

УДК 625.171:625.143.482

Анализ факторов, влияющих на точность результатов метода определения температурных напряжений плетей бесстыкового пути при помощи частот собственных колебаний

Б. И. Ходак, В. П. Бельтюков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ходак Б. И., Бельтюков В. П. Анализ факторов, влияющих на точность результатов метода определения температурных напряжений плетей бесстыкового пути при помощи частот собственных колебаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 975–983. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-975-983

Аннотация

Цель: Исследование факторов, оказывающих существенное влияние на точность определения температурных напряжений в плетях бесстыкового железнодорожного пути при использовании метода анализа частот собственных колебаний. Совершенствование метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути при помощи частот форм собственных колебаний рельсов. **Методы:** В работе проведен анализ математической модели, определяющей частоту собственных колебаний рельсов. Исследована степень погрешности измерения частоты колебаний, обусловленная усилием воздействия на рельс и расположением датчиков, регистрирующих частоты собственных колебаний. Для оценки вклада каждого фактора были использованы методы математического моделирования и численные методы анализа. **Результаты:** Выявлены факторы, вносящие вклад в погрешность определения температурных напряжений. Определены факторы, влияющие на точность результатов измерения частот форм собственных колебаний. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволят разработать более точные и надежные методы мониторинга температурных напряжений в бесстыковом пути, а также могут быть использованы для совершенствования метода определения частот форм собственных колебаний для диагностики температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути.

Ключевые слова: Путевое хозяйство, железнодорожный путь, бесстыковой путь, температурно-напряженное состояние, контроль напряжений.

Введение

Бесстыковой путь является ответственной конструкцией, нарушение регламента его эксплуатации влияет на безопасность движения поездов. При несоблюдении температурного режима содержания бесстыкового пути могут произойти такие нарушения, как выброс пути при повышенных температурах или разрыв рельсовой нити при пониженных температурах, что может послужить причиной схода подвижного состава и привести к значительным затратам на ликвидацию

последствий. Для предотвращения этих явлений бесстыковой путь должен закрепляться при определенных температурах рельсов.

В процессе эксплуатации в плетях бесстыкового пути напряжения могут изменяться в силу различных факторов, таких как угон пути, производство путевых работ и по другим причинам. Поэтому важно знать не только температуру плети при укладке, но и температуру, при которой в плети отсутствуют температурные напряжения. Эта температура на большинстве дорог

мира называется «нейтральная температура», а в нормативной документации ОАО «РЖД» — «фактическая температура закрепления». Для ее определения надо знать фактические напряжения в рельсовых плетях.

Инструкцией [1] предусмотрены следующие меры контроля температурного режима работы бесстыкового пути: фиксация температур закрепления плети при их укладке в путь или фиксация расчетной величины температуры закрепления при вводе плетей в температурный режим принудительным методом (нагревом, натяжением), контроль сдвига плетей на маячных шпалах или створах, контроль за усилием прижатия рельсов к основанию, визуальный контроль наличия угона по внешним признакам.

Также в ОАО «РЖД» используется комплексный анализ предотказного состояния бесстыкового пути, в ходе которого определяется вероятность выброса пути на основании косвенных признаков.

С точки зрения оперативного контроля наибольший интерес представляет измерение температурных напряжений в плети, так как они могут вызвать выброс пути при превышении допустимых значений.

Напряжения в рельсовых плетях определяются по формуле:

$$\sigma = \alpha E (t_n - t_p), \quad (1)$$

где α — коэффициент расширения рельсовой стали;

E — модуль упругости рельсовой стали;

t_p — температура рельса в момент измерений;

t_n — нейтральная температура рельса, при которой температурные напряжения в рельсе равны нулю.

Зная напряжения в рельсах, нейтральную температуру можно вывести из формулы (1):

$$t_n = t_p + \frac{\sigma_t}{\alpha E}, \quad (2)$$

где σ_t — температурные напряжения в рельсе.

Существуют следующие методы оценки напряжений [2–6] по различным параметрам: рентгеновский метод, магнитоупругий метод, поляризационно-оптический метод, метод хрупких покрытий, электромагнитные и другие методы. Все они не получили широкого применения ввиду существенных недостатков, следовательно, до сих пор существует необходимость исследований с целью разработки нового метода определения напряжений, который будет отвечать современным требованиям, иметь низкую стоимость в эксплуатации и обладать высокой точностью результатов.

Для определения температурных напряжений предлагается использовать метод определения частот форм собственных колебаний упругих объектов, при этом в качестве упругого объекта принимается рельс.

Физический смысл форм колебаний заключается в том, что любая система может совершать свободные колебания только определенными способами, которые зависят от ее физических свойств, в том числе от механических напряжений [7–9]. При возбуждении системы (например, ударе или толчке) она начинает колебаться в соответствии с этими естественными формами с определенной частотой.

Суть метода состоит в том, что на рельс подается звуковой сигнал переменной частоты с постоянной амплитудой. Так как собственные частоты форм колебаний менее подвержены затуханию, то после прохождения звуковой волны через рельс они будут иметь более высокую амплитуду. Прошедшая через рельс звуковая волна записывается и анализируется, по результатам анализа выделяются точные частоты форм колебаний рельса.

Для практического решения задачи определения фактических температурных напряжений в рельсе необходимо изучить факторы, влияющие на точность измерений частот собственных колебаний рельса.

В ходе исследования рассмотрены следующие аспекты:

- влияние амплитуды звукового сигнала, который подается на рельс;
- влияние взаимного расположения источника звукового сигнала и датчика, фиксирующего пропущенную через рельс звуковую волну.

Результаты анализа позволят разработать рекомендации по оптимизации метода контроля температурных напряжений. Для проведения исследования были проведены моделирование и экспериментальная проверка модели.

Описание методики исследования

Для исследования степени влияния процесса измерения на точность результатов был произведен ряд экспериментов с рельсом температурного стенда (рис. 1). Стенд состоит из двух железобетонных шпал с плотно зафиксированными на них рельсами длиной 2 м.

В процессе измерений на рельс температурного стенда устанавливаются вибродинамик и пьезозвукосниматель (рис. 2) [10].

При помощи вибродинамика на рельс подается звуковой сигнал переменной частоты с постоянной амплитудой; прошедшая через рельс звуковая волна записывается при помощи пьезозвукоснимателя. Полученная запись анализируется в блоке обработки информации с применением преобразования Фурье. В результате выводится функция зависимости громкости (амплитуды) (dB) по оси Y от частоты сигнала (Hz) по оси X . Пример результата вычислений представлен на рис. 3: график отображает исходный сигнал, записанный напрямую с вибродинамика без прохождения через рельс при помощи пьезозвукос-

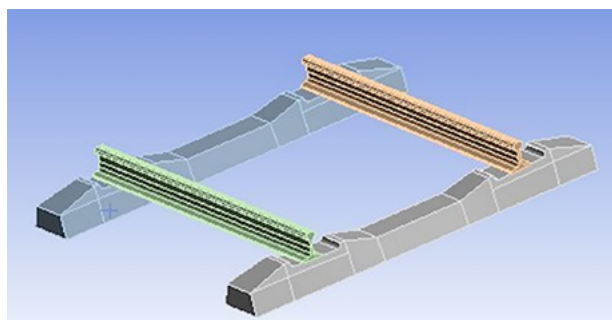


Рис. 1. Модель температурного стенда

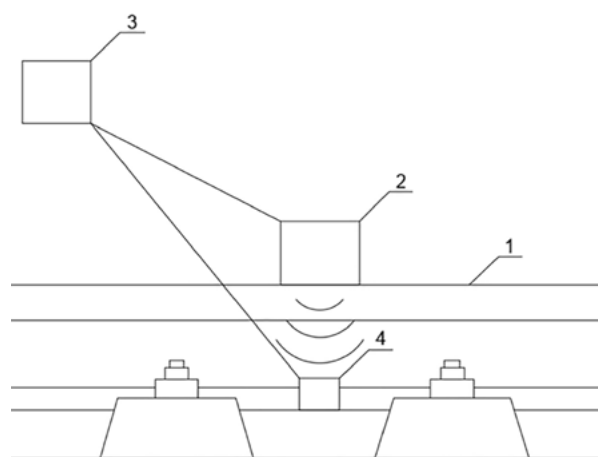


Рис. 2. Схема закрепления оборудования на рельсе температурного стенда:
1 — рельсовая плетть; 2 — вибродинамик;
3 — блок обработки информации;
4 — пьезозвукосниматель

нимателя, с целью проверки точности оборудования и анализа искажений воспроизводимого сигнала.

Физический смысл отрицательных децибел на графике заключается в том, что значения меньше 0 дБ показывают, насколько текущий уровень громкости сигнала ниже максимального. Так как полученный график представляет из себя горизонтальную линию с незначительными отклонениями, можно сделать вывод о том, что исходный сигнал воспроизводится вибродинамиком практически без искажений.

Для проверки результатов натурных исследований и подтверждения корректной работы устройства был произведен расчет частот форм

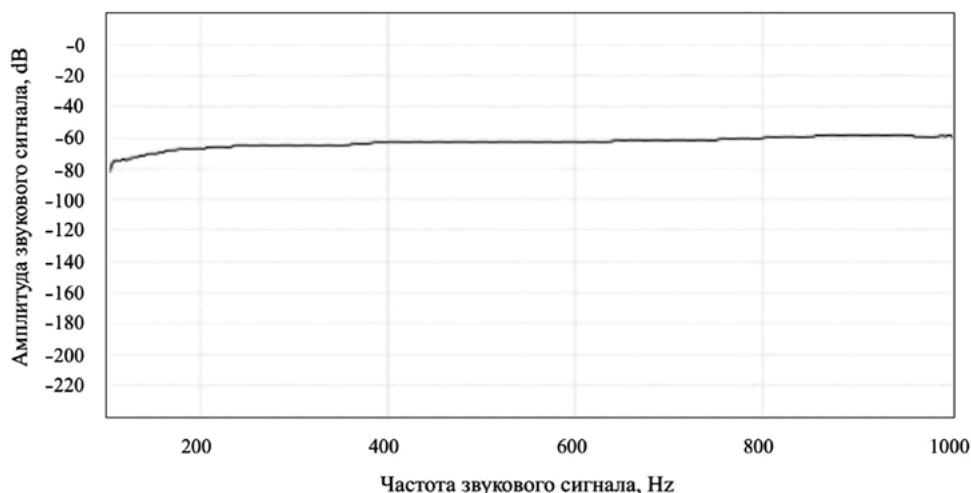


Рис. 3. Результаты записи исходного сигнала, подаваемого с вибродинамика на пьезозвукосниматель

Таблица 1. Результаты программного расчета частот форм собственных колебаний рельсов температурного стенда

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, Hz
1	159,17
2	288,23
3	301,5
4	353,86
5	554,51

Таблица 2. Значения частот форм собственных колебаний, полученных при помощи вибродинамика и звукоснимателя

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, Hz
1	158,97
2	282,31
3	Значение не определено, так как спектр собственных частот в этом интервале не имеет четко выраженного пика
4	
5	

собственных колебаний рельсов температурного стенда в программном комплексе ANSYS, его результаты представлены в табл. 1.

Натурные эксперименты

Целью экспериментов является установление степени влияния различных факторов на точность результатов измерений.

На первом этапе для проверки точности измерений был проведен эксперимент с рельсами температурного стенда, описанный ранее, результаты представлены на рис. 4 и в табл. 2.

Так как при моделировании и расчете в программном комплексе устанавливаются идеальные условия, расчетные значения и значения, полученные при помощи натурных измерений, могут различаться. Также по графику не представляется возможным определение третьей, четвертой и пятой форм коле-

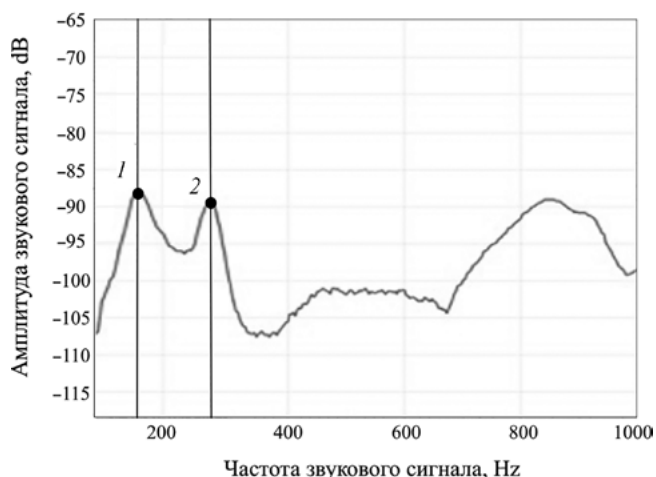


Рис. 4. Запись частот форм собственных колебаний, полученных при помощи вибродинамика и звукоснимателя:
1 — 1-я форма колебаний 159,87 Hz;
2 — 2-я форма колебаний 282,31 Hz

баний, поэтому в дальнейшем будут исследоваться только первая и вторая формы колебаний рельса.

Для проверки адекватности полученных данных совместно с записью частот собственных колебаний при помощи устройства была произведена запись единичного воздействия на рельс ударом. С физической точки зрения во время удара происходит воздействие на рельс всем спектром частот, более длительное время затухания будут иметь резонансные частоты, совпадающие с частотами собственных колебаний рельса, следовательно, таким образом возможно проверить подлинность значений, полученных при помощи разработанного устройства. Результаты эксперимента представлены на рис. 5 и в табл. 3.

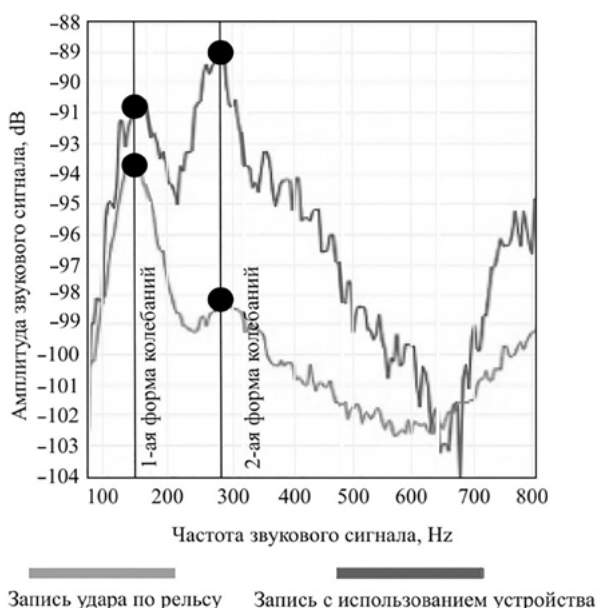


Рис. 5. Запись удара по рельсу и запись частот, полученных при помощи устройства

Таблица 3. Значения частот форм собственных колебаний, полученных в результате удара по рельсу, и запись частот, полученных при помощи устройства

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, полученная при помощи устройства, Hz	Частота формы колебаний, полученная при помощи записи удара по рельсу, Hz
1	158,97	158,67
2	282,31	283,23

Поскольку результаты, полученные с помощью разработанного устройства, минимально расходятся с данными, зафиксированными при записи затухающих колебаний рельсов температурного стенда, можно заключить, что способ определения частот собственных форм колебаний обладает достаточно высокой точностью и позволяет определять частоты собственных колебаний рельса.

На следующем этапе измерений был произведен замер различных уровней громкости сигнала, подаваемого с динамика на рельс, результаты представлены на рис. 6 и в табл. 4.

По результатам анализа частот форм собственных колебаний, полученных в ходе эксперимента, можно сделать вывод о том, что громкость исходного сигнала не влияет на результат измерения.

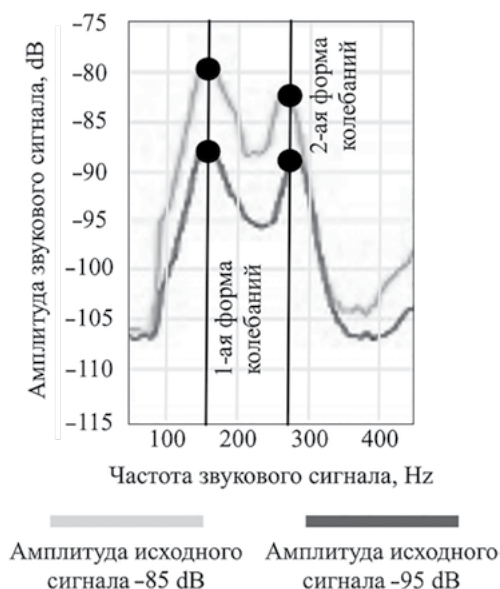


Рис. 6. Замер различных уровней громкости сигнала

Таблица 4. Значения частот форм собственных колебаний при различных уровнях громкости сигнала

№ формы колебаний рельса	Амплитуда исходного сигнала, -85 dB	Амплитуда исходного сигнала, -95 dB
1	158,34 Hz	158,37 Hz
2	282,11 Hz	282,93 Hz

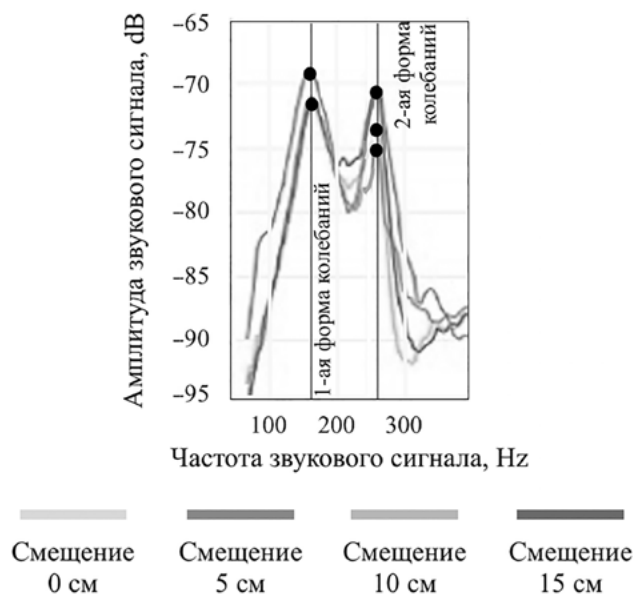


Рис. 7. Частоты собственных колебаний в зависимости от положения динамика в продольном направлении рельса

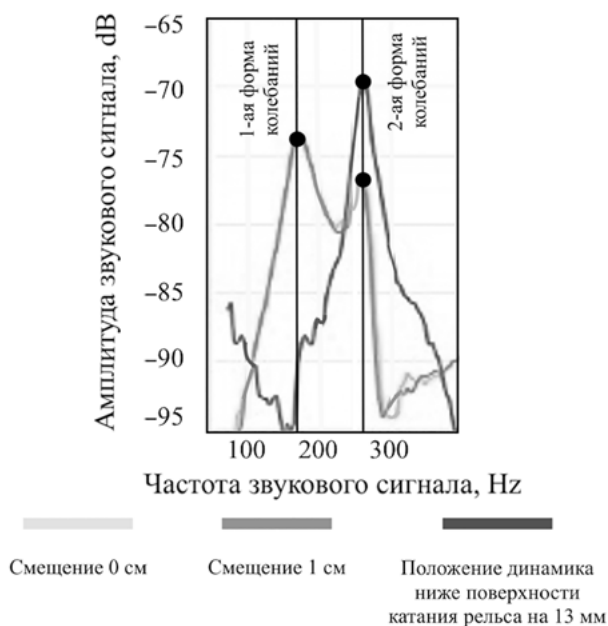


Рис. 8. Частоты собственных колебаний в зависимости от положения динамика в поперечном направлении рельса

Далее был проведен анализ влияния расположения динамика относительно пьезозвукоснимателя. Во время первого эксперимента динамик передвигали вдоль рельса и через каждые 5 сантиметров проводился замер, первое измерение соответствует положению динамика соосно над пьезозвукоснимателем, следующее на расстоянии 5 см от оси пьезозвукоснимателя, затем через 10 см, последнее измерение соответствует смещению оси вибродинамика относительно оси пьезозвукоснимателя на 15 см. Результаты измерений представлены на рис. 7 и в табл. 5.

Во время второго эксперимента динамик передвигался в поперечном направлении относительно рельса на 1 см при каждом измерении, первому измерению соответствует соосное расположение вибродинамика и пьезозвукоснимателя, следующий замер в 1 см от предыдущего, последнее измерение, выполненное на 13 мм ниже поверхности катания. Результаты эксперимента представлен на рис. 8 и в табл. 6.

Проанализировав результаты, полученные в ходе экспериментов, можно сделать вывод о том, что амплитуда исходящего с динамика сигнала не влияет на точность измерений. Изменение во взаимном соосном расположении вибродинамика и пьезозвукоснимателя вызывает существенное изменение амплитуды сигнала, записанного на пьезозвукосниматель после прохождения через рельс, но практически не влияет на точность результатов измерений. Несмотря на незначительные изменения частот форм колебаний, вторая форма сильнее зависит от точности соосного расположения оборудования: разброс

Таблица 5. Значения частот форм собственных колебаний в зависимости от положения динамика в продольном направлении рельса

№ формы колебаний рельса	Смещение 0 см	Смещение 5 см	Смещение 10 см	Смещение 15 см
1	158,24 Hz	158,27 Hz	157,94 Hz	157,98 Hz
2	282,11 Hz	283,03 Hz	281,95 Hz	283,11 Hz

Таблица 6. Значения частот форм собственных колебаний в зависимости от положения динамика в поперечном направлении рельса

№ формы колебаний рельса	Смещение 0 см	Смещение 1 см	Положение динамика ниже поверхности катания рельса на 13 мм
1	158,24 Hz	158,27 Hz	Значение не определено, так как спектр собственных частот в этом интервале не имеет четко выраженного пика
2	282,11 Hz	281,03 Hz	281,95 Hz

результатов измерений составляет около 1 %, тогда как для первой формы колебания изменения не превышают 0,1 %. Кроме того, первая форма колебаний хорошо различима на всех графиках как первый экстремум. Поэтому для дальнейших исследований приоритетна первая форма колебаний, а вторая может служить для дополнительной проверки измерений.

Заключение

Результаты измерений показали, что расположение звукоснимателя относительно динамика оказывает несущественное влияние на частоты собственных колебаний. При этом степень влияния на разные формы колебаний неодинакова. В перспективе необходимо изучить влияние геометрии рельса (вертикальный и горизонтальный износы, длина) и схемы его закрепления на частоты форм собственных колебаний. Предложенный метод демонстрирует высокую точность и перспективен для определения механических напряжений в плетях бесстыкового пути.

Список источников

- Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р).
- Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
- Потапов А. И. Магнитомеханические методы контроля механических свойств ферромагнитных материалов / А. И. Потапов и др. // Дефектоскопия. — 2022. — № 6. — С. 3–24.
- Рычков Д. А. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов конструкций методом фотоупругости / Д. А. Рычков и др. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2016. — № 3(41). — С. 97–107.
- Лобанов Л. М. Метод хрупких тензочувствительных покрытий для определения деформаций и напряжений в элементах конструкций / Л. М. Лобанов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 5. — С. 26–30.
- Методы акустического контроля металлов / под ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
- Тюшев А. Н. Курс лекций по физике. Ч. 3. Колебания и волны. Волновая оптика: учеб. пособие / А. Н. Тюшев, Л. Д. Дикусар. 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: СГГА, 2011. — 194 с.
- Касаткин Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Техника, 1981. — 415 с.
- Буркин С. П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.
- Патент РФ № 286273. Пьезоэлектрический звукосниматель / Б. В. Гладков.

Дата поступления: 29.09.2025

Решение о публикации: 22.10.2025

Контактная информация:

ХОДАК Борис Игоревич — аспирант;
borisl20799@inbox.ru

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук,
проф. кафедры «Железнодорожный путь»;
beltukov@pgups.ru

Analysis of factors influencing the accuracy of the results of the method for Analysis of Factors Influencing the Accuracy of Thermal Stress Measurement in Continuous Welded Rails Using Natural Oscillation Frequencies

B. I. Khodak, V. P. Beltiukov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Khodak B. I., Beltiukov V. P. Analysis of Factors Influencing the Accuracy of Thermal Stress Measurement in Continuous Welded Rails Using Natural Oscillation Frequencies // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 975–983. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-975-983

Summary

Purpose: To study the factors that significantly affect the accuracy of thermal stress measurement in continuous welded rails of a railway track through the analysis of natural oscillation frequencies. To improve the method for assessing temperature stresses in track rail sections by using the frequencies of the rail's natural oscillation modes. **Methods:** The research analyses the mathematical model that defines the natural oscillation frequency of rails. The influence of rail temperature on the variations in the rail natural oscillation frequencies have been analyzed. To examine the measurement errors of these frequencies, which are attributed to the forces acting on the rail and the positioning of the sensors that capture the natural oscillation frequencies. Mathematical modelling and numerical analysis techniques were used to determine the impact of each contributing factor. **Results:** The factors contributing to errors in the assessment of temperature stresses have been identified. The factors influencing the accuracy of measuring the natural oscillation frequencies have been established. **Practical significance:** The findings of this research will facilitate the development of more precise and reliable methods for monitoring temperature stresses in continuously welded tracks. Additionally, the results of the study can enhance the method for identifying the natural vibration frequencies for diagnosing temperature stresses in continuous welded track rails.

Keywords: Track facilities, railway track, continuous welded track, temperature-stress state, stress control.

References

1. *Instruktsiya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti (utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 № 2544r)* [Instructions for the Installation, Laying, Maintenance, and Repair of Continuous Welded Track (approved by Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 № 2544r)]. (In Russian)
2. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. T. 3: Ul'trazvukovoy kontrol'* [Non-destructive testing: handbook in 7 vols. Vol. 3: Ultrasonic testing]. Ed. by V. V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004, 864 p. (In Russian)
3. Potapov A. I. et al. Magnitomekhanicheskie metody kontrolya mekhanicheskikh svoystv ferromagnitnykh materialov [Magnetomechanical methods for testing mechanical properties of ferromagnetic materials]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 2022, Iss. 6, pp. 3–24. (In Russian)
4. Rychkov D. A. et al. Eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsiy metodom fotouprugosti [Experimental study of stress-strain state of structural elements using photoelasticity method]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of Tomsk State

University. Mathematics and Mechanics]. 2016, Iss. 3(41), pp. 97–107. (In Russian)

5. Lobanov L. M. et al. Metod khrupkikh tenzochuvstvitel'nykh pokrytiy dlya opredeleniya deformatsiy i napryazheniy v elementakh konstruktsiy [Method of brittle strain-sensitive coatings for determining strains and stresses in structural elements]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2021, Iss. 5, pp. 26–30. (In Russian)

6. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods of acoustic testing of metals]. Ed. by N. P. Aleshin. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1989, 456 pp. (In Russian)

7. Tyushev A. N., Dikusar L. D. *Kurs lektsiy po fizike. Ch. 3. Kolebaniya i volny. Volnovaya optika: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop.* [Course of lectures on physics. Part 3. Vibrations and waves. Wave optics: textbook. 2nd ed., rev. and augm.]. Novosibirsk: SGGA Publ., 2011, 194 p. (In Russian)

8. Kasatkin B. S., Kudrin A. B., Lobanov L. M. et al. *Eksperimental'nye metody issledovaniya deformatsiy i*

napryazheniy [Experimental methods for studying strains and stresses]. Kiev: Tekhnika Publ., 1981, 415 p. (In Russian)

9. Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova E. A. *Ostatochnye napryazheniya v metalloproduktii: uchebnoe posobie* [Residual stresses in metal products: textbook]. Yekaterinburg: Ural Federal University Press, 2015, 248 pp. (In Russian)

10. Gladkov B. V. *P'ezoelektricheskiy zvukosnimatel'* [Piezoelectric pickup]. Patent RF, no. 286273. (In Russian)

Received: September 29, 2025

Accepted: October 22, 2025

Author's information:

Boris I. KHODAK — Postgraduate Student;
boris120799@inbox.ru

Vladimir P. BELTIUKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; beltukov@pgups.ru