

Исследование методических погрешностей диагностических комплексов неразрушающего контроля

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

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

viktor.kashkovskij@mail.ru

Резюме

Поддержание парка грузовых вагонов в исправном состоянии в процессе грузоперевозок – важная народнохозяйственная задача. Большую роль в этом процессе играет инструментальный контроль вагонов. Одним из направлений такого контроля является разработка и создание комплексов неразрушающего контроля. В настоящее время группа компаний «Clean Technology Group» предлагает к поставке две разновидности комплексов для неразрушающего контроля серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб». Несмотря на очевидные плюсы самих комплексов «ИМК», их опытная эксплуатация показала, что метод контроля не вполне надежен и имеет ряд недостатков. Номенклатура объектов контроля крайне ограничена – только рамы тележек и цельнокатаные колеса. Исходя из этого возникла актуальная научно-практическая задача – усовершенствовать методологию диагностики неразрушающего контроля и программное обеспечение комплексов «ИМК», а также выполнить исследования по развитию и внедрению перспективных комплексов неразрушающего контроля. Для решения поставленной задачи были изучены методические погрешности существующей методики неразрушающего контроля на примере пяти деталей. Всего было произведено 150 экспериментов, в ходе которых установлено, что погрешности измерения достаточно большие, поэтому вероятность ошибок первого и второго рода (т. е. вероятность пропуска дефекта и выбраковка годной детали) также велика. Для решения задачи предложен метод спектрального анализа переходного процесса детали после удара. Данный метод достаточно чувствителен и надежен, с его помощью можно выявить даже незначительные дефекты.

Ключевые слова

комплексы неразрушающего контроля, спектральный анализ, дефектоскопия, интеллектуальный молоток

Для цитирования

Исследование методических погрешностей диагностических комплексов неразрушающего контроля / В.В. Кашковский, И.И. Тихий, И.Ю. Глинский, Ю.А. Корнило // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3 (75). – С. 102–111. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).102-111.

Информация о статье

поступила в редакцию: 24.06.2022 г.; поступила после рецензирования: 5.09.2022 г.; принята к публикации: 6.09.2022 г.

Study of methodological errors of non-destructive testing diagnostic complexes

V.V. Kashkovskii, I.I. Tikhii, I.Yu. Glinskii, Yu.A. Kornilo

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉viktor.kashkovskij@mail.ru

Abstract

Maintaining a fleet of freight cars in good condition during cargo transportation is an important economic task. Instrumental control of wagons plays an important role in this process. One of the directions of such control is the development and creation of non-destructive testing complexes. Currently, the CTG group of companies offers for delivery two types of complexes for non-destructive testing of the IMC series: «IMK-01» and «IMKmb». Despite the obvious advantage of the IMC complexes, their experimental operation has shown that the control method is not completely reliable and has a number of drawbacks. The range of control objects is extremely limited – only trolley frames and solid-rolled wheels. Based on this, an urgent scientific and practical task arose to improve the methodology for the diagnosis of non-destructive testing and the software of the IMC complexes, as well as to carry out research aimed at development and implementation of promising non-destructive testing complexes. To solve this problem, the methodological errors of the existing non-destructive testing technique were investigated using five parts. A total of 150 experiments were performed. During these experiments, it was found that the measurement errors are quite large, so the probability of errors of the first and second kind, (i.e. the probability of missing a defect and culling of a good part) is also high. To solve the problem, a method of spectral analysis of the transient process of the part after impact is proposed. This method is quite sensitive and reliable, it is suitable for detecting even minor defects.

Keywords

nondestructive testing complexes, spectral analysis, flaw detection, intelligent hammer

For citation

Kashkovskii V.V., Tikhii I.I., Glinskii I.Yu., Kornilo Yu.A. Issledovanie metodicheskikh pogreshnostei diagnosticheskikh kompleksov nerazrushayushchego kontrolya [Investigation of methodological errors of diagnostic complexes of non-destructive testing]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 102–111. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).102-111.

Article Info

Received: June 24, 2022; Received: September 5, 2022; Accepted: September 6, 2022.

Введение

Поддержание парка грузовых вагонов в исправном состоянии в процессе грузоперевозок – важная народнохозяйственная задача [1–10]. Большую роль в этом процессе играет инструментальный контроль вагонов. Одним из направлений такого контроля является разработка и создание комплексов неразрушающего контроля. В настоящее время группа компаний Clean Technology Group (CTG) предлагает к поставке две разновидности комплексов для неразрушающего контроля серии «ИМК»: «ИМК-01» и «ИМКмб» (интеллектуальный молоток) [11].

Комплексы неразрушающего контроля серии «ИМК» предназначены для проведения экспресс-контроля боковых рам тележек и цельнокатаных колес грузовых вагонов в составе поезда. Диагностические комплексы производства CTG позволяют проводить интегральную оценку целостности изделий в режиме «дефект / годен» без указания локализации несплошностей в объекте контроля. Похожая методика неразрушающего

контроля рассмотрена в [12].

Несмотря на очевидные плюсы самих комплексов «ИМК», их опытная эксплуатация показала, что метод контроля не вполне надежен и имеет ряд недостатков. Номенклатура объектов контроля крайне ограничена – только рамы тележек и цельнокатаные колеса. Исходя из этого возникла актуальная научно-практическая задача – усовершенствовать методологию диагностики неразрушающего контроля и программное обеспечение комплексов «ИМК», а также выполнить исследования по развитию и внедрению перспективных комплексов неразрушающего контроля.

Постановка задачи

В основе комплексов серии «ИМК» используется метод свободных колебаний. Важнейшим свойством используемого метода и его аппаратно-программной реализации является его чувствительность к любым видам структурных изменений (наличие несплошности, дефекта, не-

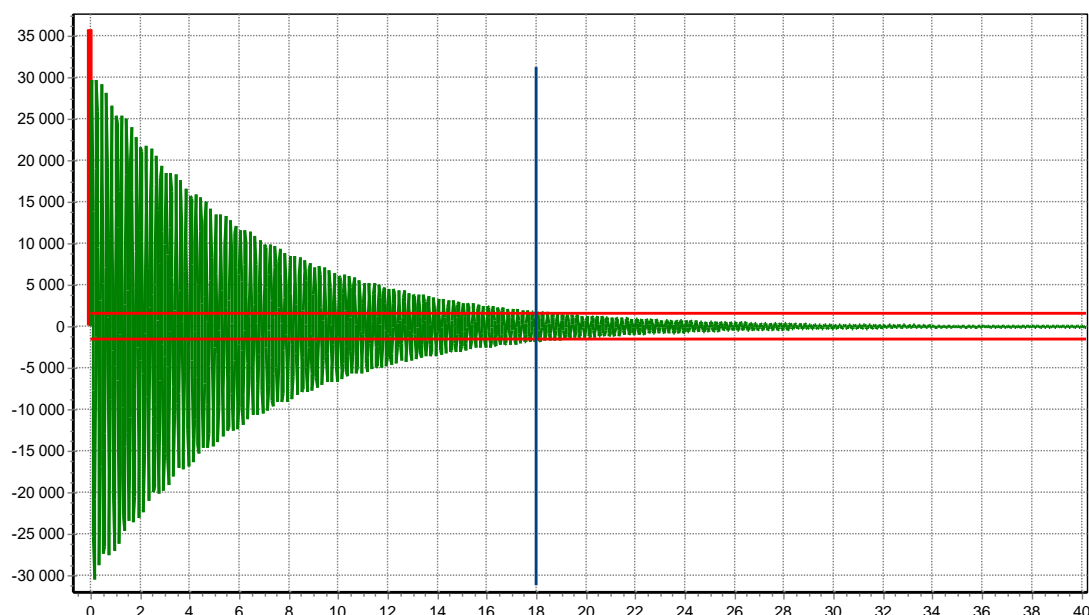


Рис. 1. Весовая функция колебательного звена с параметрами $\xi = 0,005$ и $\omega = 5000$ Гц (длительность переходного процесса – 18 мс)

Fig. 1. Weight function of an oscillatory link with parameters $\xi = 0,005$ and $\omega = 5000$ Hz. (the duration of the transient process is 18 ms)

правильной структуры металла). В основе метода лежит оценка длительности переходного процесса колебательного звена:

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

где K – коэффициент усиления звена; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота собственных незатухающих колебаний звена, рад/с; F – частота собственных незатухающих колебаний звена, Гц; ξ – декремент затухания [13–16].

Весовая функция колебательного звена определена выражением:

$$g(t) = \frac{K\omega^2}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin(\omega\sqrt{1-\xi^2}t). \quad (1)$$

При $0 < \xi < 1$ из (1) очевидно, что чем меньше ξ , тем длительнее переходный процесс функции $g(t)$ (рис. 1).

Чтобы получить подобный график для исследуемого объекта, по нему необходимо нанести удар молотком. После этого звуковой сигнал снимается микрофоном и воспроизводится в виде графика переходного процесса. Затем определяется длительность переходного процесса и сравнивается с эталонной. При их несовпадении делается заключение о наличии внутренних дефектов в объекте диагностики (см. рис. 1). Данный метод диагностики имеет следующие методические погрешности:

1. Диагностику технических объектов железной дороги невозможно проводить в полной тишине. Посторонние шумы бесконечны по длительности и не дают возможности найти точку завершения переходного процесса. Для устранения этого недостатка на графике проложены линии верхнего и нижнего предела переходного процесса. Завершением переходного процесса считается точка, в которой колебания становятся меньше допустимого. На рис. 1 эта точка отмечена вертикальной линией, устанавливаемой вручную оператором. Опытным путем верхний и нижний пределы переходного процесса выбраны как $\pm 5\%$ от диапазона измерения микрофона.

2. Первоначальная амплитуда колебаний переходного процесса определяется силой тестирующего удара, поэтому длительность переходного процесса зависит не только от параметров системы, но и силы удара. Чтобы избежать этой методической погрешности, тестирующий удар в комплексе «ИМК» наносится молотком с электрическим ударником, что гарантирует стабильную силу удара. Однако длительность переходного процесса зависит не только от силы удара, но и от наклона ударного инструмента, загрязнения поверхности, точки нанесения удара по объекту контроля, точки установки микрофона на объекте контроля, расстояния от микрофона до объекта контроля и т.п. Вопрос влияния случай-

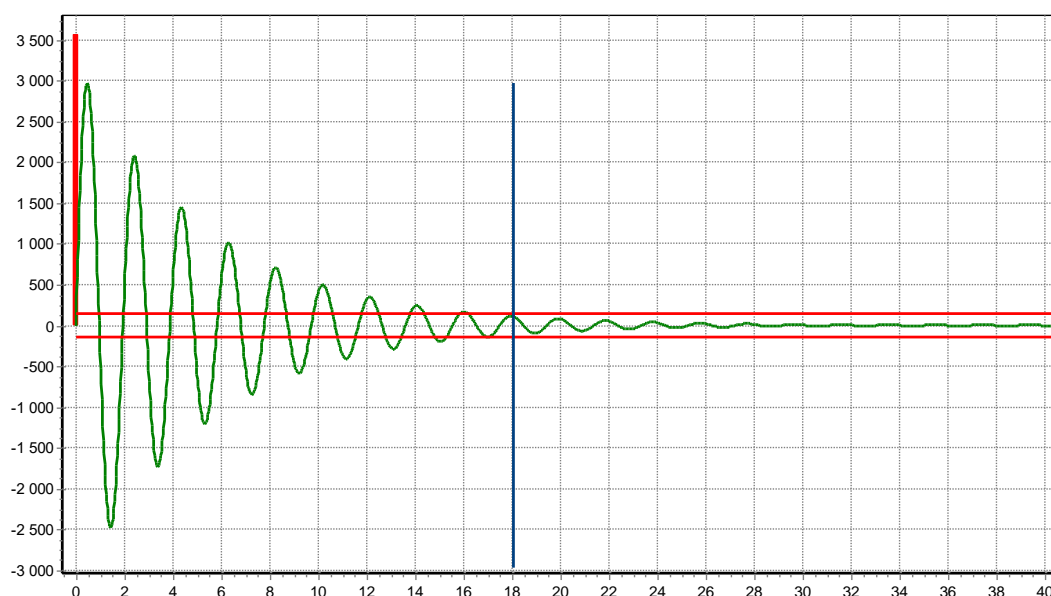


Рис. 2. Весовая функция колебательного звена с параметрами $\xi = 0,057$ и $\omega = 515$ Гц (длительность переходного процесса 18 мс)

Fig. 2. Weight function of an oscillatory link with parameters $\xi = 0,057$ and $\omega = 5000$ Hz (the duration of the transient process is 18 ms)

ных факторов на точность измерения до настоящего времени не исследован.

3. Длительность переходного процесса зависит не только от декремента затухания ξ , но и от частоты ω , т.е. по длительности переходного процесса невозможно судить об изменении внутренней структуры объекта контроля. Так, на рис. 2 показан пример объекта контроля, имеющий примерно равную длительность переходного процесса с объектом контроля, показанном на рис. 1. Однако параметры ξ и ω этих объектов отличаются почти в 10 раз. Влияние внутренней структуры объекта исследования на длительность переходного процесса до настоящего времени не исследована.

4. На длительность переходного процесса влияют параметры ξ и ω . На рис. 1 и 2 показаны результаты моделирования элементарного колебательного звена. На практике динамическая структура объекта контроля гораздо сложнее и непредсказуема. Методики исследования подобных динамических структур не нашли применения на практике диагностирования технических объектов. На рис. 3 и 4 показан пример измерения длительности переходного процесса опыт-

ного образца объекта контроля.

Исследуемый объект невозможно описать двумя параметрами – ξ и ω . Можно говорить об обобщенном показателе параметра ξ и нескольких ω .

Возникает актуальная практическая задача исследования методических погрешностей существующих принципов неразрушающего контроля.

Для оценки методических погрешностей программного обеспечения комплексов неразрушающего контроля было проведено исследование пяти деталей типа «втулка», одна из которых показана на рис. 5. Геометрические размеры объектов контроля приведены в табл. 1.

При проведении исследований по деталям наносились удары молотком весом 0,3 кг с различными характеристиками (сила удара, направление удара), при этом не допускалось их физическое повреждение. Запись велась на микрофон с частотой дискретизации 44 Гц и разрядностью звука 16 бит.

Исследование проводилось в три этапа:

1. Снимались характеристики переходного процесса неповрежденных деталей.

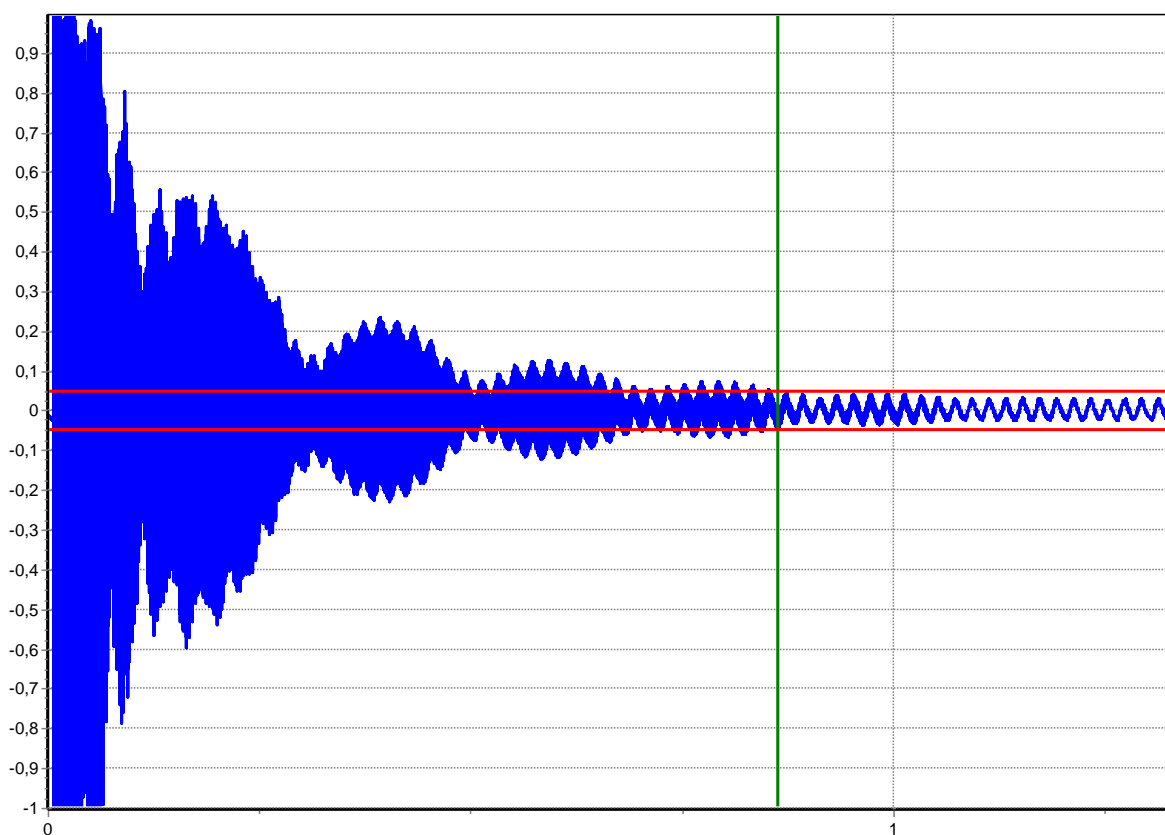


Рис. 3. Переходный процесс реального объекта (длительность переходного процесса 0,85 с)

Fig. 3. Transient process of a real object (the duration of the transient process is 0,85 s)

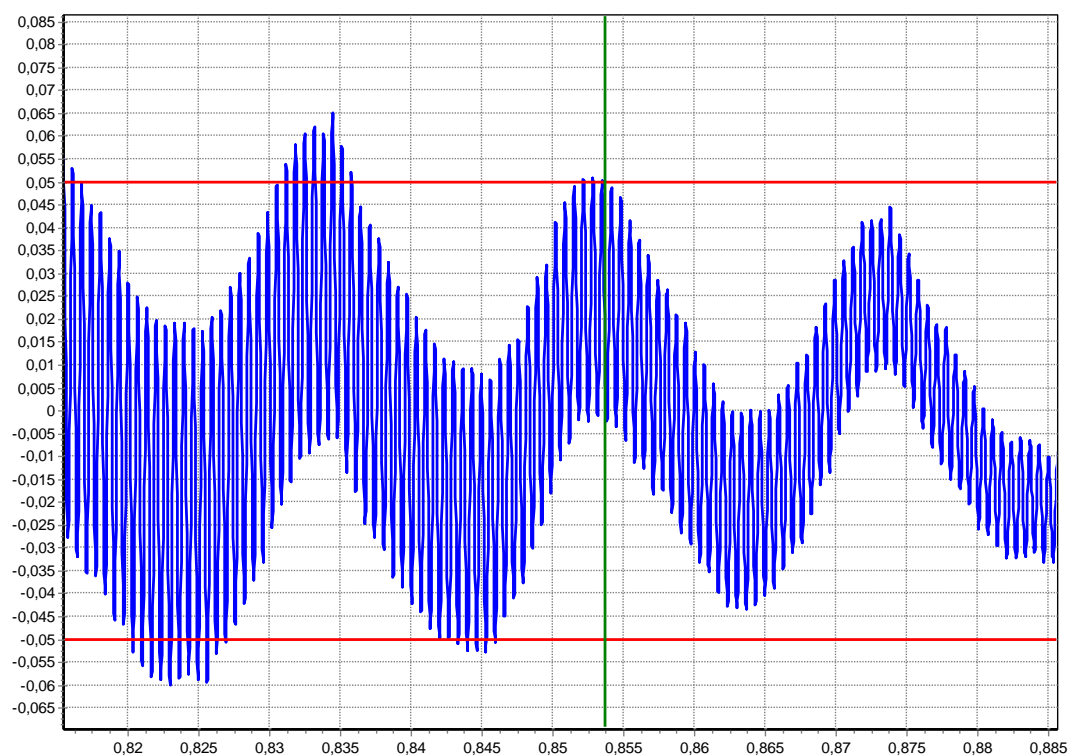


Рис. 4. Увеличенный участок из рис. 3 в точке измерения переходного процесса
Fig. 4. The enlarged section from fig. 3 at the transient process measurement point



Рис. 5. Объект контроля (исследуемая деталь № 001)
Fig. 5. Object of control (test item No. 001)

2. Снимались характеристики тех же деталей, зашлифованных ножовочным полотном.

3. Глубина зашлафовки увеличивалась с помощью угловой шлифовальной машины (болгарки).

На каждом этапе для всех деталей проводилось по десять испытаний ударом молотком с целью оценки статистической погрешности измерения длительности переходного процесса.

Таблица 1. Геометрические размеры исследуемых деталей (мм)
Table 1. The geometric dimensions of the researched parts (mm)

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

Таблица 2. Оценка длительности переходного процесса T_1 недеформированных деталей
Table 2. Duration estimate of the transient process T_1 of undeformed parts

Деталь Part	T_{1min}, c	T_{1max}, c	$m_{T_1}^*, c$	$\sigma_{T_1}^*, c$	Относительная погрешность измерения $\pm \frac{\sigma_{T_1}^*}{m_{T_1}^*}, \%$ Relative measurement error
001	0,84	2,52	1,62	0,49	30,0
002	1,36	2,37	1,98	0,15	7,7
003	1,22	1,64	1,35	0,08	6,0
004	1,12	1,98	1,55	0,27	17,0
008	0,60	1,65	0,93	0,25	27,0

Результаты испытаний первого этапа приведены в табл. 2.

На втором этапе замерялась длительность переходного процесса после удара по деформированным деталям. Для деформации была ис-

пользована ножовка по металлу. Размеры надпилов указаны в табл. 3, фотографии деталей – рис. 6. Результаты испытаний второго этапа приведены в табл. 4.

Таблица 3. Параметры надпила исследуемых деталей на втором этапе
Table 3. Parameters for notching the studied parts at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Cutting depth, mm	Ширина реза, мм Cutting width, mm
001	17	1,5
002	15,1	1,5
003	22	1,5
004	23,2	1,5
008	24,5	1,5



Рис. 6. Фотография детали, деформированной ножовкой по металлу
Fig. 6. Photo of a hacksaw deformed part

Таблица 4. Оценка длительности переходного процесса деталей T_2 , деформированных при помощи ножовки по металлу**Table 4.** Duration estimate of the transient process T_2 of hacksaw deformed parts

Деталь Part	T_{2min}, c	T_{2max}, c	$m_{T_2}^*, c$	$\sigma_{T_2}^*, c$	Относительная погрешность измерения Relative measurement error $\pm \frac{\sigma_{T_2}^*}{m_{T_2}^*}$	$m_{T_1}^*, c$	Относительная разница между Relative difference between $\pm \frac{m_{T_2}^* - m_{T_1}^*}{m_{T_2}^*}$
001	0,53	1,66	0,88	0,29	33%	1,62	-46%
002	1,03	2,26	1,58	0,34	22%	1,98	-20%
003	0,58	0,68	0,63	0,03	4%	1,35	-53%
004	1,83	2,52	2,28	0,13	6%	1,55	47%
008	0,56	0,88	0,71	0,08	11%	0,93	-14%

На третьем этапе детали деформировались при помощи угловой шлифовальной машины (болгарки). Размеры надпилов указаны в табл. 5, фотографии деталей, поврежденных болгаркой, показаны на рис. 7. Результаты испытаний третьего этапа приведены в табл. 6.

В рамках данной работы в общей сложности было выполнено 150 испытаний. Экспе-

рименты показали, что в целом существующая методика позволяет отличать годные детали от дефектных. Однако погрешности измерения достаточно большие, поэтому вероятность ошибок первого и второго рода (т.е. вероятность пропуска дефекта и выбраковка годной детали) также велики. Особенно это заметно в случае небольших дефектов.

Таблица 5. Параметры надпила исследуемых деталей на втором этапе**Table 5.** Parameters for notching the studied parts at the second stage

Деталь Part	Глубина реза, мм Cutting depth, mm	Ширина реза, мм Cutting width, mm
001	24,5	3,5
002	32	3,5
003	27	3,5
004	44	3,5
008	41	3,5

**Рис. 7.** Фотография детали, деформированной угловой шлифовальной машиной**Fig. 7.** Photograph of an angle grinder deformed part

Таблица 6. Оценка длительности переходного процесса деталей T_3 , деформированных болгаркой
Table 6. Duration estimate of the transient process T_3 of angle grinder deformed parts

Деталь Part	T_{3min}, c	T_{3max}, c	$m_{T_3}^*, c$	$\sigma_{T_3}^*, c$	Относительная погрешность измерения Relative measurement error $\pm \frac{\sigma_{T_3}^*}{m_{T_3}^*}, \%$	$m_{T_1}^*, c$	Относительная разница между Relative difference between $\pm \frac{m_{T_3}^* - m_{T_1}^*}{m_{T_1}^*}, \%$
001	1,35	2,0	1,73	0,16	9	1,62	-7
002	0,93	1,24	1,09	0,1	9	1,98	45
003	0,49	0,80	0,7	0,08	11	1,35	-65
004	1,91	3,41	2,51	0,39	16	1,55	62
008	0,33	1,27	0,73	0,18	25	0,93	68

Главный вывод по работе заключается в том, что чувствительность существующего метода недостаточна для практического применения. Именно это объясняет малую номенклатуру объектов, для которых можно использовать комплексы для неразрушающего контроля серии «ИМК». В то же время очевидна насущная необходимость в таких системах. Подобные методы достаточно широко распространены в строительстве [16–18]. Авторы имеют большой опыт в решении подобных задач [18, 19]. Метод решения задачи – спектральный анализ. Из теории колебаний известно, что, зная во времени закон движения масс деформируемой системы (например, боковых рам тележек и цельнокатанных колес грузовых вагонов, втулок, исследованных в данной работе и других деталей), мож-

но дать оценку ее жесткости и прочности. Для дефектоскопии детали необходимо построить спектр ее переходного процесса (рис. 8).

Заключение

По результатам эксперимента на рис. 8 выявлены пять гармоник с частотами 47,5, 1516, 4273, 8125 и 8190 Гц. Данные гармоники с большой степенью приближения будем считать равными собственным незатухающим колебаниям соответствующего колебательного звена. Исходя из наличия пяти гармоник, можно предположить, что динамическая структура детали 001 состоит, соответственно, из пяти колебательных звеньев. В самом общем виде частоты гармоник собственных незатухающих колебаний исследуемой детали

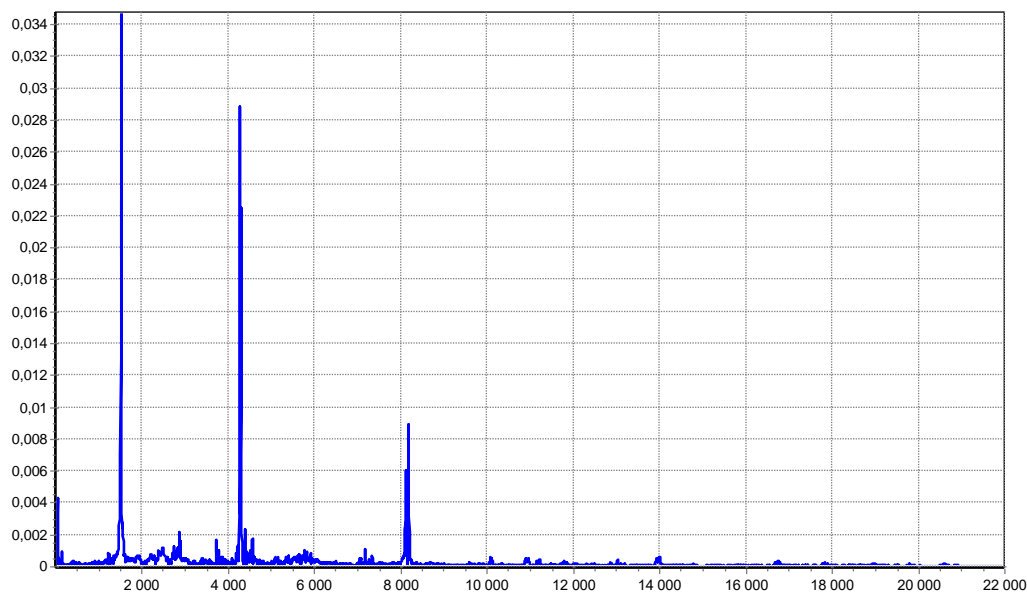


Рис. 8. Спектр переходного процесса детали 001 в исходном состоянии
Fig. 8. Spectrum of the transient process of part 001 in the initial state

можно представить как

$$\omega_i = \sqrt{\frac{c_i}{m}}, \quad (2)$$

где ω_i – частота i -й гармоники собственных незатухающих колебаний исследуемой детали; m – масса детали; c_i – коэффициент, характеризующий жесткость детали по i -й гармонике.

Из (2) следует, что при наличии дефекта

изменяются коэффициенты c_i и, соответственно, частоты ω_i . При значительных дефектах некоторые гармоники могут пропадать и к старым добавляться новые.

Изменение частот гармоник и их числа в спектре делают данный метод достаточно чувствительным и надежным для выявления даже незначительных дефектов.

Список литературы

1. Об изменении периодичности плановых видов ремонта грузовых вагонов колеи 1520 мм : приказ Министерства путей сообщения РФ от 18.12.1995 г. № 7ЦЗ. М. : МПС РФ, 1995 2 с.
2. О введении новой системы ремонта грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщ. Рос. Федерации 5.01.1999 г. № К-2у (Д). М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
3. О совершенствовании системы ремонта и технического обслуживания грузовых вагонов : указание Министерства путей сообщения Рос. Федерации от 6.12.1999 г. № К-2746у. М. : МПС РФ, 1999. 2 с.
4. 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 сообщения РФ от 17.04.2001 г. № П-671у. М. : МПС РФ, 2001. 17 с.
5. Правила эксплуатации и пономерного учета собственных грузовых вагонов : утв. на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту от 19.06.2001. Введ. 2001–09–01. М., 2001. 13 с.
6. Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол № 54 от 18-19 мая 2011 г. 136 с.
7. 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.
8. О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 18 с.
9. 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.
10. 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).
11. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientist and engineers. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.
12. Кочетков Ю.А. Основы автоматизации авиационного оборудования. М. : ВВИА, 1995. 574 с.
13. Муромцев Ю.Л. Основы автоматизации и системы автоматического управления. Ч. 1. Тамбов : Тамб. ГТУ, 2008. 96 с.
14. Серебряков А.С., Семенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика. М. : ЮРАЙТ, 2021. 477 с.
15. NDIS 2421. Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission. The Japanese Society for non-Destructive Inspection (NDIS). 2000.
16. Clough Ray W., Penzien J. Dynamics of Structures. New-York : McGraw-Hill book company, 1975. 320 p.
17. A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission / Shigenori Yuyama, Takahi&a Okamoto, Miteuhiro ShigeiaM et al. Acoustic emission Standards and Technology Update edited by SJ.Vahaviolos, American Society for Testing and Materials. STP1353. 1999. P. 25–40.
18. Кашковский В.В., Баранов Т.М. Особенности обработки информации автоматизированного деформационного мониторинга мостов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 503–510.
19. Кашковский В.В., Устинов. В.В. Система диагностирования и контроля прочностных свойств крыла воздушного судна // Науч. вестн. Моск. гос. техн. ун-та гражд. авиации. 2011. № 172. С. 171–177.

References

1. 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»].
2. 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»].
3. 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»].
4. 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 vy-

полненного объема работ на железных дорогах Российской Федерации» [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»].

5. Правила эксплуатации и полнормного учета собственных грузовых вагонов. Утверждены на 29 заседании Совета по железнодорожному транспорту. Дата введения в действие: 01.09.2001 г. [Rules of operation and measurement of own freight wagons. Approved for the 29th meeting of the Railway Transport Council. Effective date: September 01, 2001].

6. «Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов». Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол № 54 от «18-19» мая 2011 г. [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.

7. Положения о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества Протокол № 57 от «16-17» октября 2012 г. [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].

8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2759р «О системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов» [Order of the JSC «Russian Railways» No. 2759r dated December 29, 2012 «On the system of maintenance and repair of freight wagons»].

9. Распоряжение ОАО «РЖД» N 2633/р от 07.12.2018 г «Об утверждении руководства по текущему отсечному ремонту (TR-1)». [Order of JSC «Russian Railways» no 2633/r dated December 07, 2018 «Manual for current uncoupling repair (TR-1)»].

10. Clean technologies group (Elektronnyi resurs) [Clean technologies group (Electronic resource)]. Available at: <https://ctg.su/produkcija/oborudovanie/kompleksy-dlya-vysokodostovernogo-nerazrushayushhego-kontrolya/seriya-imk-intellektualnye-molotki-kontrolya> (Accessed 15.06.2022).

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

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

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

14. Serebryakov A.S., Semenov D.A., Chernov E.A. Avtomatika [Automation]. Moscow: URAIT Publ., 2021. 477 p.

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

16. Clough Ray W., Penzien J. Dynamics of Structures. New-York : McGraw-Hill book company, 1975. 320 p.

17. Shigenori Yuyama, Takahi&a Okamoto, Miteuhiro ShigeiaM et al. 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.

18. Kashkovskii V.V., Baranov T.M. Osobennosti obrabotki informatsii avtomatizirovannogo deformatsionnogo monitoringa mostov [Features of processing information of automated deformation monitoring of bridges]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2012, vol. 1, pp. 503–510.

19. Kashkovskii V.V., Ustinov. V.V. Sistema diagnostirovaniya i kontrolya prochnostnykh svoystv kryla vozдушного судна [The system for diagnosing and monitoring the strength properties of an aircraft wing]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2011, no. 172, pp. 171–177.

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.

Корнило Юлия Александровна, кафедра информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kornilo.00@mail.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.

Yuliya A. Kornilo, Department of Information systems and information security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kornilo.00@mail.ru.