

Перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля

В.В. Кашковский✉, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Резюме

Одним из важных направлений обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта является своевременное изъятие вагонов из эксплуатации для производства текущего отцепочного ремонта. С целью повышения оперативности и достоверности диагностики вагонов необходим неразрушающий инструментальный контроль вагонов. В данной работе исследованы перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля для оперативного контроля технических объектов в сфере железнодорожного транспорта. Для оценки перспектив применения этого метода были выполнены натурные исследования зависимости спектральных характеристик технических объектов от различной степени их повреждения. Проведенные испытания показали исключительную перспективность спектрального акустического метода для решения задач неразрушающего контроля железнодорожных объектов. Область применения рассмотренного метода может быть распространена не только на оперативный неразрушающий контроль вагонов, но и на входной контроль комплектующих на вагоноремонтных предприятиях, например, колесных пар. Несомненным плюсом предложенной методики является ее дешевизна. Акустический сигнал, необходимый для построения спектра, может быть записан смартфоном или сотовым телефоном любой модели и обработан впоследствии с применением любой сопрягаемой с телефоном вычислительной техники. Следующим этапом научных исследований в этом направлении предполагается накопление и изучение спектральных характеристик различных объектов железнодорожного транспорта. Уже имеется договоренность с вагоноремонтными предприятиями Восточно-Сибирской железной дороги, работники которых выразили острую заинтересованность в апробации предложенного метода.

Ключевые слова

неразрушающий контроль, комплексы неразрушающего контроля, спектральный анализ, дефектоскопия, интеллектуальный молоток

Для цитирования

Кашковский В.В. Перспективы применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля / В.В. Кашковский, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 123–135. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).123-135.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 23.12.2022 г.; принята к публикации: 23.12.2022 г.

Prospects for the application of the spectral acoustic method of non-destructive testing

V.V. Kashkovskii✉, I.I. Tikhii, I.Yu. Glinskii

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Abstract

One of the important ways of ensuring traffic safety is the timely withdrawal of wagons from operation for the production of current uncoupling repairs. To increase the efficiency and reliability of wagon diagnostics non-destructive instrumental control of wagons is extremely relevant and necessary. The paper investigates the prospects of using the spectral acoustic method of non-destructive testing for operational control of technical objects in transport. To assess the prospects of using this method, full-scale studies of the dependence of technical objects' spectral characteristics on varying degrees of their damage were carried out. The performed studies have shown the exceptional prospects of the spectral acoustic method for solving problems of non-destructive testing of railway transport facilities. The scope of application of the method can be extended not only to operational non-destructive testing of wagons, but also to the input control of components, for example, wheel sets, at car repair enterprises. The cheapness of the proposed methodology is captivating. The acoustic signal required to construct the spectrum can be recorded by a smartphone or a cell phone of any model, and subsequently processed using any computer technology interfaced with the phone. The next stage of scientific research in this direction is supposed to accumulate and study the spectral characteristics of various objects of railway transport. There is already an agreement with the car repair companies of the East Siberian Railway, whose employees have expressed keen interest in testing the proposed method.

Keywords

on-destructive testing, non-destructive testing complexes, spectral analysis, flaw detection, intelligent hammer

For citation

Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu. Perspektivy primeneniya spektral'nogo akusticheskogo metoda nerazrushayushchego kontrolya [Prospects for the application of the spectral acoustic method of non-destructive testing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 123–135. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).123-135.

Article Info

Received: July 23, 2022; Received: December 23, 2022; Accepted for publication: December 23, 2022.

Введение

По состоянию на 1 июня 2020 г. Российская Федерация располагала более чем 1 182,6 тыс. грузовых вагонов различного назначения [1]. Для обеспечения безопасности железнодорожных грузоперевозок необходимо поддерживать этот парк в исправном состоянии. Решение этой задачи постоянно находится в поле зрения Министерства путей сообщения РФ, Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (стран СНГ), ОАО «РЖД» и научных организаций [2–10]. Одним из направлений обеспечения безопасности движения является своевременное изъятие вагонов из эксплуатации для производства текущего отцепочного ремонта. Для этого необходим неразрушающий инструментальный контроль вагонов. Согласно ГОСТ Р 56542–2019, существуют следующие виды неразрушающего контроля: акустический; вихретоковый; магнитный; оптический; проникающими веществами; радиационный; радиоволновой; тепловой; электрический [11].

В рамках данной работы рассмотрим перспективы применения акустического вида неразрушающего контроля.

По первичному информативному параметру различают следующие методы акустического неразрушающего контроля: амплитудный; фазовый; временной; частотный; спектральный [11].

Группа компаний «СТГ» предлагает две разновидности комплексов серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб» (интеллектуальный молоток) [12], предназначенных для неразрушающего контроля вагонов.

Комплексы серии «ИМК» применяются во временном акустическом методе неразрушающего контроля и предназначены для проведения экспресс-контроля боковых рам тележек и цельнокатаных колес грузовых вагонов в составе поезда. Схожая методика диагности-

рования рассмотрена в [13].

Предполагается, что динамически объект контроля может быть описан комбинацией из нескольких колебательных звеньев. В основе акустических методов неразрушающего контроля лежит оценка параметров колебательного звена:

$$W(p) = \frac{K\omega_c^2}{p^2 + 2\xi\omega_c p + \omega_c^2}$$

где K – коэффициент усиления звена; $\omega_c = 2\pi F$ – круговая частота собственных незатухающих колебаний звена, рад/с; F – частота собственных незатухающих колебаний звена, Гц; ξ – декремент затухания [14–18].

В свою очередь, в основе временного акустического метода неразрушающего контроля лежит оценка длительности переходного процесса весовой функции колебательного звена:

$$g(t) = \frac{K\omega_c}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi\omega_c t} \cdot \sin\left(\omega_c \sqrt{1-\xi^2} t\right), \quad (1)$$

при $0 < \xi < 1$.

Из (1) очевидно, что длительность переходного процесса функции $g(t)$, определена экспонентой:

$$e^{-\xi\omega_c t}. \quad (2)$$

Временной акустический метод исходит из того, что появление дефектов (наличие несплошности, неправильной структуры металла) в сплошной конструкции детали неизбежно приведет к уменьшению декремента затухания ξ в выражении (2) и, как следствие, к уменьшению длительности переходного процесса.

Недостатком временного акустического метода неразрушающего контроля является то, что метод не учитывает изменение частоты ω при дефектах. Известно, что на величину ω влияют различные конструктивные факторы детали (материал изготовления, форма и т. п.) и особенно ее

размер. Так, например, значение собственной частоты стержня определено выражением:

$$\omega_{cn} = \frac{\pi D n^2}{8 L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = C \frac{D n^2}{L^2}, \quad (3)$$

где D – диаметр стержня; L – длина стержня; ρ – плотность материала стержня; E – модуль Юнга материала стержня; $n=1, 2, 3 \dots$ – номер собственной частоты (номер резонанса или тона) [19].

В рамках одной детали или конструкции величина C в (3) постоянна. Чем больше размер детали L , тем меньше ее ω , и наоборот. Трещина в детали может разделить ее на независимые малые конструктивные элементы, для каждого из которых будет выполняться условие $L_i < L$. Поэтому частота ω каждого i -го элемента будет больше, чем частота исходной детали без дефектов. Как следствие, в выражении (2) теряется зависимость длительности переходного процесса от наличия дефектов. Можно утверждать, что именно поэтому обозначенная номенклатура объектов контроля комплексов «ИМК» с помощью «интеллектуального молотка» ограничена рамками тележек и цельнокатаных колес. На основании выполненных авторами исследований целью данной статьи является демонстрация спектрального акустического метода как более перспективного по сравнению с временным акустическим для проведения неразрушающего контроля подвижного состава.

Постановка задачи

Энергетический спектр реализации сигнала $x(t)$, $-\infty \leq t \leq +\infty$, случайной величины ζ определен выражением:

$$\Phi_{\zeta}(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (4)$$

где $\omega_c = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; f – частота, Гц; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица [20].

Для построения энергетического спектра случайного процесса (4) за ним нужно наблюдать с момента времени t от $-\infty$ в прошлом и до $+\infty$ в будущем. На практике это условие невыполнимо, поэтому в технике применяется понятие текущий энергетический спектр сигнала:

$$\Phi_{\text{ЭТ}\zeta}(\omega) = \left| \int_0^{T_H} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2, \quad (5)$$

где $0 < T_H < \infty$ – конечное время наблюдения процесса.

Для получения текущего энергетического спектра контролируемого объекта (например, стяжного хомута железнодорожной цистерны), по нему наносится недеформирующий удар молотком. Затухающее звучание объекта контроля после удара представляет собой переходный процесс (1). Через микрофон оно записывается на носитель информации в виде последовательности дискретных измерений сигнала $x(t)$ с частотой 44 кГц. После завершения записи сигнала (1) выборка дискретных измерений $0 \leq x(t) \leq T_H$ используется для вычисления текущего энергетического спектра (5).

В качестве примера на рис. 1 показан переходный процесс (акустический сигнал) после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны, а на рис. 2 текущий энергетический спектр этого сигнала (далее – спектр).

Спектр сигнала на рис. 2 содержит множество гармоник. При повторении данного эксперимента частоты некоторых гармоник также повторяются. Остальные гармоники характеризуют случайные шумы в процессе измерения акустического сигнала (1) объекта контроля.

Повторяющиеся частоты гармоник собственных незатухающих колебаний исследуемого объекта описаны выражением:

$$\omega_{ci} = \sqrt{\frac{k_i}{m}}, \quad (6)$$

где ω_{ci} – частота i -й гармоники собственных незатухающих колебаний исследуемой детали; m – масса объекта; k_i – коэффициент, характеризующий жесткость объекта по i -й гармонике.

Из выражений (1), (3) и (6) следует, что при возникновении внутренних дефектов в объекте контроля изменяются частоты ω_{ci} , и, возможно, их количество. Зависимость спектральных характеристик объектов контроля от характера внутренних дефектов до настоящего времени не была исследована. Однако выполнить подобные исследования на объектах железнодорожного транспорта пока не представляется возможным. Поэтому возникает актуальная научно-практическая задача исследования изменения спектра акустического сигнала объекта контроля в зависимости от его дефектов.

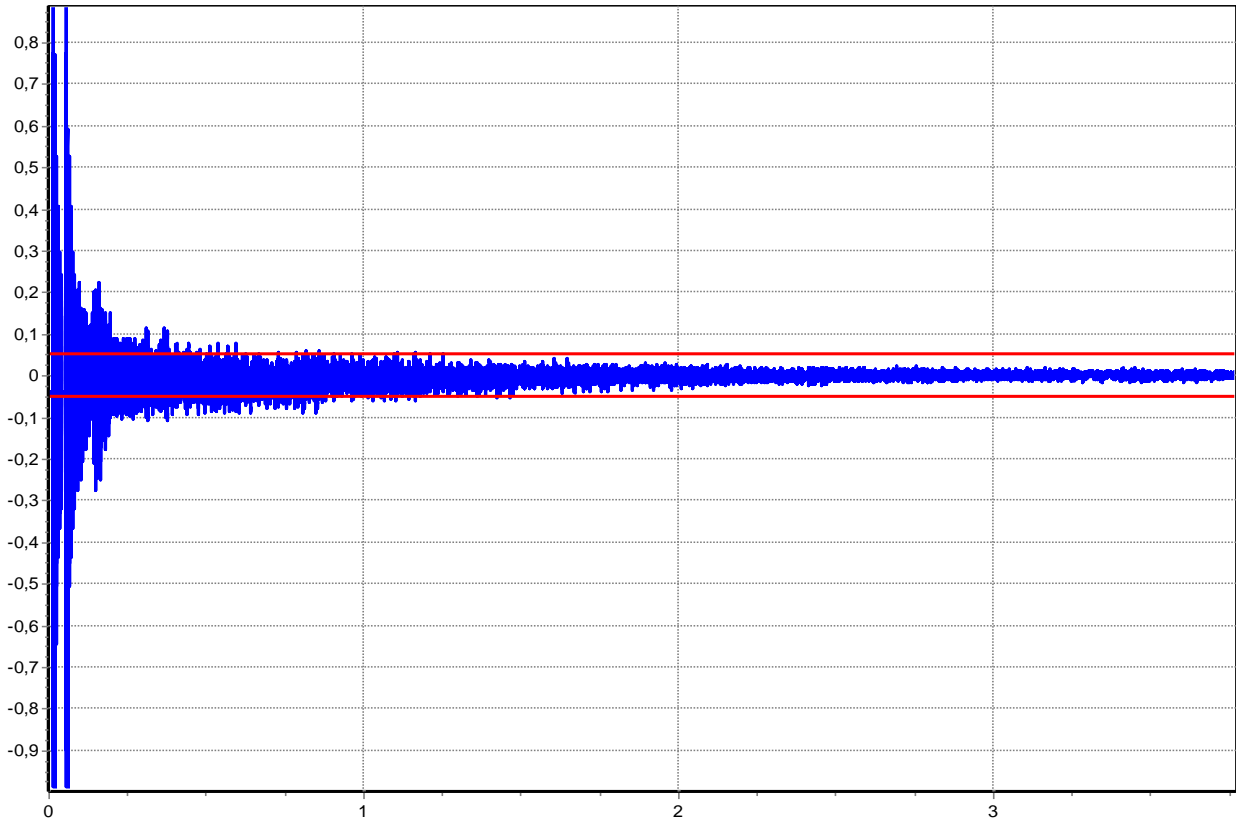


Рис. 1. Запись акустического сигнала после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны
Fig. 1. Recording of an acoustic signal after hitting the coupling clamp of a railway tank

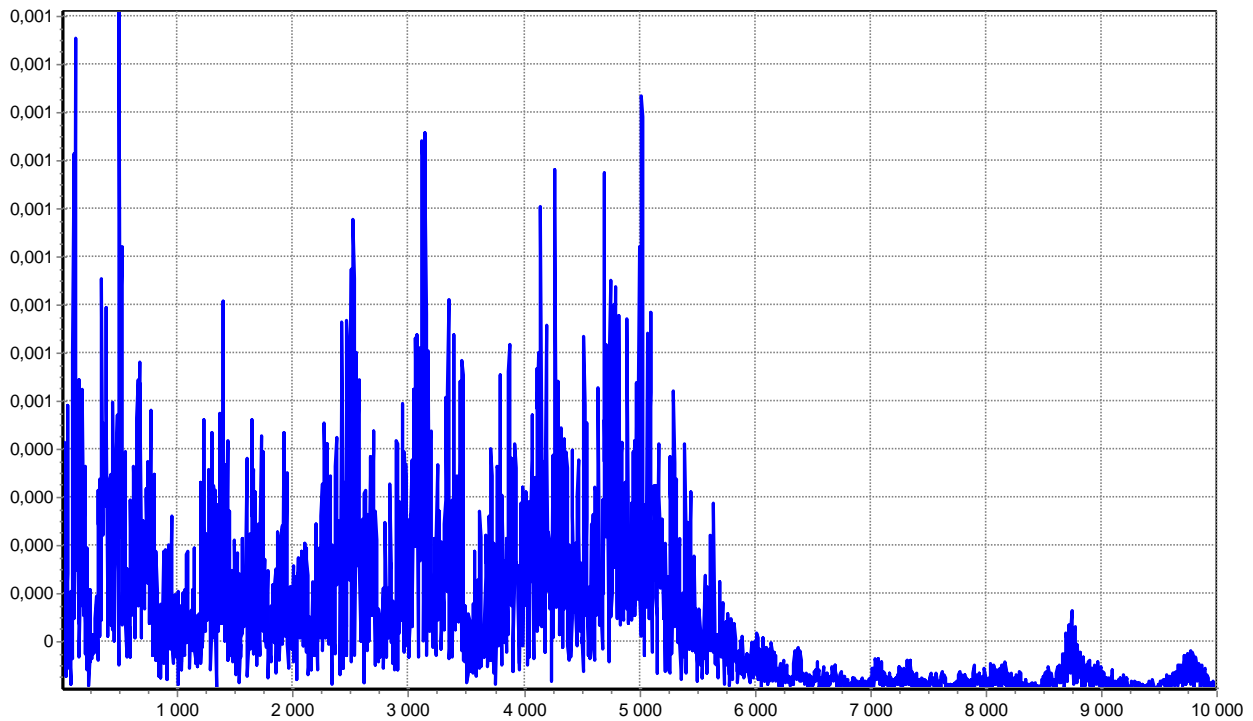


Рис. 2. Спектр акустического сигнала после удара по стяжному хомуту железнодорожной цистерны
Fig. 2. The spectrum of the acoustic signal after hitting the coupling clamp of a railway tank

Исследование изменения спектра акустического сигнала объекта контроля в зависимости от дефектов объекта контроля

Для оценки перспектив применения спектрального акустического метода неразрушающего контроля необходима оценка точности измерения гармоник спектра и влияние дефектов

объекта на его спектральную характеристику. Для решения этой задачи было проведено исследование пяти деталей типа «втулка», одна из которых показана на рис. 3. Геометрические размеры объектов контроля приведены в табл. 1.



Рис. 3. Объект контроля (исследуемая деталь № 002)

Fig. 3. Object of control (tested item No 002)

Таблица 1. Геометрические размеры деталей (мм), участвующих в исследовании
Table 1. The geometric dimensions of the parts (mm) involved in the research

Название детали Name of the part	Размеры (высота / толщина / диаметр), мм Dimensions (height/ thickness/ diameter), mm	Материал Material
001	35,7 / 3,3 / 69,8	Сталь Steel
002	31,9 / 3,9 / 101	
003	50 / 3,9 / 52,2	
004	47,1 / 10,2 / 63,1	
008	49,6 / 3,1 / 42,1	

При проведении исследования по деталям наносились удары молотком весом 0,3 кг с различной силой и направлением удара. Запись велась на микрофон с частотой дискретизации 44 кГц и разрядностью звука 16 бит. Дискретность (шаг) построения спектра – 4,398 Гц.

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе снимались спектральные характеристики неповрежденных деталей; на втором снимались спектральные характеристики тех же деталей, запыленных ножовочным по-

лотном; на третьем этапе глубина запыла увеличивалась с помощью углошлифовальной машины (болгарки).

На каждом этапе для исследуемых деталей проводилось по десять испытаний ударом для выделения повторяющихся гармоник и оценки статистической погрешности измерения гармоник спектра.

На рис. 4 показано наложение графиков спектров от двух ударов по исследуемой детали № 001 в исходном состоянии. Эксперимент по-

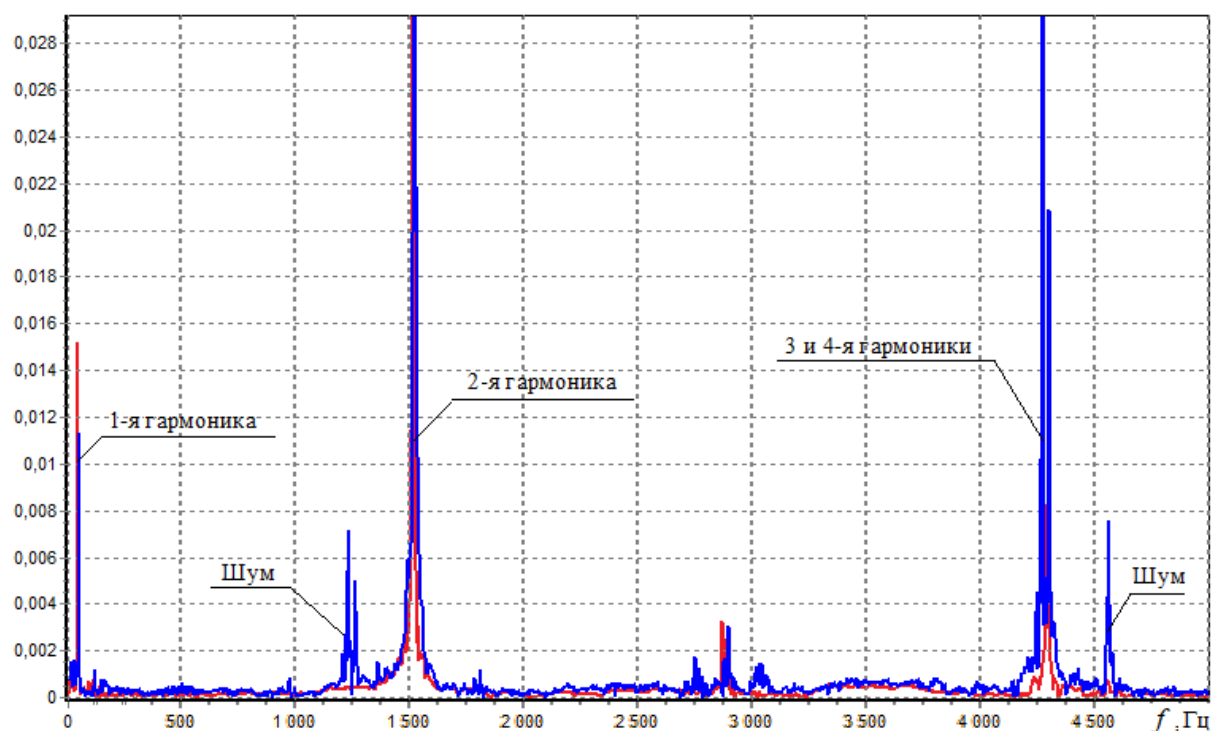


Рис. 4. Наложение спектров двух ударов по исследуемой детали № 001 в исходном состоянии: первая гармоника – 49,58 Гц; вторая гармоника – 1 522,91 Гц; третья гармоника – 4 271,66 Гц; четвертая гармоника – 4 302,45 Гц

Fig. 4. Superposition of the spectra of two impacts on the investigated part No 002 in the initial state: first harmonic – 49,58 Hz; second harmonic – 1 522,91 Hz; third harmonic – 4 271,66 Hz; fourth harmonic – 4 302,45 Hz

казал четыре повторяющиеся гармоники: первая – 49,58 Гц; вторая – 1 522,91 Гц; третья – 4 271,66 Гц; четвертая – 4 302,45 Гц. Выполненные эксперименты позволили выявить интересное явление, требующее своего теоретического объяснения. Некоторые гармоники в разных опытах могут двойтаться. Так, в эксперименте, показанном на рис. 3, третья и четвертая гармоники нестабильны. Их частоты в разных опытах постоянны, но они могут появляться как совместно, так и раздельно. Причем обязательно присутствует как минимум одна из них. Эксперименты показали, что погрешность выдерживания частоты гармоник в опытах не превышает величины шага измерения, т. е. $\pm 4,398$ Гц. Это характерно для механических систем с четко выраженными частотами резонансов.

Далее для упрощения обработки полученной информации будем рассматривать отклонения частоты только первой гармоники с частотой более 500 Гц и большой амплитудой. Резонансные частоты деталей по первой значащей гармонике приведены в табл. 2.

Таблица 2. Первые значащие гармоники деталей
Table 2. First meaningful harmonics of parts

Название детали Name of the part	Частота первой гармоники, Гц First harmonic's frequency, Hz
001	1 522,91
002	753,26
003	2 833,52
004	4 698,27
008	3 378,87

На втором этапе исследовались изменения спектров, а их характеристики замерялись после деформации деталей с помощью ножовки.

Характер надпилов указан в табл. 3. Фотография одной из поврежденных деталей показана на рис. 5. Изменение спектров деформированных деталей показаны на рис. 6–10.

Таблица 3. Характер надпилов объектов контроля на втором этапе**Table 3.** The nature of the overlays of the controlled objects at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Depth of cut, mm	Ширина реза, мм Width of cut, mm
001	17	1,5
002	15,1	1,5
003	22	1,5
004	23,2	1,5
008	24,5	1,5

Анализ спектрограмм показывает, что во всех случаях появления дефектов пропадает характерная для исправного состояния гармоника, и появляются новые, существенно отличающиеся от исходной (табл. 4). Главный положительный результат всех экспериментов состоит в том, что отклонение частот новых гармоник намного превышает случайные отклонения результатов измерения. Их невозможно с чем-либо перепутать, что полностью исключает ошибки первого и второго рода.

Таблица 4. Первые значащие гармоники исправных и деформированных деталей**Table 4.** The first significant harmonics of serviceable and deformed parts

Деталь Part	Частота исходной гармоники, Гц Initial harmonic frequency, Hz	Частота первой дефектной гармоники, Гц First deformed harmonic frequency, Hz	Частота второй дефектной гармоники, Гц Second deformed harmonic frequency, Hz
001	1 522,91	1 267,83	1 439,35
002	753,26	674,10	744,47
003	2 833,52	2 248,58	3 321,69
004	4 698,27	3 493,22	3 730,71
008	3 378,87	2 552,04	3 735,11

На третьем этапе исследования детали были существенно деформированы с помощью углошлифовальной машины (болгарки). Размеры надпилов указаны в табл. 5, фотографии деталей, поврежденных болгаркой, показаны на рис. 11.

**Рис. 5.** Фотография детали № 002, деформированной ножовкой по металлу**Fig. 5.** Photo of a part No 002 deformed with a hacksaw

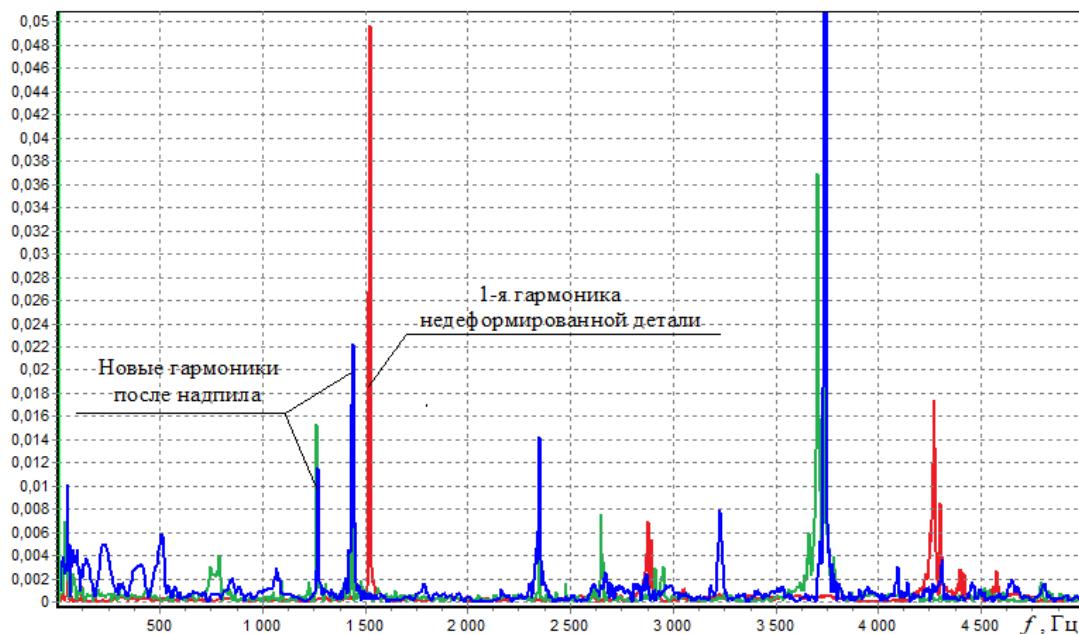


Рис. 6. Наложение спектров исследуемой детали № 001 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 1 522,91 Гц; первая гармоника деформированной детали – 1 267,83 Гц;
вторая гармоника деформированной детали – 1 439,35 Гц

Fig. 6. Superposition of the spectra of the investigated part No 001 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 1 522,91 Hz; the first harmonic of a deformed part is 1 267,83 Hz;
the second harmonic of a deformed part is 1 439,35 Hz

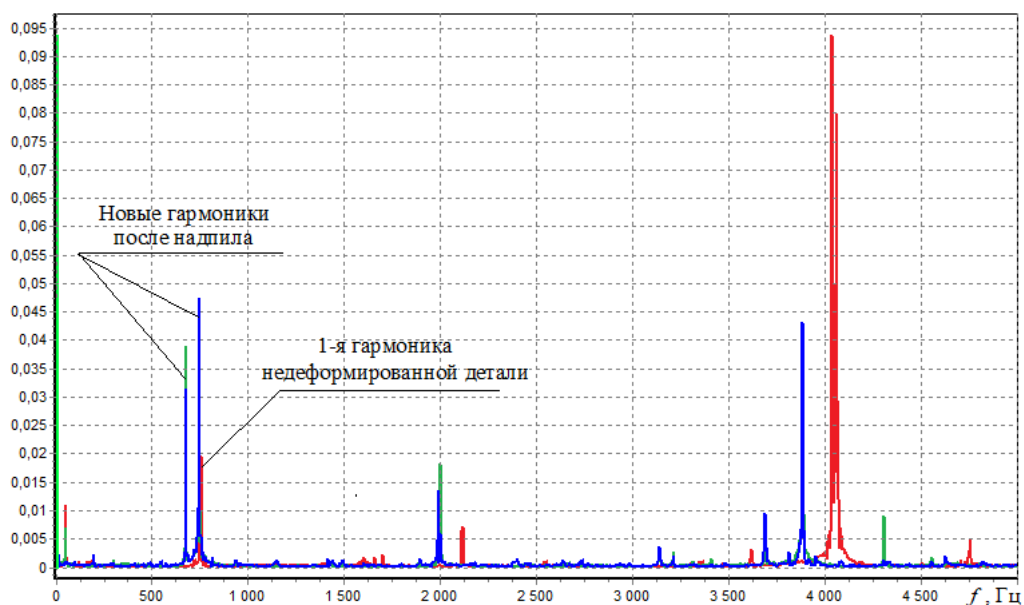


Рис. 7. Наложение спектров исследуемой детали № 002 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 753,26 Гц; первая гармоника деформированной детали – 674,10 Гц;
вторая гармоника деформированной детали – 744,47 Гц

Fig. 7. Superposition of the spectra of the investigated part No 002 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 753,26 Hz; the first harmonic of a deformed part is 674,10 Hz;
the second harmonic of a deformed part is 744,47 Hz

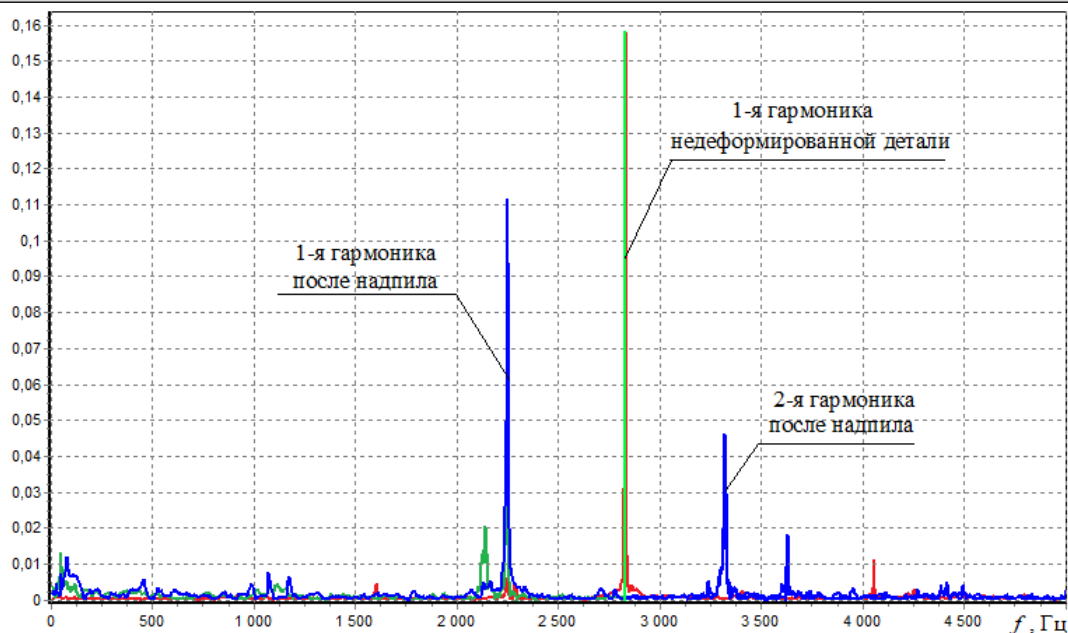


Рис. 8. Наложение спектров исследуемой детали № 003 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 2 833,52 Гц; первая гармоника деформированной детали – 674,10 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 3 321,69 Гц

Fig. 8. Superposition of the spectra of the investigated part No 003 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 2 833,52 Hz; the first harmonic of a deformed part is 674,10 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 3 321,69 Hz

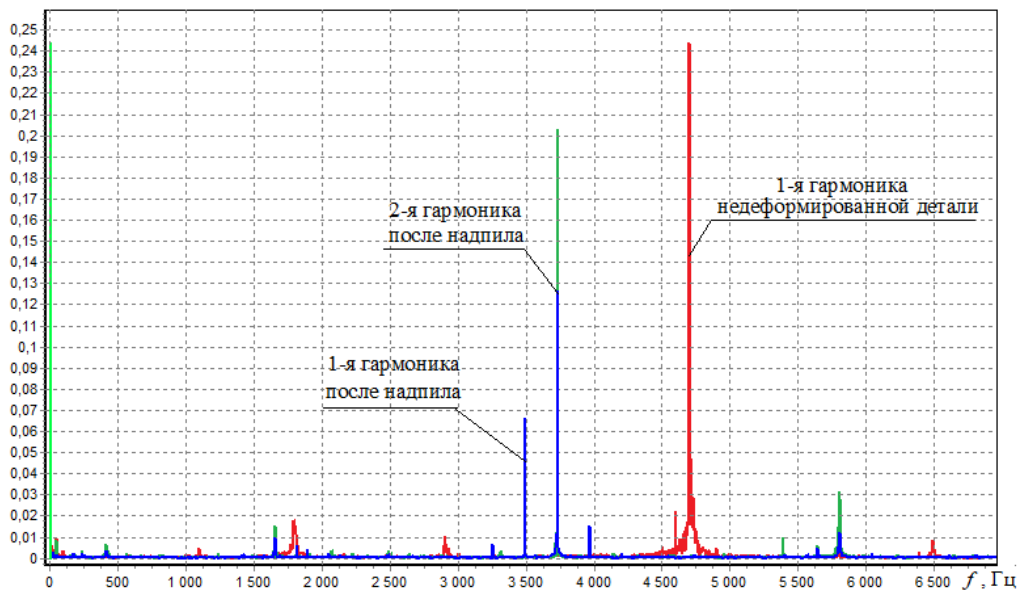


Рис. 9. Наложение спектров исследуемой детали № 004 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 4 698,27 Гц; первая гармоника деформированной детали – 3 493,22 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 3 730,71 Гц

Fig. 9. Superposition of the spectra of the investigated part No 004 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 4 698,27 Hz; the first harmonic of a deformed part is 3 493,22 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 3730.71 Hz

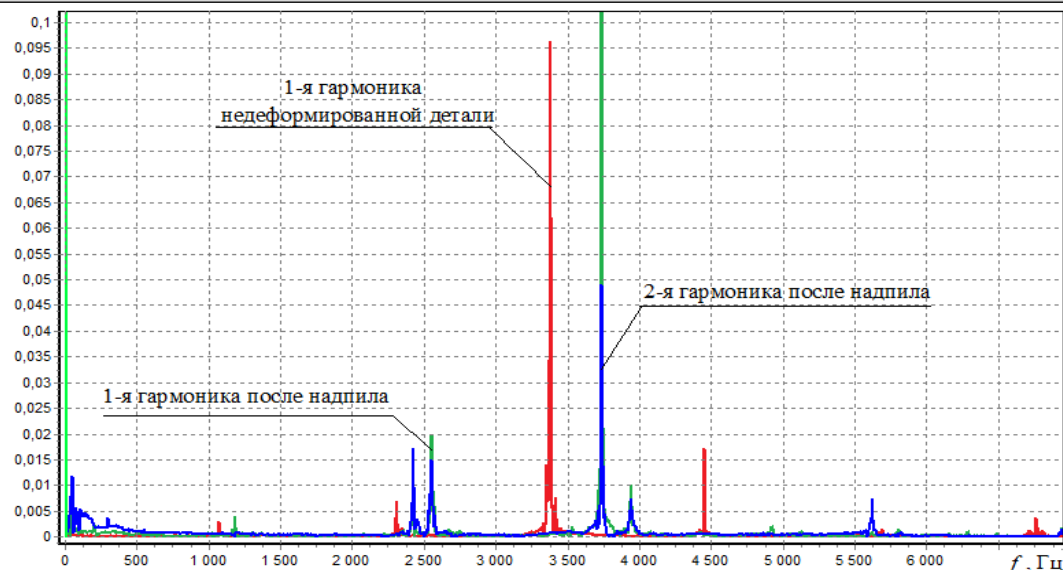


Рис. 10. Наложение спектров исследуемой детали № 004 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали – 3 378,87 Гц; первая гармоника деформированной детали – 2 552,04 Гц; вторая гармоника деформированной детали – 3 735,11 Гц

Fig. 10. Superposition of the spectra of the investigated part No 004 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 3 378,87 Hz; the first harmonic of a deformed part is 2 552,04 Hz; the second harmonic of a deformed part is 3 735,11 Hz

Существенные деформации объектов контроля, вызванные надпилем болгаркой, во всех случаях привели к радикальному изменению спектров. Отмечается появление множества гармоник с большой амплитудой, существенно искажающих исходный спектр (см. рис. 4 и рис. 12). Большое число вновь появившихся гармо-

ник иногда даже вызывает затруднение в выборе – какую из них считать первой, а какую второй. Но в целом изменения спектров и их характеристик таковы, что перепутать исправное и дефектное состояния объектов контроля невозможно. Обобщенные результаты экспериментов приведены в табл. 6.

Таблица 5. Характер надпила исследуемых объектов контроля на третьем этапе
Table 5. The nature of the notch of the studied objects under control at the third stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Depth of cut, mm	Ширина реза, мм Width of cut, mm
001	24,5	3,5
002	32	3,5
003	27	3,5
004	44	3,5
008	41	3,5

Таблица 6. Первые значащие гармоники исправных и деформированных деталей на третьем этапе
Table 6. The first meaningful harmonics of serviceable and deformed parts at the third stage

Деталь Part	Частота исходной гармоники, Гц Initial harmonic frequency, Hz	Частота первой дефектной гармоники, Гц First deformed harmonic frequency, Hz	Частота второй дефектной гармоники, Гц Second deformed harmonic frequency, Hz
001	1 522,91	581,74	1 861,56
002	753,26	581,74	1 025,94
003	2 833,52	1 725,22	2 121,04
004	4 698,27	2 169,42	3 871,44
008	3 378,87	1 505,32	3 330,49



Рис. 11. Фотография детали № 002, деформированной болгаркой
 Fig. 11. Photograph of a part deformed by an angle grinder

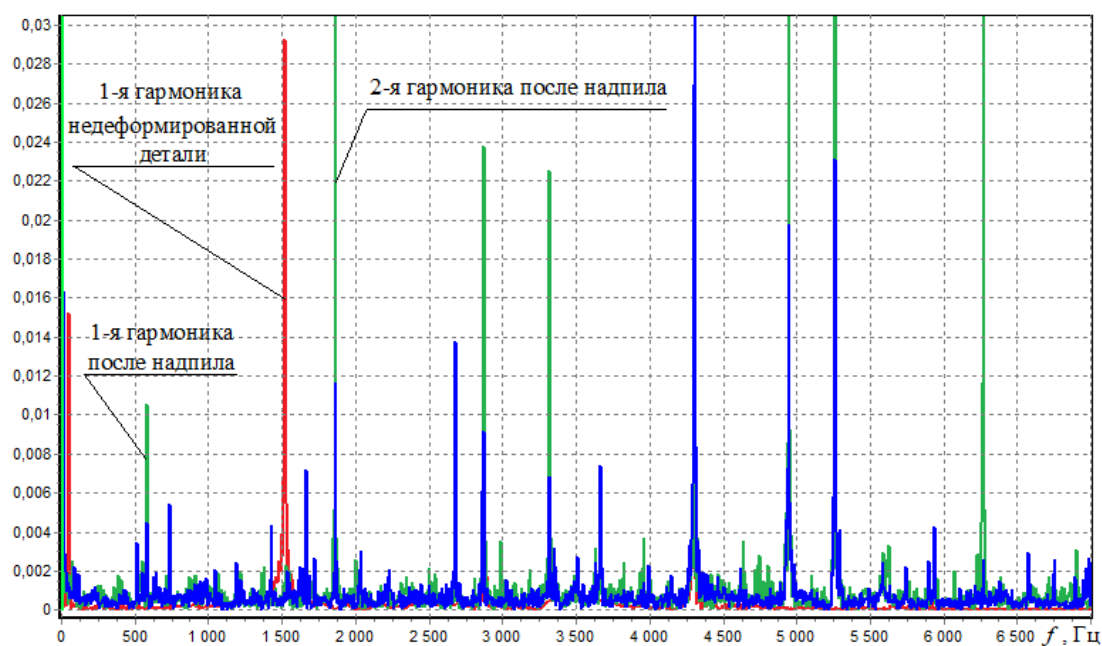


Рис. 12. Наложение спектров исследуемой детали № 001 в исходном состоянии и двух спектров после надпила ножовкой:

первая гармоника исправной детали 1 522,91 Гц; первая гармоника деформированной детали – 581,74 Гц;
 вторая гармоника деформированной детали – 1 861,56 Гц

Fig. 12. Superposition of the spectra of the investigated part No 001 in the initial state and two spectra after the hacksaw notch:

the first harmonic of a serviceable part is 1 522,91 Hz; the first harmonic of a deformed part is 581,74 Hz;
 the second harmonic of a deformed part is 1 861,56 Hz

Заключение

Выполненные исследования показали исключительную перспективность спектрального акустического метода для решения задач не-

разрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта. Область его применения может быть распространена не только на оперативный неразрушающий контроль вагонов,

но и на входной контроль комплектующих на вагоноремонтных предприятиях, например, колесных пар. Подкупает дешевизна предложенной методики. Акустический сигнал (1) может быть записан смартфоном или сотовым телефоном любой модели и обработан впоследствии с применением любой сопрягаемой с телефоном вычислительной техники.

Следующий этап исследований в этом направлении – накопление и изучение спектральных характеристик объектов железнодорожного транспорта. Имеется договоренность с вагоноремонтными предприятиями Восточно-Сибирской железной дороги, которые выразили острую заинтересованность в апробации предложенного метода.

Список литературы

1. Сеть РЖД испытывает давление профицита вагонного парка // РЖД Партнер.ру : сайт. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/set-rzhd-isytyvaet-davlenie-profitsita-vagonnogo-parka/> (Дата обращения: 15.06.2022).
2. Об изменении периодичности плановых видов ремонта грузовых вагонов колеи 1520 мм : приказ Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 18.12.1995 г. № 7ЦЗ. М. : МПС РФ, 1995. 2 с.
3. О внедрении новой системы ремонта грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации 5.01.1999 г. № К-2у (Д). М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
4. О совершенствовании системы ремонта и технического обслуживания грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 6.12.1999 г. № К-2746у. М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
5. О введении в действие новой редакции правил эксплуатации грузовых вагонов при системе технического обслуживания и ремонта с учетом фактически выполненного объема работ на железных дорогах Российской Федерации : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации от 17.04.2001 г. № П-671у. М. : МПС РФ, 2001. 17 с.
6. Правила эксплуатации и полномержного учета собственных грузовых вагонов : утв. на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту от 19.06.2001. Введ. 2001–09–01. М., 2001. 13 с.
7. Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 54 от 18-19 мая 2011 г. 136 с.
8. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 57 от 16-17 окт. 2012 г. 17 с.
9. О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 18 с.
10. Об утверждении руководства по текущему отцепочному ремонту (ТР-1) : распоряжение ОАО «РЖД» № 2633/р от 07.12.2018 г. Введ. 2019–01–01. М. : ОАО «РЖД», 2018. 28 с.
11. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 2020–11–01. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.
12. Интеллектуальный молоток контроля («ИМК») // Clean technologies group : сайт: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Дата обращения: 15.06.2022).
13. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection, 2000.
14. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.
15. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission / S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi et al. // Acoustic emission Standards and Technology Update edited / SJ.Vahaviolos ; American Society for Testing and Materials. STP1353. 1999. P. 25–40.
16. Кочетков Ю.А. Основы автоматики авиационного оборудования. М. : ВВИА, 1995. 574 с.
17. Муромцев Ю.Л. Основы автоматики и системы автоматического управления. Ч. 1. Тамбов : Тамб. ГТУ, 2008. 96 с.
18. Серебряков А.С., Семенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика. М. : Юрайт, 2021. 477 с.
19. Смирнова О.И., Попов П.В., Федоров Г.Е. Измерение модуля Юнга методом акустического резонанса : лаб. работа по курсу «Общая физика». URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/rodwaves_148.pdf (Дата обращения: 15.06.2022).
20. Тихий И.И., Кашковский В.В. Испытания и эксплуатация авиационной техники. Ч. 1. Иркутск : ИВВАИУ, 2009. 308 с.

References

1. Set' RZhd ispytyvaet davlenie profitsita vagonnogo parka (Elektronnyi resurs) [The Russian Railways network is under pressure from the surplus of the wagon fleet (Electronic resource)]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/set-rzhd-isytyvaet-davlenie-profitsita-vagonnogo-parka/> (Accessed June 15, 2022).
2. Prikaz ministerstva putei soobshcheniya RF ot 18 dekabrya 1995 g. № 7TsZ «Ob izmenenii periodichnosti planovykh vidov remonta gruzovykh vagonov kolei 1520 mm» [Order of the ministry of railways of the Russian Federation No. 7CZ dated December 18, 1995. «On changing the frequency of planned types of repairs of freight wagons of 1520 mm gauge»].
3. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 5.01.1999 g «O vnedrenii novoi sistemy remonta gruzovykh vagonov». [Instruction of the Ministry of railways of the Russian Federation, dated January 5, 1999 no. k-2u (d) «On the introduction of a new system for the repair of freight wagons»].

4. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 6.12.1999 g. no K-2746u «O sovershenstvovanii sistemy remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya gruzovykh vagonov» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation dated December 6, 1999, no K-2746u «On improving the system of repair and maintenance of freight wagons»].

5. Ukazanie Ministerstva putei soobshcheniya RF ot 17.04.2001 g. № P-671u «O vvedenii v deistvie novoi redaktsii pravil ekspluatatsii gruzovykh vagonov pri sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta s uchedom fakticheski vypolnennogo ob"ema rabot na zheleznykh dorogakh Rossiiskoi Federatsii» [Instruction of the ministry of railways of the Russian Federation no P-671u, dated April 17, 2001 «On the introduction of a new edition of the rules for the operation of freight wagons in the maintenance and repair system, taking into account the amount of work actually performed on the railways of the Russian Federation»].

6. Pravila ekspluatatsii i polnomernogo ucheta sobstvennykh gruzovykh vagonov. Utverzhdeny na 29 zasedanii Soveta po zhelezno-dorozhnomu transportu. Data vvedeniya v deistvie: 01.09.2001 g. [Rules of operation and measurement of own freight wagons. Approved for the 29th meeting of the Railway Transport Council. Effective date: September 01, 2001].

7. Rukovodstvo po kapital'nomu remontu gruzovykh vagonov. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol № 54 ot «18-19» maya 2011 g. [Manual for the overhaul of freight cars. Approved by: The Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No. 54 of May 18-19, 2011], 136 p.

8. Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov, dopushchennykh v obrashchenie na zheleznodorozhnye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshchenii. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva Protokol № 57 ot «16-17» oktyabrya 2012 g [Regulations on the system of maintenance and repair of freight cars admitted to circulation on public railways in international traffic. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States Protocol No. 57 of October 16-17, 2012].

9. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 29 dekabrya 2012 g. № 2759r «O sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov» [Order of the JSC «Russian Railways» No. 2759r dated December 29, 2012 «On the system of maintenance and repair of freight wagons»].

10. Rasporyazhenie OAO «RZhD» N 2633/r ot 07.12.2018 g «Ob utverzhdenii rukovodstva po tekushchemu ottsepochnomu remontu (TR-1)». [Order of JSC «Russian Railways» no 2633/r dated December 07, 2018 «Manual for current uncoupling repair (TR-1)»].

11. GOST R 56542-2019. Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov [State Standard R 56542-2019. Non-destructive testing. Classification of types and method]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 12 p.

12. Intellektual'nyi molotok kontrolya («IMK») (Elektronnyi resurs) [Intelligent Control Hammer («ICH») (Electronic resource)]. Available at: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Accessed June 15, 2022).

13. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection (NDIS). 2000.

14. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.

15. Yuyama S., Okamoto T., Shigeishi M., Ohtsu M., Kishi T. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission // Acoustic emission Standards and Technology Update edited by S.J.Vahaviolos, American Society for Testing and Materials. STP1353, 1999, pp. 25–40.

16. Kochetkov Yu.A. Osnovy avtomatiki aviatsionnogo oborudovaniya [Fundamentals of aviation equipment automation]. Moscow: VVIA Publ., 1995. 574 p.

17. Muromtsev Yu.L. Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 1 [Fundamentals of automation and automatic control systems. Part 1]. Tambov: Tambov GTU Publ., 2008. 96 p.

18. Serebryakov A.S., Semenov D.A., Chernov E.A. Avtomatika [Automotion]. Moscow: Yurait Publ., 2021. 477 p.

19. Smirnova O.I., Popov P.V., Fedorov G.E. Laboratornaya rabota po kursu «Obshchaya fizika» «Izmerenie modulya Yunga metodom akusticheskogo rezonansa» (Elektronnyi resurs) [Laboratory work on the course «General Physics» «Measurement of Young's modulus by acoustic resonance method» (Electronic resource)]. Available at: https://mpt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/rodwaves_148.pdf (Accessed June 15, 2022).

20. Tikhii I.I., Kashkovskii V.V. Ispytaniya i ekspluatatsiya aviatsionnoi tekhniki. Chast' 1 [Testing and operation of aviation equipment. Part 1]. Irkutsk: IVVAIU Publ., 2009. 308 p.

Информация об авторах

Кашковский Виктор Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Тихий Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tiviv@list.ru.

Глинский Игорь Юрьевич, магистрант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ig.1906@yandex.ru.

Information about the authors

Victor V. Kashkovskii, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Ivan I. Tikhii, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, mechanics and instrument engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tiviv@list.ru.

Igor Yu. Glinskii, Master Student of the Department of Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ig.1906@yandex.ru.