

УДК 004.932.2  
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

## ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ

**А. В. Григорьев**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
kipra@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Вибрационный сигнал, генерируемый или преобразуемый объектом, как естественного, так и техногенного происхождения несет большой объем информации о состоянии и свойствах этого объекта. Это обстоятельство способно оказать большую помощь в деле обеспечения безопасности нашей жизни и в других сферах, но при условии правильного извлечения и интерпретации этой информации. Несовершенство применяемых в настоящее время методов измерения параметров вибрации является препятствием к достижению поставленной цели. Это препятствие предлагается преодолеть посредством внедрения новой методологии измерения параметров вибрации. *Материалы и методы.* Сущность предлагаемой методологии заключается в том, что вместо последовательности разнесенных во времени мгновенных значений измеряемого параметра вибрации или комплексного функционала, составленного из значений нескольких таких параметров, анализируется изображение нанесенной на поверхность объекта контроля круглой метки. Регистрирующее устройство формирует серии изображений круглой метки, как с вибрационным размытием, так и без такового. Об интенсивности вибрационного процесса судят на основе анализа серии относительных вибрационных приращений площади изображения круглой метки с вибрационным размытием. *Результаты и выводы.* Изложен принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала. Представлено семейство кривых, отражающих приведенную методическую погрешность измерения интенсивности вибрации на основе анализа вибрационного приращения площади изображения круглой метки. Рассмотрен числовой пример определения предельной абсолютной методической погрешности такого измерения. Проведено сравнение показателей представленного в статье метода измерения с аналогичными показателями контактного виброметра *BALTECH VP-3470-Ex*.

**Ключевые слова:** вибрация, измерение, изображение, круглая метка, размытие, вибрационное перемещение, вибрационное приращение, площадь изображения, пиксел

**Для цитирования:** Григорьев А. В. Оценка методической погрешности измерения общего уровня вибрации на основе анализа размытия изображения круглой метки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 24–30. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

## EVALUATION OF THE METHODOLOGICAL ERRORS OF MEASURING THE GENERAL VIBRATION LEVEL BASED ON THE IMAGE BLUR ANALYSIS OF A ROUND BAR

**A.V. Grigoriev**

Penza State University, Penza, Russia  
kipra@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* A vibration signal generated or transformed by an object, both natural and man-made, carries a large amount of information about the state and properties of this object. This circumstance can be of great help in ensuring the safety of our lives in other areas, but subject to the correct extraction and interpretation of this information. The imperfection of currently used methods for measuring vibration parameters is an obstacle to achieving this goal. This obstacle is proposed to be overcome by introducing a new methodology for measuring vibration parameters. *Materials and methods.* The essence of the proposed methodology lies in the fact that instead of a sequence of time-spaced instantaneous values of the measured vibration parameter or a complex functional composed of the values of several such parameters, an image of a round mark applied to the surface of the test object is analyzed. The recording device forms a series of images of a round mark, both with and without vibration blur. The intensity of the vibrational process is judged based on the analysis of a series of relative vibrational increments of the image area of a round mark with vibrational

blur. *Results and conclusions.* The principle of vibration signal intensity estimation is stated. A family of curves is presented, reflecting the reduced methodological error of measuring the intensity of vibration based on the analysis of the vibrational increment of the area of the image of a round mark. A numerical example of determining the limiting absolute methodological error of such a measurement is considered. The indicators of the measurement method presented in the article are compared with those of the contact vibrometer *BALTECH VP-3470-Ex*.

**Keywords:** vibration, measurement, image, round mark, blur, vibration displacement, vibration increment, image area, pixel

**For citation:** Grigoriev A.V. Evaluation of the methodological errors of measuring the general vibration level based on the image blur analysis of a round bar. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):24–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

### Введение

Вибрационный сигнал несет большой объем информации о состоянии, внутренней структуре и свойствах объекта контроля. При этом объекты контроля могут быть самые различные: радиоэлектронная аппаратура, машины и механизмы, пешеходные, автомобильные и железнодорожные мосты, здания и сооружения, фрагменты литосферы Земли и др. [1]. По причине несовершенства существующих методов измерения и анализа вибраций в настоящее время используется только очень небольшая часть этой информации [2]. Предпринимается попытка восполнить этот пробел с помощью новой методологии измерения параметров вибрации, в которой анализ ряда разнесенных во времени мгновенных значений этих параметров заменен анализом изображения тестового объекта круглой формы (круглой метки) с вибрационным размытием [3–6]. Методики восстановления геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки и поиска периферийных точек главного линейного сечения этого следа изложены в статьях [7] и [8] соответственно. Весьма плодотворным представляется подход, в котором структурный анализ следа вибрационного размытия изображения круглой метки сочетается с его анализом статистическим [9]. А в статье [10] проведено исследование возможности применения анализа изображения круглой метки для контроля технического состояния механизмов. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении элемента поверхности проведен в статье [11].

### Принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала

На рис. 1 представлена схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием.

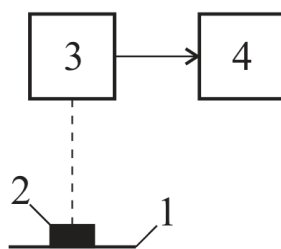


Рис. 1. Схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием

Принцип измерения заключается в том, что на поверхности объекта контроля 1 закрепляется тестовый объект круглой формы (круглая метка) 2. Способы закрепления могут быть различными, например, это может быть нанесение плоского объекта круглой формы краской на поверхность, прикрепление скотчем листка бумаги, на котором изображен такой объект и т.д. Изображение круглой метки 2 фиксируется регистрирующим устройством 3, в качестве которого может выступить, например, видекамера. Изображение, сформированное регистрирующим устройством 3, передается в вычислительное устройство 4, где подвергается обработке и анализу.

Вибрационное перемещение исследуемого элемента поверхности объекта контроля осуществляется по сложной траектории. У вибрационного процесса отсутствуют такие параметры, как амплитуда, размах, среднеквадратичное значение. Для того, чтобы какие-то характеристические параметры появились, следует сформировать некоторые инварианты этих параметров, например, инвариант интенсивности вибрации. В качестве такого инварианта принимается относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки. Реальное вибрационное перемещение элемента поверхности замещают таким эквивалентным прямолинейным перемещением по гармоническому закону, при котором относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки равно значению того же параметра при реальном вибрационном процессе.

По определению:

$$\delta_{Simt} = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{Simt}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки;  $S_{imtx}$  – площадь изображения круглой метки с вибрационным размытием (контрольное значение площади изображения круглой метки);  $S_{imt0}$  – площадь изображения круглой метки без вибрационного размытия (опорное значение площади изображения круглой метки).

На рис. 2 представлена модель формирования изображения круглой метки с вибрационным размытием при прямолинейном гармоническом перемещении ее оригинала в плоскости объекта.

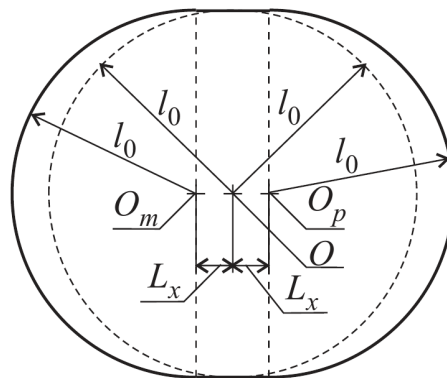


Рис. 2. Модель формирования изображения круглой метки с вибрационным размытием при прямолинейном гармоническом перемещении ее оригинала в плоскости объекта

Точка  $O$ , являющаяся изображением исследуемого элемента поверхности объекта контроля, совершает эквивалентное прямолинейное вибрационное перемещение по гармоническому закону между двумя предельными точками  $O_p$  и  $O_m$ . Расстояние  $L_x$  является амплитудой этого перемещения. Вместе с точкой  $O$  такое же перемещение совершает изображение круглой метки. Радиус этого изображения  $l_0$ . Четкое изображение круглой метки на исходной позиции при отсутствии вибрации на рис. 2 показано штриховой линией. В результате этого перемещения формируется след вибрационного размытия изображения круглой метки, внешний контур которого на рис. 2 показан сплошной основной линией. Этот след состоит из трех сегментов, границы которых внутри следа показаны штриховой линией. Два периферийных сегмента следа вибрационного размытия изображения круглой метки представляют собой полуокружности радиуса  $l_0$ , а центральный сегмент представляет собой прямоугольник со сторонами  $2l_0$  и  $2L_x$ .

Поскольку изображение подобно оригиналу:

$$\frac{r_t}{l_0} = \frac{A_x}{L_x}, \quad (2)$$

где  $r_t$  и  $l_0$  – радиусы круглой метки (в микрометрах) и ее изображения (в пикселах) соответственно;  $A_x$  и  $L_x$  – вибрационные перемещения тестового элемента поверхности (в микрометрах) и его изображения (в пикселах) соответственно.

Отсюда, принимая во внимание формулу (1), описание геометрии следа вибрационного размытия изображения круглой метки по рис. 2 и проведя несложные математические преобразования:

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \delta_{S_{imt}}. \quad (3)$$

### Оценка погрешности измерения интенсивности вибрации

На рис. 3 представлено семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки.

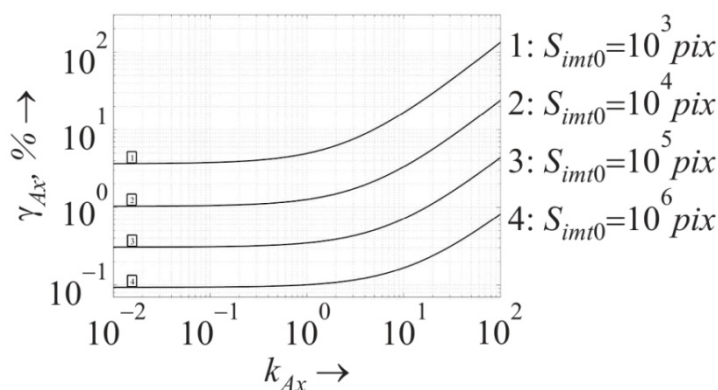


Рис. 3. Семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки

Коэффициент вибрационного перемещения  $k_{Ax}$  представляет собой отношение эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения к радиусу тестового объекта круглой формы:

$$k_{Ax} = \frac{A_x}{r_t}. \quad (4)$$

По сути, это и есть эквивалентная амплитуда вибрационного перемещения, измеренная в единицах радиуса круглой метки.

Приведенная погрешность средства измерений, представляет собой отношение погрешности средства измерений к нормирующему значению величины, выраженную обычно в процентах<sup>1</sup>:

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax}}{N} 100\%, \quad (5)$$

где  $\Delta A_x$  – предельная абсолютная погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения;  $N$  – нормирующее значение измеряемой величины.

На рис. 3  $\gamma_{Ax}$  является методической приведенной погрешностью, т.е. в отличие от инструментальной приведенной погрешности, это погрешность, заложенная в самом методе. Эта погрешность возникает за счет пространственной дискретизации изображения, разбиения его на пиксели. Соотношения, примененные для построения графиков по рис. 3, получены математически [12]. В качестве нормирующего значения вибрационного перемещения принят радиус тестового объекта круглой формы. Из этого, принимая во внимание формулу (4), следует, что если аргументом функции этой погрешности является вибрационное перемещение  $k_{Ax}$ , измеренное в единицах радиуса круглой метки, то в качестве нормирующего значения измеряемой величины принимается единица. На графике по рис. 3 приведены четыре пронумерованных кривых, каждая из которых характеризуется своей константой опорного значения

<sup>1</sup> РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений.

площади изображения круглой метки  $S_{im0}$ . Площадь изображения измеряется количеством пикселей, это изображение составляющих. Если, например, опорное значение площади изображения круглой метки  $S_{im0} = 10^6$  pix, радиус круглой метки 1 мм, то при эквивалентной амплитуде вибрационного перемещения  $A_x \leq 1000$  мкм методическая приведенная погрешность  $\gamma_{Ax} \approx 0,1$  % (рис. 3). Из формулы (5) следует, что

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax} N}{100 \%}. \quad (6)$$

В рассматриваемом числовом примере:

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax} N}{100 \%} = \frac{0,1 \% \cdot 1000 \text{ мкм}}{100 \%} = 1 \text{ мкм}.$$

Если радиус круглой метки составляет 1 мм, а система отрегулирована так, что опорное значение площади изображения круглой метки составляет  $10^6$  pix, то в диапазоне эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения от нуля до 1000 мкм предельная абсолютная погрешность измеряемой величины составляет 1 мкм.

При  $k_{Ax} > 1$ , как следует из рис. 3, погрешность резко возрастает. Это связано с увеличением доли прямоугольного фрагмента следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Поэтому не рекомендуется производить измерения при превышении эквивалентной амплитудой вибрационного перемещения радиуса изображения круглой метки. Диапазон измеряемой величины регулируется радиусом изображения круглой метки. В результате прибор становится многопредельным. Значение радиуса круглой метки располагается в конце шкалы. Это значение является нормирующим. Как правило, в качестве нормирующего значения измеряемой величины принимают как раз максимальное значение диапазона измерений или разность между максимальным и минимальным значениями диапазона измерений<sup>1</sup>.

Если при этом регистрируются не просто опорное и контрольное изображения круглой метки, а опорный и контрольный видеопотоки объемом, например, 100 изображений каждый, а в качестве значений площади изображения круглой метки принимаются средние значения этой величины по видеопотоку, то в соответствии с законом «корень из  $N$ » приведенная погрешность измерений снизится в десять раз и составит 0,01 %. Тогда в рассматриваемом числовом примере предельная абсолютная методическая погрешность составит 0,1 мкм.

Для сравнения, контактный виброметр *BALTECH VP-3470-Ex* [13], который в настоящее время весьма популярен среди практиков вибрационной диагностики, имеет диапазон измерений размаха вибрационного перемещения на базовой частоте 79,6 Гц от 1 до 1000 мкм. Это только один диапазон без возможности переключения пределов измерений. Паспортный диапазон частот измеряемого вибрационного перемещения этого прибора от 10 до 1000 Гц. Диапазон частот измеряемой вибрации на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием верхнего предела практически не имеет. Кроме того, данный контактный виброметр измеряет не эквивалентную амплитуду вибрационного перемещения, а размах только одной проекции траектории этого перемещения. В результате значение, принимаемое за размах вибрационного перемещения, может быть сильно занижено, вплоть до обнуления [14]. Это явление отсутствует при измерении вибрации на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием.

### Заключение

В статье обоснована актуальность проблемы совершенствования методов измерения параметров вибрации. Проведен анализ состояния вопроса. Изложен принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала, в котором реальное вибрационное перемещение по сложной траектории замещается прямолинейным гармоническим перемещением в плоскости объекта. Амплитуда этого заместительного вибрационного процесса должна быть такой, чтобы вибрационное приращение площади изображения круглой метки статистически значимо не отличалось от того же параметра реального исследуемого процесса. Приведена схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения круглой метки с вибрационным размытием. Приведена модель формирования такого изображения при эквива-

<sup>1</sup> РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений.

лентном прямолинейном гармоническом вибрационном перемещении ее оригинала в плоскости объекта. Представлено описание метода оценки погрешности измерения интенсивности вибрации. Представлено семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки. На числовых примерах проиллюстрирована методика оценки абсолютной погрешности измерений. Показано, что прибор, основанный на предлагаемом в статье методе, является многопредельным, а переключателем пределов измерений служит радиус круглой метки. Проведен сравнительный анализ метрологических характеристик метода, представленного в статье, и процесса измерения вибраций контактным виброметром *BALTECH VP-3470-Ex*.

#### Список литературы

1. Козлов А. Ю., Сидоров А. И. Вероятностно-временная модель функционирования иерархической системы управления разнородными территориально распределенными объектами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 99–112. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9
2. Калашников В. С., Лысенко А. В., Таньков Г. В. [и др.]. Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 90–97. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-10.
3. Патент 2535237 Российская Федерация. Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач А. В. № 2013128327/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
4. Патент 2535522 Российская Федерация. Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач А. В. № 2013128329/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
5. Патент 2726270 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. № 2019136327 ; заявл. 12.11.2019 ; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 19.
6. Патент 2765336 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. № 2021107352 ; заявл. 19.03.2021 ; опубл. 28.01.2022, Бюл. № 4.
7. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Восстановление геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 32–35.
8. Григорьев А. В., Гришко А. К., Данилова Е. А. [и др.]. Поиск периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 35–38.
9. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 55–63. doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.
10. Grigoriev A. V., Kochtgarov I. I., Yurkov N. K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms // Procedia Computer Science. 2021. P. 736–742.
11. Нуржанов Д. Х., Григорьев А. В., Трусов В. А. [и др.]. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 14–16.
12. Grigoriev A. V., Yurkov N. K., Kochegarov I. I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). 2016. P. 549–551.
13. Виброметр-балансирующий *BALTECH VP-3470-Ex*. Руководство по эксплуатации. URL: <http://vibropoint.ru/wp-content/uploads/yootheme/demo/default/PDF/instruction.pdf?ysclid=16kwq3u6sj198635102> (дата обращения: 08.08.2022).
14. Кобяков И., Сперанский А., Хориков А. [и др.]. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств // Двигатель. 2005. № 2. С. 4.

#### References

1. Kozlov A.Yu., Sidorov A.I. Probabilistic-temporal model of the functioning of a hierarchical management system of heterogeneous geographically distributed objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(2):99–112. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9

2. Kalashnikov V.S., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. et al. Formation of the control signal of the adaptive information-measuring and control system of vibration tests. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):90–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-10.
3. Patent 2535237 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V. № 2013128327/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
4. Patent 2535522 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V. № 2013128329/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
5. Patent 2726270 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S. № 2019136327; appl. 12.11.2019; publ. 10.07.2020, Bull. № 19. (In Russ.)
6. Patent 2765336 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S. № 2021107352; appl. 19.03.2021; publ. 28.01.2022, Bull. № 4. (In Russ.)
7. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Restoration of geometric parameters of the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:32–35. (In Russ.)
8. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Danilova E.A. et al. Search for peripheral points of the main linear section of the trace of vibrational blurring of the image of a circular mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:35–38. (In Russ.)
9. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. A method for monitoring the technical condition of moving mechanisms based on statistical analysis of vibration blurring of the image of a round-shaped test object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):55–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-7.
10. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms. *Procedia Computer Science*. 2021:736–742.
11. Nurzhanov D.Kh., Grigor'ev A.V., Trusov V.A. et al. Analysis of blurring of the image of a round mark during reciprocating vibrational displacement of the investigated material dots. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:14–16. (In Russ.)
12. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. 2016:549–551.
13. *Vibrometr-balansirovshchik BALTECH VP-3470-Ex. Rukovodstvo po ekspluatatsii = BALTECH VP-3470-Ex Vibration balancer. Operation manual*. (In Russ.). Available at: <http://vibropoint.ru/wp-content/uploads/yootheme/demo/default/PDF/instruction.pdf?ysclid=16kwq3u6sj198635102> (accessed 08.08.2022).
14. Kobayakov I., Speranskiy A., Khorikov A. et al. Knowledge of the vector characteristics of vibration is the key to the safety of technical devices. *Dvigatel' = Engine*. 2005;(2):4. (In Russ.)

#### *Информация об авторах / Information about the authors*

##### **Алексей Валерьевич Григорьев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@pnzgu.ru

##### **Aleksey V. Grigor'ev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 16.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 16.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2022**