, который регистрирует механические колебания контролируемого образца и биения, определяемые механическими свойствами механической системы прибора [16]. Амплитуда и спектр регистрируемых колебаний изделия в диапазоне звуковых частот определяет его прочность [9].

Такие свойства регистратора «Прочность», дают возможность, на наш взгляд, попытаться с его помощью разработать систему диагностики напряженного состояния рельсов на бесстыковом железнодорожном пути регистрацией акустического отклика на ударное воздействие.

Как следует из теории и измерений при ударе в металлическом стержне, каковым является рельс, возникают продольные, поперечные, изгибные и поверхностные волны (волны Релея) [17]. Скорость продольных волн определяется выражением:

$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\sigma)}{\rho \cdot (1+\sigma)(1-2\sigma)}}. \quad (2)$$

Величина скорости поперечных волн равна:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2(1+\sigma)}}. \quad (3)$$



Для изгибных волн зависимость скорости более сложная, она зависит от частоты. Для случая, когда бесконечно длинный стержень, имеющий радиус момента площади сечения i (для рельса типа Р65 эта величина составляет 6,5 см и 2,6 см относительно горизонтальной и вертикальных осей соответственно), скорость изгибной волны записывается выражением (3) [11]:

$$c_b = \frac{4\pi \cdot i}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2\sqrt{\pi \cdot i \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4)$$

Поверхностные волны (волны Релея) имеют скорость, которая определяется по формуле

$$c_0 = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

В формулах σ – коэффициент Пуассона поперечного сжатия, изменяющийся в зависимости от материала в пределах 0–0,5, для стали его величина колеблется от 0,25 до 0,35 [12]; μ – постоянная Ламе, т. е. модуль сдвига, который определяется как

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)},$$

где E – модуль Юнга (для стали $1,9\text{--}2,2 \cdot 10^{11}$ Па); ρ – плотность (для стали порядка $7\,800$ кг/м³).

Тогда для стали с величиной модуля Юнга $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона $\sigma = 0,28$ величины продольных скоростей составят 5 170 м/с, поперечных – 3 230 м/с, поверхностных волн Релея 2 970 м/с. Скорость же изгибных волн будет зависеть от возникающей частоты f . Для 1 кГц эта величина составит, соответственно, относительно горизонтальной оси 3 656 м/с и 2 312 м/с вертикальной оси.

Экспериментальные измерения скоростей и спектров, наблюдаемые при ударе

Для обоснования возможности проведения замеров с помощью регистратора «Прочность» ниже приводятся результаты измерений. Исследования проводились 16 мая 2009 г. на рельсовой

плети на станции Иркутск-Пассажирский на отрезках из 25-метровых рельсов типа Р65 и бесстыковом пути (рис. 2) [6].

Для приема и измерения параметров звуковых волн в низкочастотном диапазоне использовались стандартные пьезоэлектрические преобразователи двух типов от ультразвукового дефектоскопа УД2-12 [6]. Первый тип преобразователей – прямой (для регистрации поперечных волн), второй – наклонный с переключаемыми углами ввода 50° и 65° (оба угла больше первого критического значения волн ультразвукового диапазона, т. е. чувствительный к продольным и поперечным волнам ($\theta = \arcsin c_{tp} / c_\phi$)).

Показаны осциллограммы регистрируемых колебаний и их спектры, полученные во время эксперимента при ударе молотком массой 1,3 кг на расстоянии 1 м от первого датчика для рельса (рис. 3), для бесстыковой плети (рис. 4). Удар сбоку по головке рельса, датчики также сбоку.

Начало измерений в 7 ч. 40 мин. Температура +6–7 °С. При измерениях на рельсах длиной 25 м расстояние между датчиками 1 м; на бесстыковом участке 100 м от начала бесстыкового пути датчики сбоку, удар сбоку, расстояние между датчиками 1,05 м.

Как следует из представленных данных (табл.), характеристики по диапазону регистрируемых частот прибора «Прочность» укладываются в спектр частот, возбуждаемых при ударе в рельсовой плети. Диапазон регистрируемых скоростей указывает на возбуждение при боковом ударе поперечных и изгибных волн.

Следует отметить, что хотя при ударной нагрузке на железнодорожный путь генерируется набор всех типов волн [18] в соответствии с выражениями (2)–(5), при ненагруженном пути регистрируются большей частью изгибные волны (табл.), которые могут быть хорошим индикатором напряженного состояния бесстыкового пути.

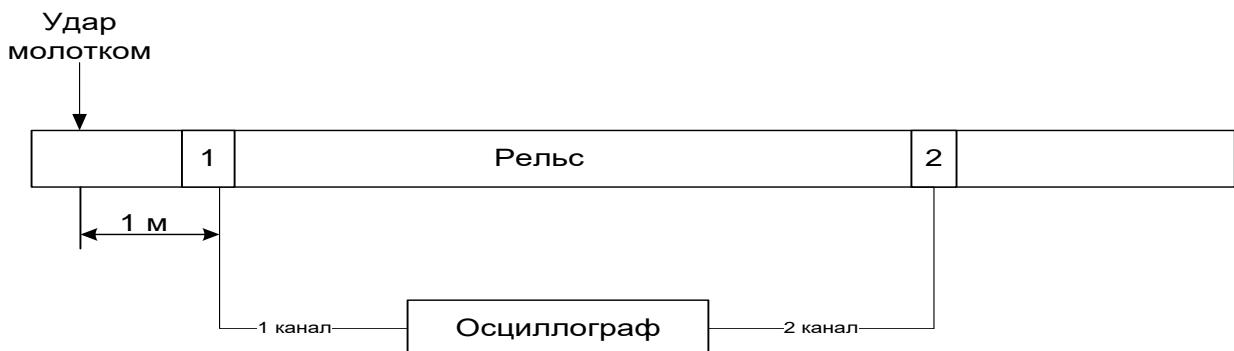


Рис. 2. Схема эксперимента, где 1, 2 – пьезоэлектрические датчики

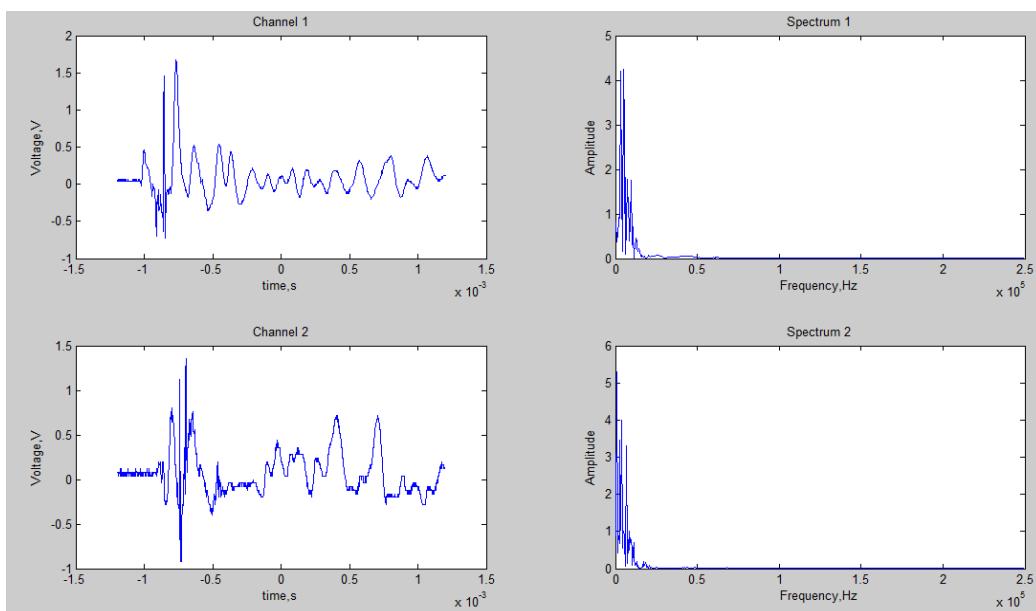


Рис. 3. Наблюдаемые сигналы на датчиках и их спектры (основная частота 4 583 Гц, время задержки 1,472 м/с, скорость 679 м/с)

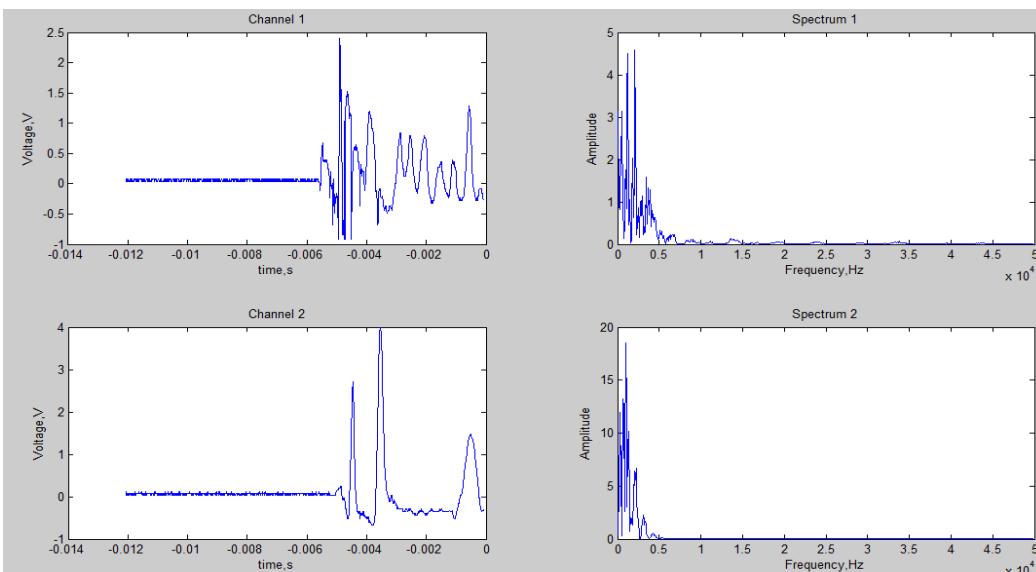


Рис. 4. Измерения на бесстыковом пути

Таблица

Наблюдаемые частоты, их временные задержки и скорости, определенные с помощью взаимокорреляционной функции по рассматриваемой методике

Частота (Гц)	Задержка / скорость (м/с)
333	1,17 / 855
416	1,01 / 990
833	0,41 / 2 440
916	0,38 / 2 631
1 116	0,34 / 2 941
1 416	0,34 / 2 941
1 999	0,33 / 3 300
2 666	2,97 / 334
3 166	1,38 / 725
5 499	1,39 / 719

Как следует из данных наблюдений [1], время выброса составляет порядка 0,2 с., длина выброса порядка 40 м. Если предположить, что выброс обусловлен изгибной волной (4) (см. рис. 1), то частота будет равна 5 Гц, длина волны 80 м и, соответственно, скорость 400 м/с. Сравнение с оценкой скорости для данной частоты по формуле для изгибных волн (4) дает величину порядка 100 м/с. Такая существенная разница демонстрирует, что теоретическое описание процесса выброса для реальных условий требует дополнительных исследований и измерений характеристик, определяющих механические свойства балластной призмы,



рельсов, взаимодействия шпальной решетки с балластом.

Заключение

Таким образом, наблюдаемый спектр частот при калиброванном ударе, выполняемом при помощи молотка Шмидта, приводит к генерации перечисленных типов волн, спектр которых будет определяться степенью напряжения рельсовой

плети и степенью ее взаимодействия с балластной призмой и шпальной решеткой. Теоретические оценки величин напряженности, при которых происходит выброс пути, могут дать только качественную картину. Для разработки реальных оценок необходимо провести цикл работ по регистрации спектров при различной напряженности бесстыкового пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути : автореф. ... д-ра техн. наук. М., 2017. 48 с.
2. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. МПС РФ, департамент пути и сооружений. М. : Транспорт, 2000.
3. Пат. 0002656777 Рос. Федерация. Способ контроля бесстыкового железнодорожного пути / А.В. Сисюк. № 2017114064 ; заявл. 21.04.2017 ; опубл. 06.06.2018, Бюл. № 16.
4. Ультразвуковые системы для измерения механических напряжений ИН-5101А / ООО «ИНКОТЕК». URL: <http://www.inkotek.ru/node/25>. (Дата обращения 22.06.2019).
5. О возможности акустической диагностики напряженного состояния бесстыкового пути / Н.Н. Климов, В.М. Бардаков С.В. Дудаков и др. // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог : тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск : Изд-во ИрГУПС. 2010. Т. 1. С. 341–354.
6. Разработка алгоритма оптимизации обработки данных акустической диагностики напряжённого состояния бесстыкового железнодорожного пути / Н.Н. Климов, Д.А. Зубкова, С.М. Куценко и др. // Современные проблемы радиоэлектроники и связи : материалы X и X1 Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2012. С. 155–160.
7. Railway track buckle [Электронный ресурс] // YouTube. URL: youtube.com (Дата обращения 22.06.2019).
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов : учеб. для вузов. М. : Наука, 2000. 512 с.
9. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов / В.Ф. Гордеев, Ю.П. Малышков, В.Л. Чахлов и др. // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 76–80.
10. Электромагнитные эмиссии бетонов при ударном нагружении / В.Л. Чахлов, Ю.П. Малышков, В.Ф. Гордеев и др. // Изв. ВУЗов. Сер.: Строительство. 1995. № 5-6. С. 54–57.
11. А.с. 1375984 СССР, МКИ 4 G 01 N 3/00. Способ неразрушающего контроля прочности изделий / В.Ф. Гордеев, А.А. Цой, Ю.П. Малышков и др. ; Томск. политехн. ин-т. № 4001564 /25-28; Заявл. 03.01.86; Опубл. 23.02.1988, Бюл. 7.
12. А.с. 1415116 СССР, МКИ 4 G 01 N 3/00. Способ неразрушающего контроля прочности изделий / Малышков Ю.П., Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. и др.; Томск. политехн. ин-т. - № 4181154 /25-28 ; Заявл. 12.01.87 ; Опубл. 08.07.1988, Бюл. 29.
13. А.с. 1590959 СССР, МКИ 5 G 01 N7/82. Способ неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий / Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Майер Г.Р. и др. ; Томск. политехн. ин-т. № 3701251/ 31-63; 3707348/31-63 ; Заявл. 07.03.84; Бюл. изобр. 1990, № 33.
14. Источники электромагнитной эмиссии в бетонах / В.Ф. Фурса, В.Ф. Гордеев, В.В. Ласуков и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 21. С.1–5.
15. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении / Гордеев В.Ф.. Малышков Ю.П., Чахлов В.Л. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 4. С.57–67.
16. Об электромагнитной эмиссии образцов горных пород и бетона / В.М. Бардаков, В.Ф. Гордеев, С.В. Дудаков и др. // Современные проблемы радиоэлектроники и связи : материалы VI межвуз. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. С. 61–66.
17. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике, из-во иностранной литературы. М. : Изд-во Иностр. лит. 1956. 726 с.
18. О возможности акустической диагностики напряженного состояния плетей бесстыкового пути / В.М. Бардаков, С.В. Дудаков, Н.Н. Климов и др. // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Т. 1. Иркутск : ИрГУПС. 2010. С. 341–354.

REFERENCES

1. Suslov O.A. Funktsional'naya bezopasnost' ekspluatatsii besstykovogo puti. Avtoreferat na soiskanie uchenyi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Functional safety of continuous welded track operation. Abstract for the degree of D. Sci. (Engineering)]. Moscow, 2017. 48 p.
2. Tekhnicheskie ukazaniya po ustroistvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti. MPS RF, departament puti i sooruzhenii [Technical instructions for the installation, installation, maintenance and repair of the continuous welded track. Ministry of Railways of the Russian Federation, Department of Railways and Structures]. Moscow, Transport Publ., 2000.
3. Sisyuk A. V. Sposob kontrolya besstykovogo zheleznodorozhnogo puti [A method of monitoring a continuous railway track]. CDIP: 09.06.2018, No.218.016.5f3a. Type of IP: invention. Title of protection is No. 0002656777. The date of the title of protection is 06.06.2018.
4. Ul'trazvukovye sistemy dlya izmereniya mekhanicheskikh napryazhenii IN-5101A. Developer and manufacturer is INKOTEK OOO [Ultrasonic systems for measuring mechanical stress IN-5101A. Developer and manufacturer is INKOTEK OOO].
5. Klimov N.N., V.Bardakov V.M., Dudakov S.V., Lopatin M.V. et al. O vozmozhnosti akusticheskoi diagnostiki napryazhennogo sostoyaniya besstykovogo puti [On the possibility of acoustic diagnostics of the stressed state of a continuous welded track]. Problemy i perspektivy izyskanii, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznykh dorog: trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi kon-



ferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Problems and Prospects for Research, Design, Construction and Operation of Railways: Proceedings of IV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2010. Vol. 1. Pp. 341–354.

6. Klimov N.N. Zubkova D.A., Kutsenko S.M., Dudakov S.V. Razrabotka algoritma optimizatsii obrabotki dannykh akusticheskoi diagnostiki napryazhennogo sostoyaniya besstykovogo zheleznodorozhnoy puti [Development of an algorithm for optimizing the processing of data for acoustic diagnostics of the stress state of a continuous welded track]. *Sb. Sovremennye problemy radioelektroniki i svyazi. Materialy X i XI Vserossiiskikh nauchno-tehnicheskikh konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (g. Irkutsk, 17 maya 2012 g.)* [Coll. Modern problems of radio electronics and communications. Materials of X and XI All-Russian scientific and technical conferences of students, graduate students and young scientists. (Irkutsk, May 17, 2012)]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2012. Pp. 155–160.
7. Railway track buckle. YouTube [Electronic medium]. URL: <https://www.youtube.com>
8. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov: Ucheb. dlya vuzov [Resistance of materials: A textbook for universities]. Moscow: Nauka Publ., 2000. 512 p.
9. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Chakhlov V.L. et al. Elektromagnitnyi emissionnyi kontrol' prochnosti betonov [Electromagnetic emission control of concrete strength]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1992. No. 7. Pp. 76–80.
10. Chakhlov V.L., Malyshkov Yu.P., Gordeev V.F. et al. Elektromagnitnye emissii betonov pri udarnom nagruzhenii [Electromagnetic emissions of concrete under shock loading]. *Izv. VUZov «Stroitel'stvo»* [Proceedings of Universities "Construction"], 1995. No. 5–6. Pp. 54–57.
11. Gordeev V.F., Tsoi A.A., Malyshkov Yu.P., Leonov A.N. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya prochnosti izdelii* [Method of non-destructive testing of product strength]. Author's certificate 1375984 SSSR, MKI 4 G 01 N 3/00.; Tomsk politechn. un-ty. N 4001564 /25-28; applied 03.01.86; publ. in B.I., 1988, N 7.
12. Malyshkov Yu.P., Fursa T.V., Gordeev V.F. et al. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya prochnosti izdelii* [Method of non-destructive testing of product strength]. Author's certificate 1415116 SSSR, MKI 4 G 01 N 3/00.; Tomsk. politechn. un-ty. N 4181154 /25-28; applied 12.01.87; applied in B.I., 1988, N 29.
13. Malyshkov Yu.P., Gordeev V.F., Maier G.R. et al. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoistv izdelii* [Method of non-destructive testing of physical and mechanical properties of products]. A.s. 1590959 SSSR, MKI 5 G 01 N7/82. Tomsk. politechn. un-ty. N 3701251/ 31-63; 3707348/31-63; applied 07.03.84; publ. in B.I., 1990, N 33
14. Fursa V.F. Gordeev V.F., Lasukov V.V., Malyshkov Yu.P. Istochniki elektromagnitnoi emissii v betonakh [Sources of electromagnetic emission in concrete]. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the JETP], 1994. Vol. 20, Issue 21. Pp. 1–5.
15. Gordeev V.F., Malyshkov Yu.P., Chakhlov V.L. et al. Elektromagnitnaya emissiya dielektricheskikh materialov pri staticheskem i dinamicheskem nagruzhenii [Electromagnetic emission of dielectric materials under static and dynamic loading]. *ZhTF* [JETP], 1994. Vol. 64, Issue 4. Pp. 57–67. Bibl.: 15.
16. Bardakov V.M., Gordeev V.F., Dudakov S.V., Klimov N.N., Kutsenko S.M., Muratov V.I. Ob elektromagnitnoi emissii obraztsov gornykh porod i betona [About electromagnetic emission of rock and concrete samples]. *Sovremennye problemy radioelektroniki i svyazi. Materialy VI mezhvuzovskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. 3 maya 2007 g* [Modern problems of radio electronics and communication. Materials of VI interuniversity scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. May 3, 2007]. IrGTU Publ., 2007, Pp. 61–66.
17. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primenenie v nauke i tekhnike [Ultrasound and its application in science and technology]. Ch. 5. Moscow: Iz-vo inostrannoi literatury Publ., 1956.
18. Bardakov V.M., Dudakov S.V., N.N. Klimov, M. V. Lopatin et al. *Problemy i perspektivy izyskanii, proektirovaniya, stroitel'stva i eksploatatsii zheleznnykh dorog: trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Problems and prospects of research, design, construction and operation of railways: proceedings of IV All-Russian scientific-practical conference with international participation]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2010. Vol. 1. Pp. 341–354.

Информация об авторах

Климов Николай Николаевич – д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: klinn42@mail.ru

Ермаков Андрей Александрович – аспирант кафедры автоматики, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: andreuermac1994@mail.ru

Померанцев Даниил Юрьевич – аспирант кафедры автоматики, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: smoger9@mail.ru

Для цитирования

Климов Н. Н. Разработка акустического метода определения напряженного состояния рельсов на бесстыковом железнодорожном пути / Н. Н. Климов, А. А. Ермаков, Д. Ю. Померанцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 75–81. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).75–81

Authors

Nikolay Nikolaevich Klimov – d. F. Sci., Professor, Professor of the Department Automation, Remote Control and Communication, Irkutsk State University of Communications, Irkutsk, e-mail: klinn42@mail.ru

Andrei Aleksandrovich Ermakov – Postgraduate Student, Department of Automation, Remote Control and Communication, Irkutsk State University of Communications, Irkutsk, e-mail: andreuermac1994@mail.ru

Daniil Yuryevich Pomerantsev – Postgraduate Student, Department of Automation, Remote Control and Communication, Irkutsk State University of Communications, Irkutsk, e-mail: smoger9@mail.ru

For citation

Klimov N. N., Ermakov A. A., Pomerantsev D. Yu. Razrabotka akusticheskogo metoda opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya rel'sov na besstykovom zheleznodorozhnom puti. [Development of an acoustic method for determining the stress state of rails on a continuous railway trac]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 75–81. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).75–81