

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
ПРИ ПОМОЩИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ**

В. Л. ТКАЛИЧ¹, М. Е. КАЛИНКИНА^{1*}, А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ^{1,2},
О. И. ПИРОЖНИКОВА¹, **С. В. БИБИКОВ¹**

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*mariia_kalinkina@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности методов оценивания технического состояния при вибродиагностике электрооборудования. Проанализированы средства измерения вибрационных процессов, рассмотрены спектры амплитуд вибрации транспортных двигателей. Анализ показал, что при поиске предельных значений модуля характеристической функции для мгновенных значений виброакустических сигналов, которые соответствуют разным состояниям контролируемого объекта, требуется применение статистических методов, в частности метода минимальных рисков. Это позволяет находить пороговые значения признаков диагностирования на базе оценки рисков принятия решения. В ходе анализа виброакустического сигнала использована характеристическая функция мгновенных значений. Исследована плотность вероятностей значений модуля этой функции наиболее точным методом минимального числа ошибочных решений.

Ключевые слова: оценка технического состояния, характеристическая функция, виброакустический сигнал, неразрушающий контроль, метод Неймана—Пирсона

Благодарности: работа выполнена при поддержке фонда конкурса гранта Президента для государственной поддержки молодых российских ученых кандидатов наук. Регистрационный номер МК 5323.2022.4.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., Бибилов С. В. Методы оценки технического состояния транспортного средства при помощи вибродиагностики // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 287—294. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-287-294.

METHODS FOR ASSESSING A VEHICLE TECHNICAL CONDITION USING VIBRATION DIAGNOSTICS

V. L. Tklich¹, M. E. Kalinkina^{1*}, A. G. Korobeynikov^{1,2}, O. I. Pirozhnikova¹, **S. V. Bibikov¹**

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia
*mariia_kalinkina@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia

Abstract. The advantages and disadvantages of existing methods for assessing the technical condition of vibration diagnostics of electrical equipment are considered. Available means of measuring vibration processes are reviewed, and the spectra of vibration amplitudes of transport engines are examined. The analysis shows that when searching for the limiting values of the characteristic function modulus for the instantaneous values of vibroacoustic signals that correspond to different states of the controlled object, the use of statistical methods, in particular the method of minimal risks, is required. This allows to find the threshold values of the signs of diagnosis based on the assessment of the risks of making a decision. In the course of the analysis of the vibro-acoustic signal, the characteristic function of instantaneous values is used. The probability density of the values of the function modulus is studied by the most accurate method of the minimum number of erroneous decisions.

Keywords: technical condition assessment, characteristic function, vibroacoustic signal, non-destructive testing, Neumann-Pearson method

Acknowledgments: This work was supported by the Presidential Grant Competition Fund for State Support of Young Russian Scientists Candidates of Science. Registration number MK 5323.2022.4.

For citation: Tkalich V. L., Kalinkina M. E., A. G. Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I., Bibikov S. V. Methods for assessing a vehicle technical condition using vibration diagnostics. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 287—294 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-287-294.

Введение. Определение критериев неисправности транспортного средства через параметры виброакустического сигнала относится к актуальной задаче технического диагностирования. Развитие средств диагностики и неразрушающего контроля является важнейшим фактором повышения экономической эффективности при использовании электрооборудования. Совершенствование технического диагностирования необходимо для своевременного выявления неисправностей, ведущих к отказам, прогнозирования дальнейшего нормального работоспособного состояния — с целью полного использования ресурса транспортного средства.

Не все методы неразрушающего контроля [1—14] обладают свойством универсальности. Особое место в техническом диагностировании занимает виброакустический метод. Метод вибродиагностики прекрасно зарекомендовал себя при оценке технического состояния электрооборудования на транспортных средствах благодаря быстрому отклику вибропроцессов на изменение состояния объекта и возможности выявления скрытых дефектов [15] еще на стадии их возникновения. В основе метода вибродиагностики лежит анализ данных о вибрации: проанализировав амплитуду гармоник различной частоты, получают информацию о состоянии объекта.

Основные уравнения. Вибродиагностирование электродвигателя [16] необходимо для выявления дефектов, повышения ресурса и надежности работы транспортного средства. От метода [1—14] диагностирования во многом зависит и полученный результат. Для оценки технического состояния роторов на практике в основном применяют методы: ПИК-фактора; спектра огибающей; ударных импульсов; прямого спектра.

Метод ПИК-фактора позволяет определять зарождающиеся дефекты [15], он прост в реализации. К недостаткам метода можно отнести низкую помехозащищенность и неопределенности при выявлении дефектов из-за наличия в сигнале белого шума [17].

Метод спектральной огибающей используется при анализе замедленного изменения мощности на фоне быстропротекающих процессов. К достоинству метода можно отнести высокую чувствительность, а к недостаткам — большую трудоемкость и стоимость анализатора спектра вибраций при достоверности результатов примерно 60 %.

Метод ударных импульсов основан на изменении параметров механических волн, возникающих при ударе двух тел. К достоинствам метода можно отнести его простоту и рентабельность, однако метод дает большую погрешность при определении конкретных дефектов и обладает низкой помехозащищенностью.

Метод прямого спектра основан на анализе спектра вибрации. Он обладает высокой помехозащищенностью, информативностью, а также позволяет прогнозировать остаточный ресурс для каждого дефекта. К недостаткам метода можно отнести высокие требования по правильному выбору информационных частот для установки датчиков. Этот метод наиболее пригоден для использования в экспертных системах вибродиагностирования [18].

На качество оценки технического состояния транспортного средства влияет и выбор средств диагностирования. В настоящее время существует возможность получения информации одновременно от целого ряда датчиков и оперативного произведения обработки результатов [19—22] в реальном масштабе времени.

Анализируя спектры амплитуд [23], которые получаются при обработке вибрационных процессов двигателя [16], можно выявлять дефекты [24, 25].

Поэтому грамотному выбору средства измерения необходимо уделять повышенное внимание при вибродиагностировании.

Необходимо также обратить внимание на корректный выбор математических моделей [26, 27] при определении информативных частот. Поэтому специалист по вибродиагностике должен грамотно выбрать метод, средства и математический аппарат для получения качественного результата оценивания технического состояния объекта.

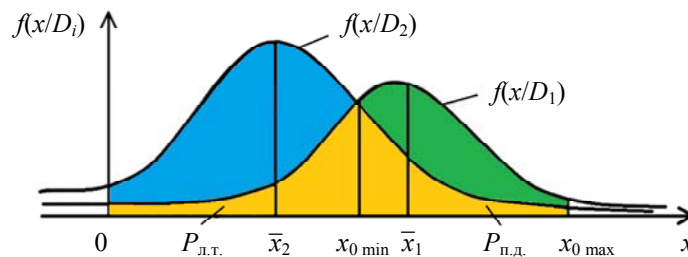
Разрабатывать систему [28] определяющих критериев возможных неисправностей необходимо на базе полученных совокупностей параметров виброакустических сигналов. Это позволяет достоверно определять техническое состояние электродвигателя. Обеспечение надежности и однозначности такого диагностирования является актуальной задачей неразрушающего контроля и диагностики объектов.

Для решения этой задачи необходимо развивать методологию принятия статистических решений и способов оценки рисков нормативных параметров так называемой характеристической функции. Оценивание модуля этой характеристической функции для заданного параметра позволяет принять решение об исправности объекта исследования или прекращении его эксплуатации вследствие выявленной неисправности при диагностике. Так, при $x < x_0$ объект признается неисправным, при $x > x_0$ — исправным:

$$\begin{cases} x \in D_1, & \text{при } x > x_0, \\ x \in D_2, & \text{при } x < x_0, \end{cases}$$

где D_1 — объект исправен, D_2 — объект неисправен.

На рисунке представлено распределение плотности вероятностей $f(x/D_i)$ от параметра x . Области $P_{л.т.}$ и $P_{п.д.}$ соответствуют вероятности ложной тревоги и пропущенного дефекта.



Состояние „ложная тревога“ относится к ошибке первого рода. При этом исправный объект может квалифицироваться как неисправный и D_1 засчитывается за D_2 . Состояние пропуска дефекта или не выявленного отказа относится к ошибке второго рода. При этом объект с неисправностью классифицируются как исправный и D_2 засчитывается как D_1 .

Вероятность ложной тревоги определяется как:

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(x < x_0/D_1) = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx = P_1 \cdot [1 - F(x_0/D_1)], \quad (1)$$

где H_{21} — ошибка второго рода; F — функция распределения.

Вероятность пропуска дефекта представляется выражением:

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(x > x_0/D_2) = P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx = P_2 \cdot F(x_0/D_2), \quad (2)$$

где H_{12} — ошибка первого рода.

Таким образом, вероятность выработки ошибочного решения напрямую зависит от вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. Назначив численные значения (цену риска C_{21} и C_{12}) истинным решениям в зависимости от их значимости, можно оценить риски:

$$R = C_{11}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1)dx + C_{21}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1)dx + C_{12}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2)dx + C_{22}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2)dx, \quad (3)$$

где C_{21} и C_{12} — риски ложной тревоги и пропущенного дефекта.

При этом выражение для среднего риска имеет вид:

$$R = C_{12}P(H_{12}) + C_{21}P(H_{21}) = C_{12}P_2 [F(x_0/D_2)] + C_{21}P_1 [1 - F(x_0/D_1)]. \quad (4)$$

С учетом того, что x является случайной величиной, (4) является математическим ожиданием риска.

При описании статистических характеристик диагностических признаков можно использовать распределение Вейбулла—Гнеденко, которое обладает достаточной универсальностью, при иных параметрах оно может иметь другой вид. Следовательно, представляется целесообразным опираться на аппроксимацию двухпараметрическим распределением с учетом четности функции:

$$F(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0, \\ 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{c} \right)^b \right\}; & x > 0, \end{cases} \quad (5)$$

а плотность вероятности представить в виде:

$$f(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0, \\ \frac{b}{c} \left(\frac{x}{c} \right)^{b-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x}{c} \right)^b \right\}; & x > 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $c > 0$, $b > 0$ — параметры масштаба и формы; x — случайная величина.

Граничное значение x_0 находится из уравнения:

$$\frac{f(x_0/D_1)}{f(x_0/D_2)} = \frac{P_2 \cdot (C_{12} - C_{22})}{P_1 \cdot (C_{21} - C_{11})} = \lambda, \quad (7)$$

где λ — порог принятия решения. Тогда (7) с учетом (6) примет вид:

$$f(x_0/D_1) = \frac{b_1}{c_1} \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1} \right\}, \quad f(x_0/D_2) = \frac{b_2}{c_2} \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2} \right\}, \quad (8)$$

где x_0 — граничное значение. В итоге получаем выражение:

$$\frac{\frac{b_1}{c_1} \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1} \right\}}{\frac{b_2}{c_2} \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2} \right\}} = \frac{P_2 \cdot C_{12}}{P_1 \cdot C_{21}}. \quad (9)$$

Условия методов принятия решений для определенных граничных значений x_0 диагностического параметра:

1) для метода минимального числа ошибочных решений — стоимость пропуска ложной тревоги и пропуска дефектов $\lambda = \frac{[P_2]}{[P_1]}$;

2) для метода наибольшего правдоподобия считаем, что стоимость и вероятность ложной тревоги равны аналогичным параметрам пропуска дефектов ($\lambda = 1$);

3) для метода минимакса — величина риска минимизируется и является наименьшей среди максимальных значений, связанных с „неблагоприятной“ величиной вероятности P_1

$$\left(\lambda = \frac{[(C_{12} - C_{22})(1 - P_1)]}{[(C_{21} - C_{11})P_1]} \right);$$

4) для метода Неймана—Пирсона считаем, что минимизируется вероятность P_1 пропуска дефектов для заданного допустимого уровня A , называемого вероятностью ложной тревоги

$$P_1 \int_{x_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right) dx \leq A.$$

В ходе обработки результатов расчетов граничного значения, полученных вышеперечисленными методами, установлено, что наименьшие риск принятия решения R и вероятность пропуска дефекта дает метод минимального числа ошибочных решений. Вторым результатом показал метод Неймана—Пирсона, а на последнем месте стоит метод минимакса.

Заключение. Анализ показал, что при поиске предельных значений модуля характеристической функции для мгновенных значений виброакустических сигналов, которые соответствуют разным состояниям контролируемого объекта, требуется применение статистических методов. Это позволяет находить пороговые значения признаков диагностирования на базе оценки рисков принятия решения. Целесообразно для диагностики использовать методы расчета параметров характеристических функций. В ходе анализа виброакустического сигнала использована характеристическая функция мгновенных значений. Исследована плотность вероятностей значений модуля этой функции наиболее точным методом минимального числа ошибочных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капустин В. В., Ушаков А. Л., Бакайкин Д. В. Применение акустических методов для обследования строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 25—28.
2. Капустин В. В. Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 12—16.
3. Бауков А. Ю. Разработка основ дифференциального виброакустического метода контроля многослойных конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 6. С. 126—132.
4. Павлов С. В. Применение вейвлет-анализа при обработке данных виброакустического метода контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 8. С. 118—123.
5. Баранов А. В. Диагностика состояния трущихся поверхностей методом ультразвуковой акустической эмиссии // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 55—56.
6. Блинов А. В., Максимов П. В., Шиверский А. В., Горохов А. Ю. Определение дефектов и повреждений трубопровода путем анализа волновых процессов методом дискретного преобразования Фурье // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-3 [Электронный ресурс]: <<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23345>>.
7. Алёшин Н. П., Ревель-Муроз П. А., Григорьев М. В., Прилуцкий М. А. Новые методы ультразвукового контроля внутритрубной диагностики магистральных нефтепроводов // Сварка и диагностика. 2016. № 1. С. 9—13.
8. Иляхинский А. В., Родюшкин В. М. Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 13—16.
9. Борейко Д. А., Быков И. Ю., Смирнов А. Л. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 24—33.

10. Матвиенко А. Ф., Корзунин Г. С., Лоскутов В. Е., Бабкин С. А. Опыт контроля состояния труб магистральных газопроводов электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 28—37.
11. Бардаков В. В., Барат В. А., Терентьев Д. А., Чернов Д. В., Осипов К. О. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых конструкций // Контроль. Диагностика. 2016. № 1. С. 32—39.
12. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Лунев А. Г. О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43, № 1. С. 202—204.
13. Бауков А. Ю., Павлов С. В. Компьютерное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода неразрушающего контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 5. С. 77—83.
14. Лабковская Р. Я., Козлов А. С., Пирожникова О. И., Коробейников А. Г. Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Кибернетика и программирование. 2014. № 5. С. 70.
15. Хатьков Д. Н., Хатьков Н. Д. Поиск трещинообразных дефектов в массивных телах сложной конфигурации на основе использования метода локальных свободных колебаний // Научная сессия ТУСУР-2008: Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 5—8 мая 2008. 2008. Ч. 1. С. 174—176.
16. Тобоев В. А., Толстов М. С. Устройство для акустической диагностики состояний автомобильных двигателей // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Матер. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары, 2012. С. 185—186.
17. Базулин Е. Г. Уменьшение уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 3—19.
18. Рудин А. В., Рудин В. А. Экспериментальная диагностика деталей машин по спектральным характеристикам сигналов акустической эмиссии // Наука и образование транспорту: Матер. 3-й Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 130-летию транспортного образования в Пензенской области (Пензенского техникума железнодорожного транспорта). Самара—Пенза, 11—12 ноября 2010. 2010. С. 204—206.
19. Черникова Т. М., Иванов В. В. Принципы построения автоматизированной системы контроля разрушения материалов // 10-я Междунар. науч.-практ. конф. „Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах“. Кемерово, 28—29 ноября 2013. С. 104—106.
20. Овчарук В. Н., Пурицев Ю. А., Цинь Хуну. Информационно-измерительная система регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 25—27 июня 2013. 2013. С. 261—265.
21. Верлань А. Ф., Сагатов М. В., Ирмухамедова Р. М., Кадыров М. М. Цифровые системы измерения и обработки сигналов акустической эмиссии // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-25): Сб. тр. 25-й Междунар. науч. конф. Саратов, 29—31 мая 2012. 2012. Т. 6. С. 36—38.
22. Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю., Святкина М. Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 9—20.
23. Овчарук В. Н., Лях А. П. Программный комплекс анализа спектральных характеристик акустической эмиссии // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 25—27 июня 2013. 2013. С. 255—260.
24. Ивакин С. В., Байтураков А. В., Сивак Г. А. Установка для проведения акустических исследований // Всерос. науч. конф. „Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем“ (Системотехника-2011). Таганрог, 1 ноября 2011. С. 41—46.
25. Korobeynikov A. G., Grishentsev A. Y., Velichko E. N., Aleksanin S. A., Fedosovskii M. E., Bondarenko I. B., Korikov C. C. Calculation of Regularization Parameter in the Problem of Blur Removal in Digital Image // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25, N 3. P. 184—191.
26. Черкасский Е. П., Порсева Н. Ю. Стендовые виброакустические испытания кузовных деталей и силовых агрегатов автомобилей // Математическое моделирование и краевые задачи. Тр. 5-й Всерос. науч. конф. с международным участием. Самара, 29—31 мая 2008. Ч. 4. С. 135—139.

27. Тананаев Д. Д., Шагрова Г. В. Математическая модель определения состояния технического объекта на основе анализа акустического сигнала // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании (Инфоком-6): Сб. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Ставрополь, 21—27 апреля 2014. Ч. 2. С. 246—255.
28. Модин А. Ю. Автоматизированная система обработки акустических сигналов при диагностике сварных соединений // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 9 Всерос. Межвуз. науч.-практ. конф. Самара, 18 ноября 2010. С. 128—130.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Мария Евгеньевна Калининна** — магистрант; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru
- Сергей Викторович Бибииков** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий;

Поступила в редакцию 08.12.21; одобрена после рецензирования 22.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Kapustin V.V., Ushakov A.L., Bakaykin D.V. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 1, pp. 25–28. (in Russ.)
2. Kapustin V.V. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 12, pp. 12–16. (in Russ.)
3. Baukov A.Yu. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2007, no. 6, pp. 126–132. (in Russ.)
4. Pavlov S.V. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2007, no. 8, pp. 118–123. (in Russ.)
5. Baranov A.V. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii*, 2014, no. 2, pp. 55–56. (in Russ.)
6. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23345>. (in Russ.)
7. Aloshin N.P., Revel'-Muroz P.A., Grigor'yev M.V., Prilutskiy M.A. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, pp. 9–13. (in Russ.)
8. Ilyakhinskii A.V., Rodyushkin V.M. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 7, pp. 396–399.
9. Boreiko D.A., Bykov I.Y., Smirnov A.L. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 8, pp. 476–485.
10. Matvienko A.F., Loskutov V.E., Babkin S.A., Korzunin G.S. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 9, pp. 546–553.
11. Bardakov V.V., Barat V.A., Terentyev D.A., Chernov D.V., Osipov K.O. *Testing. Diagnostics*, 2016, no. 1, pp. 32–39. (in Russ.)
12. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, no. 1(43), pp. 168–170.
13. Baukov A.Yu., Pavlov S.V. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2005, no. 5, pp. 77–83. (in Russ.)
14. Labkovskaya R.Ya., Kozlov A.S., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G. *Kibernetika i programmirovaniye*, 2014, no. 5, pp. 70–77. (in Russ.)
15. Khat'kov D.N., Khat'kov N.D. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2008* (Scientific session TUSUR-2008), Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists, Tomsk, May 5–8, 2008, pt. 1, pp. 174–176. (in Russ.)
16. Toboev V.A., Tolstov M.S. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike (ITEE-2012)* (Information Technologies in Electrical Engineering and Electric Power Industry (ITEE-2012)), Proc. of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference Cheboksary, 2012, pp. 185–186. (in Russ.)
17. Bazulin E.G. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 9, pp. 525–539.
18. Rudin A.V., Rudin V.A. *Nauka i obrazovaniye transportu* (Science and Education in Transport), Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 130th Anniversary of Transport Education in the Penza Region (Penza Technical School of Railway Transport), Samara–Penza, November 11–12, 2010, pp. 204–206. (in Russ.)

19. Chernikova T.M., Ivanov V.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy v promyshlennno razvitykh regionakh* (Life Safety of Enterprises in Industrialized Regions), Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, November 28–29, 2013, pp. 104–106. (in Russ.)
20. Ovcharuk V.N., Purisev Yu.A., Qin Hongwu, *Informatsionnyye tekhnologii i vysokoproizvoditel'nyye vychisleniya* (Information Technology and High Performance Computing), Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Khabarovsk, June 25–27, 2013, pp. 261–265. (in Russ.)
21. Verlan A.F., Sagatov M.V., Irmukhamedova R.M., Kadyrov M.M. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-25)* (Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-25)), Proc. of the 25th International Scientific Conference, Saratov, May 29–31, 2012, vol. 6, pp. 36–38. (in Russ.)
22. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu., Svyatkina M.N. *Kibernetika i programmirovaniye*, 2013, no. 3, pp. 9–20. (in Russ.)
23. Ovcharuk V.N., Lyakh A.P. *Informatsionnyye tekhnologii i vysokoproizvoditel'nyye vychisleniya* (Information Technology and High Performance Computing), Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Khabarovsk, June 25–27, 2013, pp. 255–260. (in Russ.)
24. Ivakin S.V., Baituryakov A.V., Sivak G.A. *Teoreticheskiye i metodicheskiye problemy effektivnogo funktsionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem (Sistemotekhnika-2011)* (Theoretical and Methodological Problems of the Effective Functioning of Radio Engineering Systems (System Engineering-2011)), Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Taganrog, November 1, 2011, pp. 41–46. (in Russ.)
25. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A., Fedosovskii M.E., Bondarenko I.B., Korikov C.C. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2016, no. 3(25), pp. 184–191.
26. Cherkassky E.P., Porseva N.Yu. *Matematicheskoye modelirovaniye i krayevyye zadachi* (Mathematical Modeling and Boundary Value Problems), Proc. of the 5th All-Russian Scientific Conference with International Participation, Samara, May 29–31, 2008. Pt. 4, pp. 135–139. (in Russ.)
27. Tananaev D.D., Shagrova G.V. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii v nauke, proizvodstve i obrazovanii (Infokom-6)* (Infocommunication Technologies in Science, Production and Education (Infocom-6)), Proc. of the 6th International Scientific and Technical Conference, Stavropol, April 21–27, 2014, Pt 2, pp. 246–255. (in Russ.)
28. Modin A.Yu. *Komp'yuternyye tekhnologii v nauke, praktike i obrazovanii* (Computer Technologies in Science, Practice and Education), Proc. of the 9th All-Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference, Samara, November 18, 2010, pp. 128–130. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Vera L. Tkalich | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru |
| Mariia E. Kalinkina | — Undergraduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru |
| Anatoly G. Korobeynikov | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director for Research; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru |
| Olga I. Pirozhnikova | — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru |
| Sergey V. Bibikov | — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; |

Received 08.12.21; approved after reviewing 22.12.21; accepted for publication 28.02.22.