

УДК 004.932.2
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТКИ

Н. С. Реута

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
saparap@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показана необходимость создания систем диагностики для вибронгруженных объектов. Отмечено, что бесконтактные системы обладают достаточными возможностями для определения амплитуды вибраций. Показано, что анализ последовательностей изображения с камеры позволяет оценить параметры вибрации. *Материалы и методы.* Предложены механизмы анализа изображения с камеры путем подсчета строк и пикселей при измерении радиуса изображения круглой метки. Проведено численное моделирование процессов измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк и пикселей с различными параметрами. *Результаты.* Моделирование показало, что выигрыш в точности при применении технологии подсчета пикселей по отношению к технологии подсчета строк будет возрастать по мере увеличения радиуса изображения метки. *Вывод.* Прогнозируется снижение предельной абсолютной погрешности измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей при увеличении радиуса изображения метки.

Ключевые слова: вибрация, измерение, размытие, изображение, площадь изображения, погрешность, пиксель

Для цитирования: Реута Н. С. Информационно-измерительная система диагностики технического состояния вибронгруженных объектов на основе анализа размытия изображения метки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 39–52. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF VIBRATION-LOADED OBJECTS BASED ON THE ANALYSIS OF THE IMAGE BLUR OF THE MARK

N.S. Reuta

Penza State University, Penza, Russia
saparap@mail.ru

Abstract. *Background.* The necessity of creating diagnostic systems for vibration-loaded objects is shown. It is noted that non-contact systems have sufficient capabilities to determine the vibration amplitude. It is shown that the analysis of image sequences from the camera makes it possible to estimate the vibration parameters. *Materials and methods.* Mechanisms for analyzing the image from the camera by counting lines and pixels when measuring the radius of the image of a round mark are proposed. Numerical modeling of the processes of measuring the radius of the image of a round mark using technologies for counting lines and pixels with different parameters was carried out. *Result.* Simulations have shown that the accuracy gain of applying the pixel counting technology to the line counting technology will increase as the label image radius increases. *Conclusion.* It is predicted that the maximum absolute error in measuring the radius of the mark image using the pixel counting technology will decrease with an increase in the radius of the mark image.

Keywords: vibration, measurement, blur, image, image area, error, pixel

For citation: Reuta N.S. Information-measuring system for diagnostics of the technical condition of vibration-loaded objects based on the analysis of the image blur of the mark. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):39–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

Введение

Вращающиеся части, входящие в состав современного оборудования, со временем изнашиваются, при этом изменяется частотный спектр и амплитуда вибрации, в результате по этим

параметрам можно отследить деградиационные процессы. Для таких измерений применяют контактные и бесконтактные информационно-измерительные системы вибродиагностики.

Контактная виброметрия

В основе контактных методов лежит непосредственный механический контакт датчика измерительной системы с вибрирующим объектом и наличие контактной массы. В процессе вибрации датчик, расположенный между вибрирующим объектом и контактной массой, деформируется, величина этой деформации преобразуется в сигнал, физическая природа которого позволяет его обрабатывать с целью получения информации о параметрах вибрации. Чаще всего это аналоговый электрический сигнал, который может быть преобразован в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Существует множество способов измерения деформаций, например, тензорезистивный, волоконно-оптический, пьезоэлектрический.

Инерционность контактной массы ограничивает частотный диапазон механических контактных датчиков. В результате верхний предел частоты вибраций, воспринимаемых такими системами, составляет единицы килогерц. Этого явно недостаточно для того, чтобы удовлетворить современным требованиям вибродиагностики. Диапазоны частот вибраций машин и механизмов выходят далеко за эти рамки. В качестве примера на рис. 1 представлен спектр частот вибрации авиационного двигателя НК-8 [1].

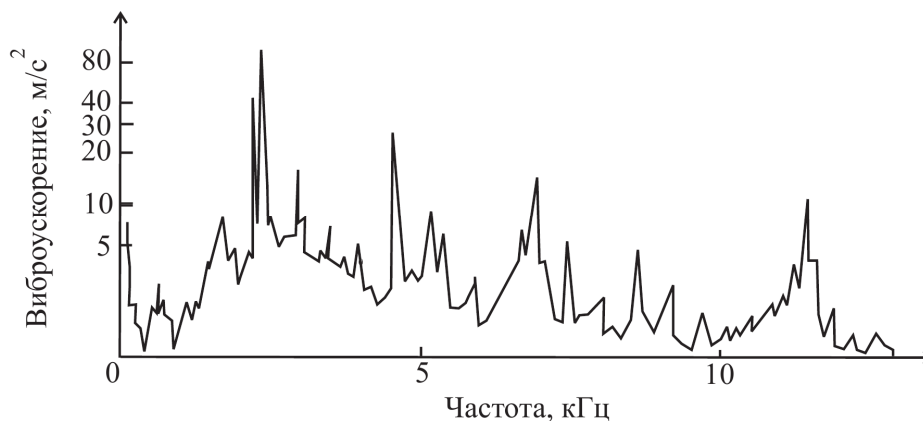


Рис. 1. Спектр высокочастотной вибрации двигателя НК-8

Виброизмерительная система, предназначенная для диагностики скрытых дефектов этого двигателя, должна измерять вибрации частотой 12 кГц с относительной погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$. Ни один из известных контактных датчиков такие измерения не поддерживает. Авиационная и космическая техника подвергается вибрационным воздействиям, частота которых достигает сотен килогерц.

Лазерная виброметрия

Принцип работы лазерного виброметра основан на доплеровском сдвиге частоты оптического (лазерного) излучения, отраженного от движущегося объекта. В этом случае применяют метод оптического гетеродинамирования отраженного от объекта слабого оптического сигнала на основе двухлучевой интерференционной оптической схемы с последующим формированием квадратурных компонент электрического сигнала фотодетекторами балансного типа. Микропроцессоры, входящие в состав лазерного виброметра, производят цифровую обработку и анализ вибрационных сигналов. Результаты в виде спектрограмм или осциллограмм отображаются на экране внешнего компьютера [2].

Лазерные виброметры являются бесконтактными средствами измерения вибраций. Поэтому они свободны от недостатков, присущих средствам контактной виброметрии. Они не влияют на резонансные свойства объектов, обеспечивают возможность измерений без предварительной подготовки поверхности объекта и оперативное измерение амплитуды вибраций в различных точках объекта.

Широкополосная оптическая виброметрия

Известен способ измерения размаха вибрации объекта, включающий закрепление на объекте тест-объекта, выполненного в виде мерного клина, и регистрацию изображения тест-объекта с вибрационным размытием, которую осуществляют посредством визуальной фиксации точки пересечения крайних положений мерного клина на определенном расстоянии от острия. Основание мерного клина градуируют и оцифровывают в миллиметрах размаха вибрации. Измерение проводят при вибрации с частотой 8 Гц и выше в направлении вверх-вниз [3].

Недостатками описанного способа являются узкая область применения вследствие определения одного параметра – размаха вибрации и неширокий диапазон измерения значений амплитуды вибрации, ограниченный в определении наименьших значений размаха зависимостью от длины и высоты мерного клина, а также низкая точность измерения, обусловленная погрешностями визуальной фиксации.

Описанный способ также является бесконтактным. Ему несвойственны недостатки методов и средств контактной виброметрии, рассмотренные выше. По сравнению с методами лазерной виброметрии методы широкополосной оптической виброметрии являются более экономичными. Верхний частотный предел средств оптической широкополосной виброметрии неограничен.

Широкополосные оптические методы измерения амплитуды вибраций, использующие размытие изображения круглой метки

Сущность оптического метода измерения вибрации, использующего размытие изображения, заключается в том, что на поверхность объекта контроля наносится метка круглой формы. Регистрируется изображение этой метки. В качестве регистрирующего устройства обычно применяется цифровая фото- или видеокамера.

Метод позволяет измерять не только величину, но и направление вибрационного перемещения исследуемой материальной точки. Это обусловлено тем, что используется размытое (вследствие воздействия вибрации) изображение круглой метки. По направлению этого размытия судят о проекции вектора вибрационного перемещения на плоскость объекта (абсциссе и ординате вектора) [4, 5].

В работе [6] показано, что измерительным сигналом перемещения исследуемой материальной точки по аппликате является приращение радиуса размытого вследствие вибрации изображения метки по отношению к радиусу четкого ее изображения, предварительно полученного при отсутствии вибрации. В работе [7] представлена технология измерения геометрических параметров как размытого, так и четкого изображения метки, в основу которой положено измерение расстояний от пикселей, входящих в состав изображения до центра тяжести изображения метки. Эти расстояния получили название характеристических расстояний. В работе [8] проведено моделирование двух предельных ситуаций: когда исследуемая материальная точка перемещается исключительно в плоскости объекта и когда она перемещается исключительно в направлении, перпендикулярном плоскости объекта. В работе [9] моделируется ситуация, когда исследуемая материальная точка совершает вибрационное перемещение в плоскости, перпендикулярной плоскости объекта, по периметру эллипса, одна из осей которого лежит в плоскости объекта. При этом направление оси эллипса в плоскости объекта выбрано произвольно. В работе [10] рассмотрена структура методики измерения параметров вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки на основе анализа размытого вследствие вибрации изображения круглой метки. Там же представлена методика измерения радиуса круглого изображения путем формирования матрицы характеристических расстояний входящих в его состав пикселей. В статьях [11, 12] изложен вариант построения системы бесконтактного векторного измерения вибрационных перемещений посредством анализа вибрационного размытия изображения круглой метки. В работе [13] изложена методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки, т.е. методика определения коэффициентов перевода растровых единиц изображения в микрометры вибрационного перемещения. Под растровой единицей (*Raster unit, run*) понимается единица измерения длины на растровом изображении, определяемая расстоянием между центрами соседних в строке или столбце пикселей¹. В работе [14] показано, что

¹ ГОСТ 27459-87. Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения.

анализ размытого вследствие вибрации изображения круглой метки подразделяется на следующие этапы: формирование структурного описания размытого вследствие вибрации изображения круглой метки [15]; анализ этого описания [16]; вычисление модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки, расположенной в центре оригинала метки, который нанесен на объект контроля [17–20]. Исследования, результаты которых опубликованы в статьях [18–22], заключались в том, что получали четкое изображение метки при отсутствии вибрации, а затем, не меняя параметров фокусировки фотокамеры, приближали ее к объекту контроля. Установлено значимое увеличение радиуса изображения круглой метки за счет эффекта расфокусировки при статическом приближении оригинала метки к регистрирующему устройству.

Технология измерения радиуса изображения круглой метки

На рис. 2 представлена структурная схема системы измерения амплитуды вибраций на основе анализа геометрических параметров изображения круглой метки.

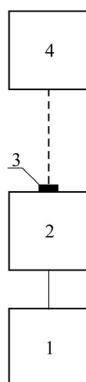


Рис. 2. Структурная схема системы измерения вибраций на основе анализа изображения круглой метки

На вибростенде 1 устанавливается объект контроля 2, на который нанесена круглая метка 3. Регистрирующее устройство 4, в качестве которого может быть использована, например, цифровая фотокамера, создает исходное изображение метки (преобразует аналоговое, непрерывное изображение в дискретное, цифровое), модель которого представлена на рис. 3.

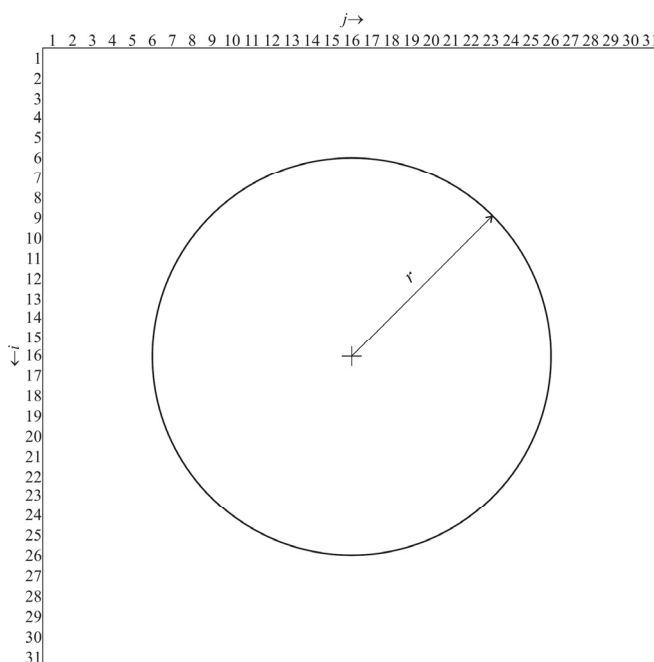


Рис. 3. Модель исходного изображения круглой метки

На этом рисунке радиус исходного изображения круглой метки обозначен через r . Это изображение преобразуется фотоприемной матрицей регистрирующего устройства в дискретное изображение, доступное для дальнейшей обработки в цифровом виде.

На рис. 3 и далее индекс i – порядковый номер строки матрицы, j – порядковый номер столбца матрицы. Эти же индексы являются координатными осями. В соответствии с принятым в области обработки изображений координатным соглашением [23], значение вертикальной координаты i ставится на первое место, а значение горизонтальной координаты j – на второе. В результате вертикальная координата i считается абсциссой, а горизонтальная j – ординатой. После цифровой камеры получается изображение круглой метки, показанное на рис. 4.

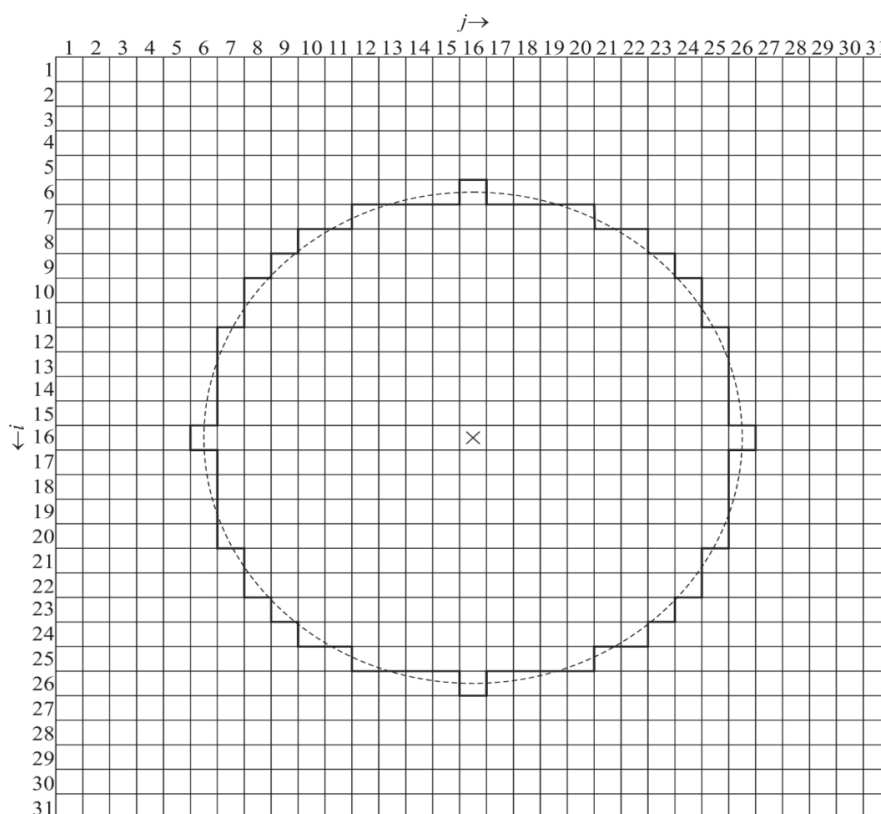


Рис. 4. Модель дискретизации изображения круглой метки

На этом рисунке пунктирной линией показан контур истинного (аналогового) изображения круглой метки, а контур измеренного дискретного изображения этой метки показан сплошной основной линией. Если геометрический центр пикселя в процессе дискретизации находится в пределах истинного изображения, то весь пиксель включается в состав дискретного изображения. Если же геометрический центр пикселя находится за пределами истинного изображения, то весь пиксель остается за пределами дискретного изображения.

Моделирование процесса измерения радиуса изображения круглой метки

При моделировании истинное значение радиуса изображения круглой метки r изменяется от $9,5run$ до $10,5run$ включительно. Размеры пикселя 5×5 мм. Размеры растровой матрицы $(31 \times 31)run$. Предполагается, что центр изображения метки совпадает с центром пикселя, для которого $i = 16; j = 16$. Измерение параметров круглой метки (количество пикселей по осям) осуществляется для радиусов, при которых нарастающее истинное исходное изображение метки захватывает новые пиксели. На растровых диаграммах обозначены диагонали этих новых пикселей. Центр исходного изображения метки обозначен символом «x».

Растровая диаграмма изображения круглой метки при $r = 9,5run$ представлена на рис. 5.

Количество n_i строк растровой матрицы, пересекающих изображение метки при моделировании удобно определять по формуле

$$n_l = i_{\min_{\max}}, \quad (1)$$

где i_{\max} и i_{\min} – наибольшее и наименьшее значения порядкового номера строки, имеющей в своем составе хотя бы один пиксель изображения метки.

Таким образом:

$$n_l = i_{\min_{\max}}.$$

Значение r_{cl} радиуса изображения метки, измеренное методом подсчета строк, определяется по формуле

$$r_{cl} = \frac{n_l}{2} \cdot 1run = \frac{19}{2} \cdot 1run = 9,5run.$$

Погрешность результата измерения радиуса понимается как разность между измеренным и опорным значениями измеряемой величины¹. В качестве опорного значения радиуса r метки выступает принятое значение r , которое задается

$$\varepsilon_{rcl} = r_{cl} - r, \quad (2)$$

где ε_{rcl} – погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк.

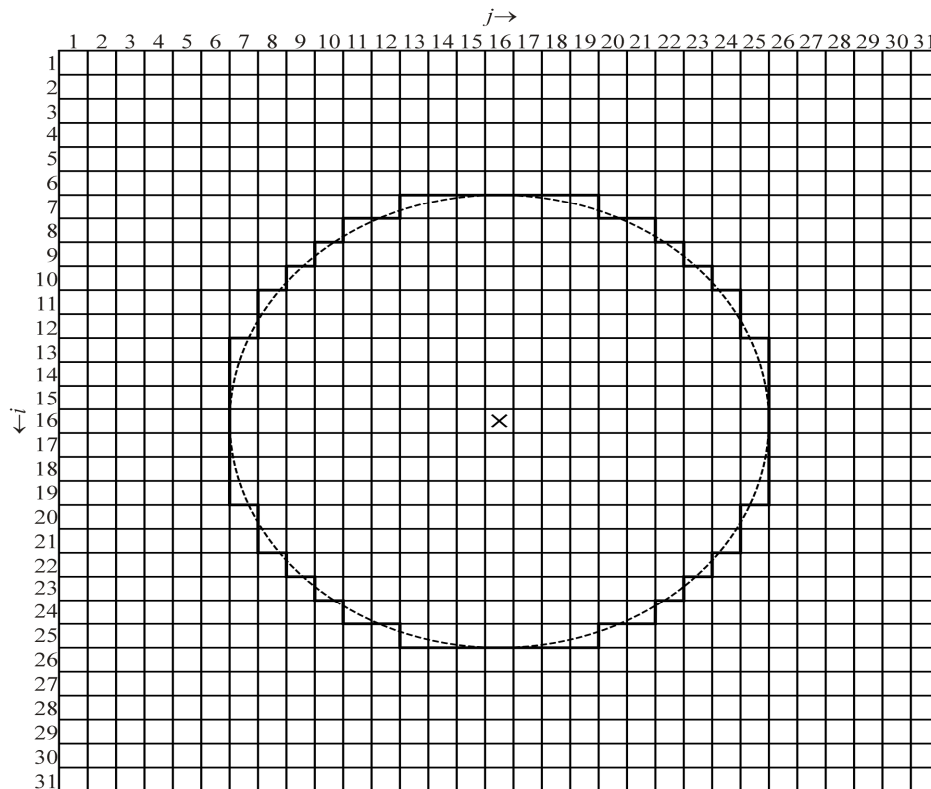


Рис. 5. Растровая диаграмма изображения метки при $r = 9,5run$

Принятое значение S площади изображения метки определится по формуле

$$S = \pi r^2. \quad (3)$$

Таким образом:

$$S = \pi r^2 = \pi 9,5^2 run^2 = 90,25\pi run^2 \approx 283,5run^2.$$

¹ РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения.

Процесс накопления количества пикселей изображения метки n_p построчно представлен в табл. 1.

Таблица 1

Процесс накопления n_p построчно при $r = 9,5run$

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| i | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| $\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^j \xi(i, j)$ | 7 | 11 | 13 | 15 | 17 | 17 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| $\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^j \xi(i, j)$ | 7 | 18 | 31 | 46 | 63 | 80 | 99 | 118 | 137 | 156 |
| i | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| $\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^j \xi(i, j)$ | 19 | 19 | 19 | 17 | 17 | 15 | 13 | 11 | 7 | |
| $\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^j \xi(i, j)$ | 175 | 194 | 213 | 230 | 247 | 262 | 275 | 286 | 293 | |

Таким образом, $n_p = 293$.

Далее произведем подсчет средней площади:

$$S_{cp} = n_p \cdot 1run^2 = 293 \cdot 1run^2 = 293run^2.$$

В качестве опорного значения радиуса площади изображения метки принимается истинное ее значение S , которое вычисляется по формуле (3). Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей определится по следующей формуле:

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S, \tag{4}$$

где ϵ_{Scp} – погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей.

Таким образом:

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 293run^2 - 90,25\pi run^2 = 9,47run^2.$$

Измеренное методом подсчета пикселей значение радиуса изображения метки определим по формуле

$$r_{cp} = \sqrt{\frac{S_{cp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{293run^2}{\pi}} = 9,66run.$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей определится следующим образом:

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r, \tag{5}$$

где ϵ_{rcp} – погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей.

Таким образом:

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,66run - 9,5run = 0,16run.$$

При $r = 9,85run$ нарастающее исходное изображение метки захватывает центры новых периферийных пикселей. При $r = (9,85-0)run$ новые периферийные пиксели еще не включены в состав дискретного изображения метки, но исходное изображение метки r уже равно $9,85run$. Из этого следует, что все измеренные значения остаются прежними: $n_l = 19$; $r_{cl} = 9,5run$; $n_p = 293$; $S_{cp} = 293run^2$; $r_{cp} = 9,66run$.

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк ϵ_{rccl} определится по формуле (2):

$$\epsilon_{rccl} = r_{cl} - r = 9,5run - 9,85run = -0,35run.$$

Истинное значение S площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,85^2 \text{ run}^2 = 97,02\pi \text{ run}^2 \approx 304,8 \text{ run}^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей ϵ_{Scp} определится по формуле (4):

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 293 \text{ run}^2 - 97,02\pi \text{ run}^2 = -11,81 \text{ run}^2 .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей ϵ_{rcp} определится по формуле (5):

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,66 \text{ run} - 9,85 \text{ run} = -0,19 \text{ run} .$$

Растровая диаграмма изображения круглой метки при $r = 9,85 \text{ run}$ представлена на рис. 6.

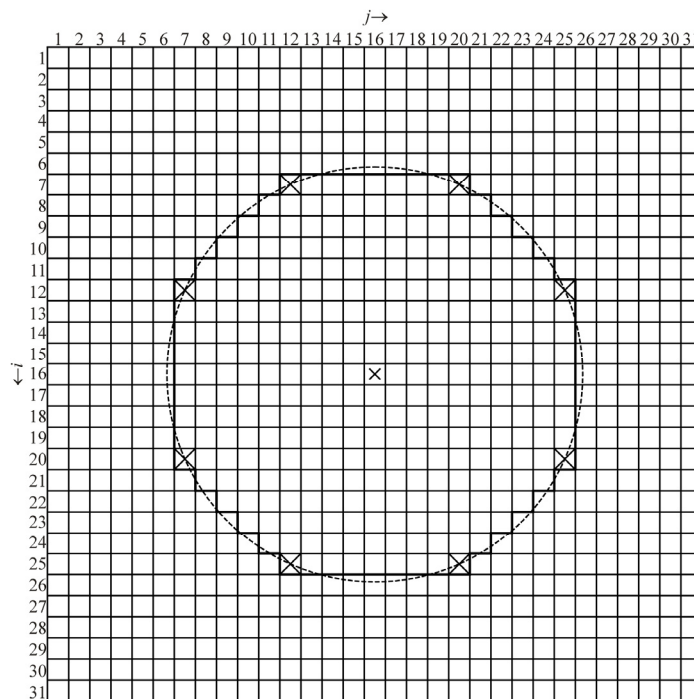


Рис. 6. Растровая диаграмма изображения метки при $r = 9,85 \text{ run}$

Количество n_l строк растровой матрицы, пересекающих изображение метки при моделировании определится по формуле (1):

$$n_l = i \min_{\max} .$$

Значение r_{cl} радиуса изображения метки, измеренное методом подсчета строк, определяется по формуле

$$r_{cl} = \frac{n_l}{2} \cdot 1 \text{ run} = \frac{19}{2} \cdot 1 \text{ run} = 9,5 \text{ run} .$$

Погрешность результата измерения r_{cl} определится по формуле (2):

$$\epsilon_{rcl} = r_{cl} - r = 9,5 \text{ run} - 9,85 \text{ run} = -0,35 \text{ run} .$$

Истинное значение S площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,85^2 \text{ run}^2 = 97,02\pi \text{ run}^2 \approx 304,8 \text{ run}^2 .$$

Процесс накопления количества пикселей изображения метки n_p построчно представлен в табл. 2.

Таблица 2

Процесс накопления n_p построчно при $r = 9,85run$

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| i | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| $\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$ | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| $\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$ | 9 | 20 | 33 | 48 | 65 | 84 | 103 | 122 | 141 | 160 |
| i | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| $\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$ | 19 | 19 | 19 | 19 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | |
| $\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$ | 179 | 198 | 217 | 236 | 253 | 268 | 281 | 292 | 301 | |

Таким образом, $n_p = 301$.

В соответствии с формулой

$$S_{cp} = n_p \cdot 1run^2 = 301 \cdot 1run^2 = 301run^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей определится по формуле (4):

$$\epsilon_{S_{cp}} = S_{cp} - S = 301run^2 - 97,02\pi run^2 = -3,8run^2 .$$

Измеренное методом подсчета пикселей значение радиуса изображения метки определится по формуле

$$r_{cp} = \sqrt{\frac{S_{cp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{301run^2}{\pi}} = 9,79run .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей определится по формуле (5):

$$\epsilon_{r_{cp}} = r_{cp} - r = 9,79run - 9,85run = -0,06run .$$

При $r = 9,9run$ нарастающее исходное изображение метки захватывает центры новых периферийных пикселей. При $r = (9,9-0)run$ новые периферийные пиксели еще не включены в состав дискретного изображения метки, но исходное изображение метки r уже равно $9,9run$. Из этого следует, что все измеренные значения остаются прежними: $n_l = 19$; $r_{cl} = 9,5run$; $n_p = 301$; $S_{cp} = 301run^2$; $r_{cp} = 9,79run$.

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк $\epsilon_{r_{cl}}$ определится по формуле

$$\epsilon_{r_{cl}} = r_{cl} - r = 9,5run - 9,9run = -0,4run .$$

Истинное значение S площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,9^2 run^2 = 98,01\pi run^2 \approx 307,9run^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей $\epsilon_{S_{cp}}$ определится по формуле

$$\epsilon_{S_{cp}} = S_{cp} - S = 301run^2 - 98,01\pi run^2 = -6,91run^2 .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей $\epsilon_{r_{cp}}$ определится по формуле (5):

$$\epsilon_{r_{cp}} = r_{cp} - r = 9,79run - 9,9run = -0,11run .$$

Аналогичным образом производится расчет показателей для радиусов до 10. Результаты расчетов сведены в табл. 3–5.

Анализ результатов моделирования

В табл. 3 количество строк n_l , пересекающих исходное изображение метки, представлено как функция истинного радиуса изображения метки r .

Таблица 3

Количество строк, пересекающих изображение метки,
как функция радиуса этого изображения

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------|------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|--------------|------|-----------|
| r, run | 9,5 | 9,55 | 9,6 | 9,65 | 9,7 | 9,75 | 9,8 | 9,85 | 9,9 | 9,95 | 10 |
| n_l | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 21 |
| r, run | 10,05 | 10,1 | 10,15 | 10,2 | 10,25 | 10,3 | 10,35 | 10,4 | 10,45 | 10,5 | |
| n_l | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | |

В табл. 3 исходное изображение метки нарастает с шагом $0,05run$ от $9,5run$ до $10,5run$. Центр изображения круглой метки совпадает с центром пикселя. Поэтому при $r = 10run$ изображение круглой метки одновременно захватывает двенадцать центров пикселей. В числе этих центров пикселей центры пикселей столбца растровой матрицы, для элементов которого $j = 16$, относящиеся к ее строкам, для одной из которых $i = 6$, а для другой и $i = 26$. В результате, когда истинный непрерывный радиус изображения метки r достигает значения $r = 10run$, n_l скачкообразно увеличивает свое значение сразу на две единицы: от 19 до 21 (рис. 7).

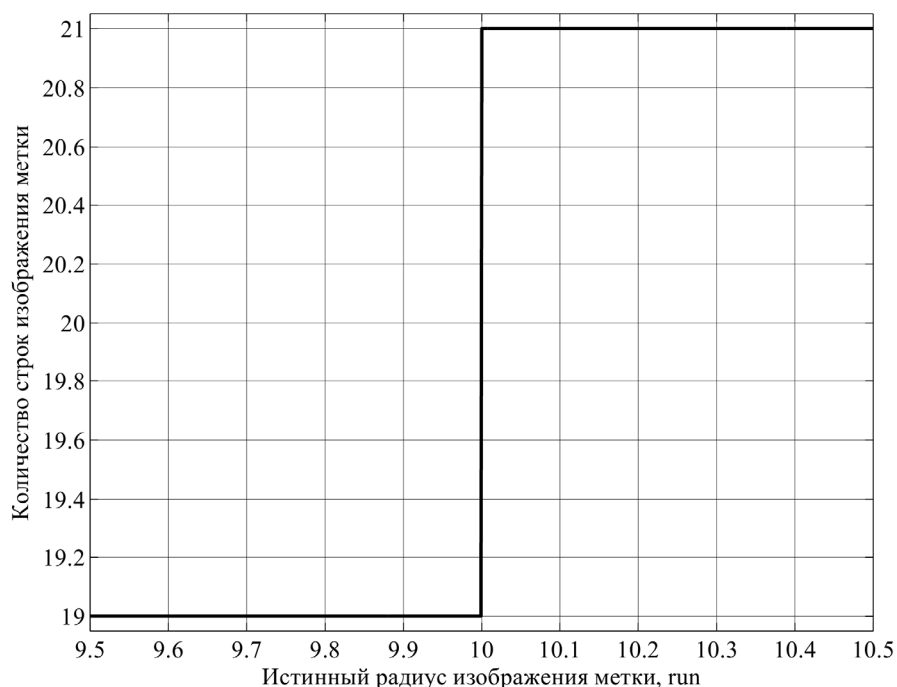


Рис. 7. Количество строк, пересекающих изображение круглой метки,
как функция радиуса этого изображения

В табл. 4 количество пикселей n_p , принадлежащих изображению метки, представлено как функция истинного радиуса изображения метки r .

Таблица 4

Количество пикселей, принадлежащих изображению метки,
как функция радиуса этого изображения

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------|------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|--------------|------|------------|
| r, run | 9,5 | 9,55 | 9,6 | 9,65 | 9,7 | 9,75 | 9,8 | 9,85 | 9,9 | 9,95 | 10 |
| n_l | 293 | 293 | 293 | 293 | 293 | 293 | 293 | 301 | 305 | 305 | 317 |
| r, run | 10,05 | 10,1 | 10,15 | 10,2 | 10,25 | 10,3 | 10,35 | 10,4 | 10,45 | 10,5 | |
| n_l | 325 | 325 | 325 | 333 | 333 | 341 | 341 | 341 | 349 | 349 | |

Количество пикселей изображения метки n_p скачкообразно увеличивает свое значение при тех значениях радиуса изображения метки, при которых нарастающее исходное изображение круглой метки захватывает новые центры пикселей (рис. 8).

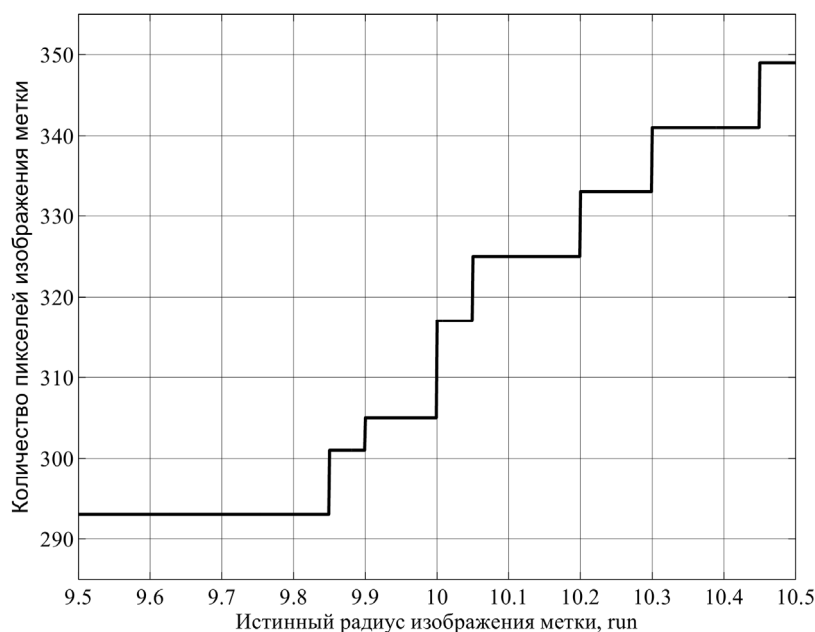


Рис. 8. Количество пикселей, составляющих изображение круглой метки, как функция радиуса этого изображения

Поскольку центр изображения круглой метки совпадает с центром пикселя, а круг является фигурой центрально симметричной, при одном и том же истинном значении радиуса изображения метки либо вообще не захватывает новых периферийных пикселей, либо захватывает не один и не два, а, по меньшей мере, четыре пикселя. Количество добавленных пикселей при каждом захвате представлено в табл. 5

Таблица 5

Количество добавленных пикселей при каждом их захвате
нарастающим исходным изображением метки

| r, run | 9,5 | 9,85 | 9,9 | 10 | 10,05 | 10,2 | 10,3 | 10,45 | 10,5 |
|---------------------|-----|------|-----|----|-------|------|------|-------|------|
| Добавилось пикселей | 0 | 8 | 4 | 12 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 |

Наименьшее ненулевое количество добавленных пикселей реализовалось при $r = 9,9$. Оно равно 4. В результате на рис. 8 значению $r = 9,9run$ соответствует минимальная ступень значения n_p – количества пикселей изображения метки. Наибольшее количество добавленных пикселей реализовалось при $r = 10$. Оно равно 12. В результате на рис. 8 значению $r = 10run$ соответствует максимальная ступень значения n_p – количества пикселей изображения метки. При значениях радиуса изображения метки: $r = 9,85$; $r = 10,05$; $r = 10,2$; $r = 10,3$; $r = 10,45$. Этим значениям на рис. 8 соответствуют средние по величине ступени.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что среднеквадратичное значение погрешности результата измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк $\sigma_{rcl} = 0,29run$. Тот же показатель при измерении той же величины методом подсчета пикселей: $\sigma_{rep} = 0,08run$.

Оценка выигрыша в точности измерения радиуса изображения круглой метки $k_{\sigma_{rep}}$ определится по формуле

$$k_{\sigma_{rep}} = \frac{\sigma_{rcl}}{\sigma_{rep}},$$

где $k_{\sigma_{rep}}$ – оценочный коэффициент выигрыша в точности измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета пикселей по отношению к измерению той же величины методом подсчета строк.

В рассматриваемой модели:

$$k_{\text{српл}} = \frac{\sigma_{\text{rel}}}{\sigma_{\text{срп}}} = \frac{0,29\text{run}}{0,08\text{run}} = 3,62.$$

Таким образом, моделирование показало, что при истинном значении радиуса изображения метки $r = 10\text{run}$ выигрыш в точности измерения радиуса изображения круглой метки при применении технологии подсчета пикселей по отношению к измерению той же величины при применении технологии подсчета строк превышает 3,6 раза.

При применении технологии подсчета строк погрешность результата измерения не зависит от целого числа растровых единиц, составляющих радиус изображения метки. В зависимости от дробной части этого числа и от положения центра тяжести изображения метки по отношению к центру пикселя погрешность результата измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк варьируется в пределах $\pm 0,5\text{run}$.

Поскольку скачкообразные изменения погрешности результата измерения вызваны захватами новых центров пикселей нарастающим исходным изображением круглой метки, выигрыш в точности при применении технологии подсчета пикселей по отношению к технологии подсчета строк будет возрастать по мере увеличения радиуса изображения метки. Прогнозируется также снижение предельной абсолютной погрешности измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей при увеличении радиуса изображения метки. Этот показатель будет также снижаться с ростом площади изображения метки или, что фактически то же самое, с ростом количества пикселей, приходящихся на изображение метки.

Список литературы

1. Киселев Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара : СГАУ, 2010.
2. Лазерные измерители вибрации виброметры. URL: http://coolreferat.com/Лазерные_измерители_вибрации_виброметры (дата обращения: 17.07.2022).
3. Иориш Ю. М. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Машгиз, 1963.
4. Пат. RU 2535237 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 В. А. № 2013128327/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
5. Пат. RU 2535522 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 В. А. № 2013128329/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
6. Grigor'ev A. V., Goryachev N. V., Yurkov N. K. Way of measurement of parameters of vibrations of mirror antennas // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 : proceedings. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147031
7. Grigor'ev A. V., Grishko A. K., Goryachev N. V. et al. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 : proceedings. 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673
8. Григорьев А. В., Трусов В. А., Баннов В. Я. [и др.]. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 106–109.
9. Григорьев А. В., Юрков Н. К., Кочегаров И. И. [и др.]. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее произвольном виброперемещении // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 109–112.
10. Григорьев А. В., Данилова Е. А., Бростилов С. А. [и др.]. Структура методики измерения параметров вибраций по следу вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 13–16.
11. Успанов М. Ж., Кармишин В. С., Савельев Н. Д. [и др.]. Особенности структурного описания центрально асимметричного следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Современные информационные технологии. 2016. № 24. С. 83–89.
12. Григорьев А. В., Кармишин В. С., Кузина Е. А. [и др.]. Анализ вибрационного центрально-асимметричного размытия изображения круглой метки // Научно-техническая конференция НИУ ВШЭ им. Е. В. Арменского : материалы конференции. М., 2017. С. 223–224.
13. Григорьев А. В., Алмаметов В. Б., Долотин А. И. [и др.]. Методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 16–19.

14. Григорьев А. В., Юрков Н. К., Трусов В. А., Баннов В. Я. Структура методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 28–31.
15. Григорьев А. В., Затылкин А. В., Лысенко А. В., Таньков Г. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 31–37.
16. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Бростилов С. А., [и др.]. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 37–41.
17. Григорьев А. В., Гришко А. К., Лапшин Э. В. [и др.]. Вычисление выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 41–44.
18. 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). P. 549–551.
19. Grigoriev 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. – P. 736–742. DOI: 10.1016/j.procs.2021.04.215
20. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Конъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 56–66.
21. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113.
22. 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.
23. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB*. М. : Техносфера, 2006.

References

1. Kiselev Yu.V. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruktsiy aviatsionnoy tekhniki = Vibration diagnostics of systems and structures of aviation equipment*. Samara: SGAU, 2010. (In Russ.)
2. *Lazernye izmeriteli vibratsii vibrometry = Laser vibration meters vibrometers*. (In Russ.). Available at: http://coolreferat.com/Lazernye_izmeriteli_vibratsii_vibrometry (accessed 17.07.2022).
3. Iorish Yu.M. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory. Izd. 2-e, pererab. i dop. = Measurement of vibration and shock. General theory, methods and devices. 2nd ed., reprint. and additional*. Moscow: Mashgiz, 1963. (In Russ.)
4. Patent RU 2535237. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatylnkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach V.A. № 2013128327/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
5. Patent RU 2535522. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatylnkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach V.A. № 2013128329/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
6. Grigor'ev A.V., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Way of measurement of parameters of vibrations of mirror antennas. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings*. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147031
7. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Goryachev N.V. et al. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016: proceedings*. 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673
8. Grigor'ev A.V., Trusov V.A., Bannov V.Ya. et al. Modeling of the blur trace of the image of a circular mark with its coplanar and orthogonal vibration displacements. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:106–109. (In Russ.)
9. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. et al. Modeling of the blur trace of the image of a circular mark with its arbitrary vibration displacement. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:109–112. (In Russ.)
10. Grigor'ev A.V., Danilova E.A., Brostilov S.A. et al. The structure of the methodology for measuring vibration parameters by 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*. 2015;2:13–16. (In Russ.)

11. Uspanov M.Zh., Karmishin V.S., Savel'ev N.D. et al. Features of the structural description of the centrally asymmetric trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2016;(24):83–89. (In Russ.)
12. Grigor'ev A.V., Karmishin V.S., Kuzina E.A. et al. Analysis of vibrational centrally asymmetric blurring of the image of a round mark. *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya NIU VShE im. E.V. Armenskogo: materialy konferentsii = Scientific and Technical Conference of the Higher School of Economics named after E. V. Armensky : conference materials*. Moscow, 2017:223–224. (In Russ.)
13. Grigor'ev A.V., Almametov V.B., Dolotin A.I. et al. Method of calibration of the system of three-component measurement of vibration parameters based on the analysis of the geometry 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*. 2015;2:16–19. (In Russ.)
14. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Trusov V.A., Bannov V.Ya. The structure of the methodology for analyzing the trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):28–31. (In Russ.)
15. Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. Formation and description of the reference segments 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*. 2016;(2):31–37. (In Russ.)
16. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Brostilov S.A. et al. Analysis of the reference segments of the trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):37–41. (In Russ.)
17. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Lapshin E.V. et al. Calculation of output parameters of the module measurement system and components of the vibration displacement vector of the studied material point of the control object. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):41–44. (In Russ.)
18. 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)*. 2016:549–551.
19. Grigoriev 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. doi: 10.1016/j.procs.2021.04.215
20. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Conjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2022;(3):56–66. (In Russ.)
21. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Disjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):106–113. (In Russ.)
22. 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 sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):55–63. (In Russ.)
23. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB = Digital image processing in MATLAB*. Moscow: Tekhnosfera, 2006. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Сергеевич Реута

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: saporap@mail.ru

Nikita S. Reuta

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 29.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2023

Принята к публикации / Accepted 27.04.2023