

А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, В. А. Трусов, Н. К. Юрков

ПРИВЕДЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ¹

A. V. Grigoriev, A. V. Lysenko, A. S. Podsyakin, V. A. Trusov, N. K. Yurkov

REDUCED ERROR OF MEASUREMENT TECHNOLOGY APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования является виброизмерительная технология, основанная на подсчете количества пикселей изображения круглой метки с вибрационным размытием и количества пикселей четкого изображения того же объекта при отсутствии вибрации. Целью работы является разработка методики оценки приведенной погрешности этой виброизмерительной технологии. **Материалы и методы.** Для разработки методик оценки погрешностей виброизмерительной технологии применены методы вероятностного прогнозирования погрешностей и численного моделирования интервалов охвата измеренных значений. **Результаты.** Получены и обоснованы математические формулы для оценки предельной абсолютной погрешности измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества принадлежащих этому изображению пикселей. Получены и обоснованы последовательности математических вычислений для оценки предельной абсолютной погрешности измерения приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее изображения при отсутствии вибрации и для оценки приведенной погрешности измерения амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки поверхности объекта контроля по аппликате. **Выводы.** Полученные математические формулы позволяют прогнозировать с заданной доверительной вероятностью погрешность измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества принадлежащего этому изображению пикселей. Разработанные алгоритмы позволяют оценить погрешность измерительного сигнала на основе известного количества пикселей, приходящегося на изображение

Abstract. Background. The object of the study is vibration measurement technology based on the calculation of the number of pixels of the image of a circular label with vibration blur and the number of pixels of a clear image of the same object in the absence of vibration. The aim of the work is to develop a methodology for assessing the reduced error of this vibration measurement technology. **Materials and methods.** Methods of probabilistic error prediction and numerical simulation of the coverage intervals of the measured values are used to develop methods for estimating the errors of vibration measurement technology. **Results.** Mathematical formulas for estimation of the maximum absolute error of measurement of the area of the image of a round label by counting the number of pixels belonging to this image are obtained and justified. Sequences of mathematical calculations are obtained and substantiated to estimate the maximum absolute error of measuring the increment of the radius of the image of a circular mark with vibration blur in relation to the radius of its image in the absence of vibration and to estimate the reduced error of measuring the amplitude of the vibration movement of the investigated point of the surface of the object of control on the application. **Summary.** The obtained mathematical formulas make it possible to predict with a given confidence the error of measuring the area of the image of a round label by counting the number of pixels belonging to this image. The developed algorithms allow us to estimate the error of the measurement signal based on the known number of pixels per image of a round label. The developed concepts create prerequisites for the development of techniques, construction of experimental and computational functions that will allow the design of systems for measuring the amplitude of the vibration movement on the ap-

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

круглой метки. Выработанные концепции создают предпосылки для разработки методик, построения экспериментальных и расчетных функций, которые позволят при проектировании систем измерения амплитуды вибрационного перемещения по аппликату варьировать поле зрения регистрирующего устройства, его разрешающую способность, диаметр круглой метки и приведенную погрешность измерений: задавшись тремя из этих параметров, определить четвертый.

Ключевые слова: вибрация, измерение, разрешающая способность, регистрирующее устройство, расфокусирование, изображение, дискретизация, погрешность, пиксель, растр, амплитуда, аппликата.

plication to vary the field of view of the recording device, its resolution, the diameter of the round mark and the reduced measurement error: given three of these parameters, determine the fourth.

Keywords: vibration, measurement, resolution, recording device, defocusing, images, sampling, error, pixel, raster, amplitude, application.

Введение

Развитие технических систем приводит к их усложнению. В связи с этим резко возрастают требования к системам диагностики возникающих в них дефектов [1]. Важным направлением в области диагностирования дефектов радиоэлектронной аппаратуры, машин и механизмов, зданий и сооружений является диагностика вибрационная [2]. Одним из быстро развивающихся методов измерения вибрационных распределений на поверхности объекта контроля является метод анализа размытия изображения матрицы круглых меток, нанесенной на эту поверхность.

Современное состояние вопроса

Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях представлено в статье [3]. В работе [4] приведено описание структуры методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки. В работе [5] приведено описание структуры методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Статья [6] моделирует процессы формирования и описания отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки приведен в статье [7]. Особенности отображения вектора вибрационного перемещения материальной точки в плоскости изображения раскрываются в статье [8]. Параметры структурного описания размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки приведены в статье [9]. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки приводится в статье [10]. В статье [11] описан процесс вычисления выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля. В статье [12] приводится описание методики калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки.

Абсолютная погрешность измерительного преобразования

Исследуемая в настоящей статье технология основана на том, что за счет эффекта расфокусирования при приближении к регистрирующему устройству радиус изображения круглой метки увеличивается, а при удалении от него – уменьшается. В результате измерительным сигналом вибрационного перемещения исследуемой точки, которая располагается в геометрическом центре круглой метки, является приращение радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу такого изображения при отсутствии вибрации. Радиус изображения круглой метки измеряется следующим образом. Сначала измеряется площадь этого изображения путем простого подсчета количества пикселей, ему принадлежащих, а затем вычисляется радиус по формуле

$$r_{imt} = \sqrt{\frac{S_{imt}}{\pi}}, \quad (1)$$

где S_{imt} – площадь изображения круглой метки; r_{imt} – радиус изображения круглой метки.

Радиус изображения, как и любой другой линейный размер растрового изображения, измеряется в растровых единицах (*run*) [13]. Под растровой единицей понимается расстояние между центрами соседних в строке или столбце растровой матрицы пикселей. Площадь изображения круглой метки, равная количеству пикселей, этому изображению принадлежащих, измеряется в квадратных растровых единицах (run^2).

В статье [14] показано, что

$$\sigma(S_{imt}) = \sqrt[4]{\frac{1}{18} run^6 \pi S_{imt}}, \quad (2)$$

где $\sigma(S_{imt})$ – среднеквадратичное отклонение погрешности результата измерения площади изображения круглой метки.

Там же показано, что погрешность результата измерения площади изображения круглой метки распределена по нормальному закону. Из этого следует, что погрешность результата измерения площади изображения круглой метки не выйдет за пределы оценки $\Delta S_{imt} = 3\sigma(S_{imt})$ с доверительной вероятностью 99,73 %. Для большинства практических расчетов оценку предельной абсолютной погрешности с такой доверительной вероятностью можно считать приемлемой.

Таким образом, принимая во внимание (2):

$$\Delta S_{imt} = \sqrt[4]{4,5 run^6 \pi S_{imt}}. \quad (3)$$

Из формулы (1) следует, что

$$r_{imtU} = \sqrt{\frac{S_{imtU}}{\pi}}, \quad (4)$$

$$r_{imtL} = \sqrt{\frac{S_{imtL}}{\pi}}, \quad (5)$$

где r_{imtU} и r_{imtL} – верхняя и нижняя границы интервала охвата значений радиуса изображения метки r_{imt} соответственно; S_{imtU} и S_{imtL} – верхняя и нижняя границы интервала охвата значений площади изображения метки S_{imt} соответственно:

$$S_{imtU} = S_{imt} + \Delta S_{imt}, \quad (6)$$

$$S_{imtL} = S_{imt} - \Delta S_{imt}. \quad (7)$$

Из формул (4) и (5) следует, что

$$l_{0U} = \sqrt{\frac{S_{imt0U}}{\pi}}, \quad (8)$$

$$l_{0L} = \sqrt{\frac{S_{imt0L}}{\pi}}, \quad (9)$$

где l_{0U} и l_{0L} , S_{imt0U} и S_{imt0L} – верхняя и нижняя границы интервалов охвата значений l_0 и S_{imt0} соответственно; l_0 – радиус четкого изображения круглой метки при отсутствии вибрации; S_{imt0} – площадь четкого изображения круглой метки при отсутствии вибрации:

$$l_{zU} = \sqrt{\frac{S_{imtzU}}{\pi}}, \quad (10)$$

$$l_{zL} = \sqrt{\frac{S_{imtzL}}{\pi}}, \quad (11)$$

где l_{zU} и l_{zL} , S_{imtzU} и S_{imtzL} – верхняя и нижняя границы интервалов охвата значений l_z и S_{imtz} соответственно; l_z – радиус размытого изображения круглой метки при наличии вибрации; S_{imtz} – площадь размытого изображения круглой метки при наличии вибрации.

По определению:

$$|L_z| = |l_z - l_0|, \quad (12)$$

где L_z – приращение радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации.

Отсюда:

$$|L_z|_U = \begin{cases} l_{zU} - l_{0L}, & \text{если } l_z \geq l_0, \\ l_{0U} - l_{zL}, & \text{если } l_z < l_0; \end{cases} \quad (13)$$

$$|L_z|_L = \begin{cases} l_{zL} - l_{0U}, & \text{если } (l_z \geq l_0) \cap (l_{zL} \geq l_{0U}), \\ 0, & \text{если } (l_z \geq l_0) \cap (l_{zL} < l_{0U}), \\ l_{0L} - l_{zU}, & \text{если } (l_z < l_0) \cap (l_{0L} \geq l_{zU}), \\ 0, & \text{если } (l_z < l_0) \cap (l_{0L} < l_{zU}), \end{cases} \quad (14)$$

где $|L_z|_U$ и $|L_z|_L$ – соответственно верхняя и нижняя границы интервала охвата значений $|L_z|$.

Предельная абсолютная погрешность $\Delta|L_z|$ определится по формуле

$$\Delta|L_z| = \begin{cases} |L_z|_U - |L_z|, & \text{если } |L_z|_U - |L_z| \geq |L_z| - |L_z|_L, \\ |L_z| - |L_z|_L, & \text{если } |L_z|_U - |L_z| < |L_z| - |L_z|_L, \end{cases} \quad (15)$$

т.е. в качестве предельной абсолютной погрешности $\Delta|L_z|$ принимается наибольшее по абсолютной величине отклонение измеренного приращения радиуса изображения метки от истинного.

Приведенная погрешность измерительного преобразования

Для оценки возможностей измерительного преобразования пользуются понятием о приведенной погрешности этого преобразования. Под приведенной погрешностью измерительного преобразования стандарт [15] понимает отношение предельной абсолютной погрешности измерительного преобразования к нормирующему значению измеряемой величины.

Применительно к данному измерительному преобразованию это означает

$$\delta_N M = \frac{\Delta M(M_N)}{M_N}, \quad (16)$$

где $\delta_N M$ – приведенная погрешность измерительного преобразования вибрационного перемещения исследуемой материальной точки в абсолютную величину приращения радиуса изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля; M_N – нормирующее значение вибрационного перемещения; $\Delta M(M_N)$ – предельная абсолютная погрешность измерительного преобразования при вибрационном перемещении исследуемой материальной точки M равном M_N .

Как было показано в начале предыдущего раздела настоящей статьи, абсолютная величина приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации $|L_z|$ является измерительным сигналом вибрационного перемещения исследуемой точки по аппликату.

Если зависимость измерительного сигнала $|L_z|$ от измеряемой величины M является линейной, то

$$\frac{\Delta|L_z|}{|L_z|} = \frac{\Delta M}{M}$$

или

$$\frac{\Delta|L_z|(M_N)}{|L_z|(M_N)} = \frac{\Delta M(M_N)}{M_N},$$

где $|L_z|(M_N)$ и $\Delta|L_z|(M_N)$ – соответственно абсолютная величина приращения радиуса и предельная абсолютная погрешность ее измерения при $M = M_N$.

Из этого и формулы (16) следует, что при линейной градуировочной характеристике измерительного преобразования приведенная погрешность этого преобразования, выраженная в процентах, будет равна

$$\delta_N M = \frac{\Delta |L_z| (M_N)}{|L_z| (M_N)} \cdot 100 \% . \quad (17)$$

Важной характеристикой данного измерительного преобразования является относительное приращение радиуса изображения круглой метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_{zrel}(M_N)$:

$$L_{zrel}(M_N) = \frac{L_z(M_N)}{l_0} \cdot 100 \% . \quad (18)$$

Зная площадь изображения метки при отсутствии вибрации S_{imt0} и относительное приращение радиуса изображения круглой метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_{zrel}(M_N)$, можно вычислить приведенную погрешность измерения вибрационного перемещения $\delta_N M$. Для этого необходимо сначала вычислить радиус изображения метки при отсутствии вибрации l_0 . Из формулы (1) следует, что

$$l_0 = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}} . \quad (19)$$

Затем вычислить приращение радиуса изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_z(M_N)$:

$$L_z(M_N) = \frac{L_{zrel}(M_N) l_0}{100\%} . \quad (20)$$

Формула (20) получена как решение уравнения (18).

На основании известных l_0 и $L_z(M_N)$ вычисляется радиус изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения $l_z(M_N)$:

$$l_z(M_N) = l_0 + L_z(M_N) . \quad (21)$$

Площадь изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения вычисляется по формуле

$$S_{imt_z}(M_N) = \pi l_z^2(M_N) . \quad (22)$$

Предельные абсолютные погрешности ΔS_{imt0} и $\Delta S_{imt_z}(M_N)$ вычисляются на основании формулы (3)

$$\Delta S_{imt0} = \sqrt[4]{4,5 \text{run}^6 \pi S_{imt0}} ; \quad (23)$$

$$\Delta S_{imt_z}(M_N) = \sqrt[4]{4,5 \text{run}^6 \pi S_{imt_z}(M_N)} . \quad (24)$$

Границы интервалов охвата значений S_{imt0} и $S_{imt_z}(M_N)$ вычисляются по формулам (6) и (7)

$$S_{imt0U} = S_{imt0} + \Delta S_{imt0} ; \quad (25)$$

$$S_{imt0L} = S_{imt0} - \Delta S_{imt0} ; \quad (26)$$

$$S_{imt_zU}(M_N) = S_{imt_z}(M_N) + \Delta S_{imt_z}(M_N) ; \quad (27)$$

$$S_{imt_zL}(M_N) = S_{imt_z}(M_N) - \Delta S_{imt_z}(M_N) . \quad (28)$$

После этого путем последовательных вычислений по формулам (8–15, 17) определяется приведенная погрешность измерения вибрационного перемещения исследуемой материальной точки на поверхности объекта контроля $\delta_N M$.

Зависимость $\delta_N M$ от S_{imf0} строится путем последовательного задания значений S_{imf0} в определенном диапазоне с определенным шагом и вычисления значений $\delta_N M$ по методике, изложенной в настоящем пункте.

По этой зависимости, зная поле зрения регистрирующего устройства, его разрешающую способность и диаметр круглой метки, можно определить площадь изображения метки и далее – приведенную погрешность измерений. Или, наоборот, задавшись требуемой приведенной погрешностью, подобрать регистрирующее устройство, его поле зрения и диаметр метки. Сказанное относится и к варианту, при котором на участок поверхности объекта контроля наносится не одна метка, а матрица меток с целью контроля распределения вибрационных перемещений материальных точек на этом участке объекта контроля.

Заключение

Выведена формула предельной абсолютной погрешности измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества пикселей, этому изображению принадлежащих.

Разработана и обоснована методика оценки предельной абсолютной погрешности измерения приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации.

Разработана и обоснована методика оценки приведенной погрешности измерения амплитуды вибрационного перемещения на основе подсчета количества пикселей, принадлежащих четкому изображению круглой метки при отсутствии вибрации и ее изображению с вибрационным размытием.

Библиографический список

1. Кузнецов, Н. С. Гибридный интеллект инженерии гетероструктур вычислительной техники / Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Л. Р. Фионова, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 85–97.
2. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
3. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях / А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, П. Г. Андреев, Г. В. Таньков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 107–109.
4. Структура методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, С. А. Бростилов, И. Ю. Наумова, Э. В. Лапшин, А. А. Баранов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 13–16.
5. Григорьев, А. В. Структура методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, В. А. Трусов, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 28–31.
6. Григорьев, А. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 31–37.
7. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, С. А. Бростилов, Н. В. Горячев, П. Г. Андреев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 37–41.
8. Каражанов, Б. Б. Особенности отображения вектора вибрационного перемещения материальной точки в плоскости изображения / Б. Б. Каражанов, А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 16–20.
9. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Г. Ж. Надырбеков, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. А. Стрельцов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 11–13.
10. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Д. Х. Нуржанов, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, Н. А. Стрельцов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 14–16.
11. Вычисление выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля / А. В. Григорьев, А. К. Гришко,

- Э. В. Лапшин, И. Ю. Наумова, Е. А. Данилова, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 41–44.
12. Методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, В. Б. Алмаметов, А. И. Долотин, А. Г. Царев, Г. Г. Беликов, А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 16–19.
13. ГОСТ 27459-87 Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 30 с.
14. Григорьев, А. В. Вероятностное прогнозирование погрешностей измерения радиуса изображения круглой метки по технологиям подсчета строк и пикселей / А. В. Григорьев, А. А. Чибриков, Г. В. Таньков, Е. А. Данилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 252–254.
15. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения. – Москва, 1988. – 10 с.

References

1. Kuznetsov N. S., Smogunov V. V., Fionova L. R., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 85–97. [In Russian]
2. Yurkov N. K., Zatylnkin A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
3. Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Andreev P. G., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 107–109. [In Russian]
4. Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Brostilov S. A., Naumova I. Yu., Lapshin E. V., Baranov A. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 13–16. [In Russian]
5. Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Trusov V. A., Bannov V. Ya. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 28–31. [In Russian]
6. Grigor'ev A. V., Zatylnkin A. V., Lysenko A. V., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 31–37. [In Russian]
7. Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Brostilov S. A., Goryachev N. V., Andreev P. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 37–41. [In Russian]
8. Karazhanov B. B., Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Grishko A. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 16–20. [In Russian]
9. Nadyrbekov G. Zh., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 11–13. [In Russian]
10. Nurzhanov D. Kh., Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 14–16. [In Russian]
11. Grigor'ev A. V., Grishko A. K., Lapshin E. V., Naumova I. Yu., Danilova E. A., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 41–44. [In Russian]
12. Grigor'ev A. V., Almetov V. B., Dolotin A. I., Tsarev A. G., Belikov G. G., Grishko A. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 16–19. [In Russian]
13. *GOST 27459-87 Sistemy obrabotki informatsii. Mashinnaya grafika. Terminy i opredeleniya* [GOST 27459-87 System of information processing. Computer graphics. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2014, 30 p. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Chibrikov A. A., Tan'kov G. V., Danilova E. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 252–254. [In Russian]
15. *RMG 29-2013. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* [RMG 29-2013. Metrology. Basic terms and definitions]. Moscow, 1988, 10 p. [In Russian]

Григорьев Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Подсякин Андрей Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Трусов Василий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: trusov_v@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Grigoriev Alexey Valeryevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Podsyakin Andrey Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Trusov Vasily Anatolievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Приведенная погрешность технологии измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 79–86. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-9.