

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ФРАГМЕНТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ

А. В. Григорьев

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель исследования заключается в совершенствовании методики калибровки виброизмерительной системы, в основу функционирования которой положен анализ изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием, за счет установления соответствия между вибрационным перемещением исследуемого элемента поверхности и относительным вибрационным приращением площади изображения тестового фрагмента. Актуальность поставленной цели заключается в существенном снижении погрешности калибровки без удорожания аппаратного обеспечения. *Материалы и методы.* Исследование взаимосвязи между амплитудой вибрационного перемещения элемента поверхности и относительным вибрационным приращением площади изображения тестового фрагмента круглой формы проведено методами численного моделирования и аналитической геометрии. *Результаты.* Обоснована актуальность проблемы создания информационно-измерительных систем, в основу которых положен анализ изображений тестовых фрагментов круглой формы с вибрационным размытием. Проанализированы разработанные ранее методики калибровки таких систем. Сформулирована проблема калибровки виброизмерительной системы, анализирующей размытое по причине вибрации изображение круглого фрагмента. Разработана схема калибровки виброизмерительных систем, основанных на анализе изображений тестовых объектов круглой формы с вибрационным размытием. Показано, что образцовый виброметр, применяемый при калибровке виброизмерительной системы, может измерять вибрации в узком частотном диапазоне и только по прямолинейной траектории, в то время как калибруемая им система способна анализировать вибрации всех возможных частот и сложных траекторий. *Выводы.* Разработана и обоснована методика калибровки виброизмерительных систем, основанных на анализе вибрационного размытия изображения тестового фрагмента круглой формы, связывающая вибрационное перемещение элемента вибрирующей поверхности с относительным вибрационным приращением площади изображения тестового фрагмента круглой формы.

Ключевые слова: вибрация, круглая метка, изображение, размытие, динамика, калибровка, информационно-измерительная система, численное моделирование

Для цитирования: Григорьев А. В. Методика калибровки виброизмерительной системы на основе анализа размытия изображения тестового фрагмента круглой формы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 4. С. 172–180. doi: 10.21685/2227-8486-2023-4-12

METHOD OF CALIBRATING A VIBRATION MEASURING SYSTEM BASED ON THE IMAGE BLUR ANALYSIS OF A ROUND TEST FRAGMENT

A.V. Grigoryev

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

Abstract. *Background.* The purpose of this article is to improve the method of calibration of a vibration measuring system, the operation of which is based on the analysis of the image of a round test fragment with vibrational blur, by establishing a correspondence between the vibrational displacement of the surface element under study and the relative vibrational increment of the image area of the test fragment. The relevance of the goal is to significantly reduce the calibration error without increasing the cost of hardware. *Materials and methods.* The study of the relationship between the amplitude of the vibrational displacement of a surface element and the relative vibrational increment of the area of the image of a round test fragment was carried out by numerical modeling and analytical geometry methods. *Results.* The relevance of the problem of creating information-measuring systems, which are based on the analysis of images of test fragments of a round shape with vibration blur, is substantiated. Previously developed methods for calibrating such systems are analyzed. The problem of calibration of the vibration measuring system, which analyzes the image of a round fragment blurred due to vibration, is formulated. A calibration scheme for vibration measuring systems based on the analysis of images of round test objects with vibration blur has been developed. It is shown that an exemplary vibrometer used in the calibration of a vibration measuring system can measure vibrations in a narrow frequency range and only along a rectilinear trajectory, while the system calibrated by it is capable of analyzing vibrations of all possible frequencies and complex trajectories. *Conclusions.* A method for calibrating vibration measuring systems based on the analysis of vibrational blurring of the image of a round test fragment has been developed and substantiated.

Keywords: vibration, round mark, image, blur, dynamics, calibration, information-measuring system, numerical simulation

For citation: Grigoryev A.V. Method of calibrating a vibration measuring system based on the image blur analysis of a round test fragment. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(4):172–180. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-4-12

Введение

Современные технические системы быстро совершенствуются и при этом усложняются. По мере усложнения систем все большую актуальность приобретает развитие методов и средств дистанционного неразрушающего контроля дефектов, развивающихся в этих системах, в их латентной фазе, т.е. когда дефект еще не сказывается на работе системы. При этом нарастание дефекта дает о себе знать через параметры вибрации системы [1]. В ряде известных систем осуществляется сравнение вибрационного сигнала при выключенном и при включенном источнике вибрации [2]. Задача выявления скрытых дефектов техногенных систем и скрытых опасных процессов, протекающих в системах природных, относится к классу задач обнаружения [3]. В настоящее время стремительно развиваются системы обработки изображений и распознавания образов [4, 5]. В статье [6] приводится сравнение метрологических

характеристик различных способов измерения геометрических параметров цифрового изображения. Восстановление векторных параметров вибрационного перемещения через восстановление динамики изображения рассмотрено в публикациях [7, 8]. В статье [9] доказана линейность калибровочной характеристики виброизмерительной системы, использующей размытие изображения фрагмента круглой формы. Статья [10] обосновывает различие в смыслах и результатах между статическим и динамическим способами калибровки виброизмерительных систем.

***Схема информационно-измерительной системы
для измерения параметров вибрации на основе
анализа размытия тестового фрагмента круглой формы***

Обобщенная схема виброметра, в основу функционирования которого положен анализ вибрационных приращений геометрических параметров изображения тестового фрагмента круглой формы, представлена на рис. 1.

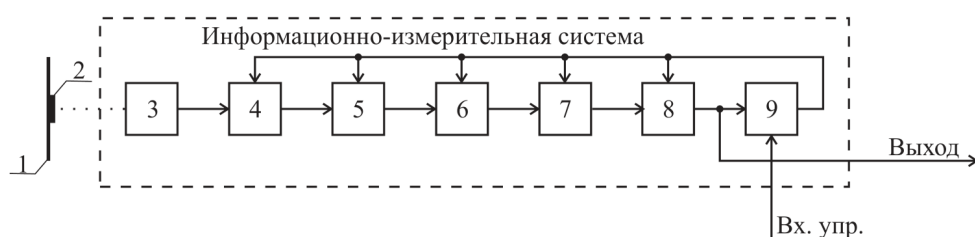


Рис. 1. Примерная структурная схема информационно-измерительной системы для контроля параметров вибрации на основе анализа размытия изображения тестового фрагмента круглой формы

Для осуществления вибрационного контроля состояния объекта на его поверхность 1 наносят контрастную метку 2 круглой формы. Изображение этой метки фиксируется регистрирующим устройством 3, в качестве которого может быть применена, например, цифровая видеокамера. Регистрирующее устройство формирует видеопотоки, т.е. серии изображений заданного объема, которые помещаются в буферный накопитель 4. Перед началом цикла обработки в буферном накопителе содержатся два видеопотока: опорный и актуальный. В качестве опорного видеопотока может быть принят, например, видеопоток, который был получен при неактивном испытуемом источнике вибрации, а в качестве актуального – видеопоток, полученный тогда, когда этот источник активно функционировал. Далее серии изображений поступают в узел бинаризации 5. В этом узле осуществляется преобразование исходных полутоновых цифровых изображений в бинарные при фиксированном пороге бинаризации. Полученные бинарные изображения поступают в контроллер изображений 6, где осуществляется измерение геометрических параметров этих изображений. Информацию о параметрах траектории вибрационного перемещения несут вибрационные приращения геометрических параметров изображений метки. Например, вибрационное приращение площади изображения метки несет информацию об общей интенсивности вибрационного процесса [11]. Числовые последовательности, соответствующие геометрическим параметрам вибрации, загружаются в контроллер приращений 7, где

формируются числовые последовательности вибрационных приращений контролируемых параметров изображений и осуществляется их статистическая обработка. Результаты этой статистической обработки поступают в устройство обработки и выдачи информации, в котором в соответствии с предварительно полученными калибровочными функциями осуществляется преобразование вибрационных приращений геометрических параметров в параметры вибрационных перемещений исследуемого элемента поверхности объекта контроля. Результаты этого преобразования поступают на выход ИИС и на вход устройства управления 9. Данное устройство осуществляет общую синхронизацию и загружает в блоки 4...8 необходимые константы, например пороговые уровни в блок 5 и калибровочные коэффициенты в блок 8. Через вход управления «Вх. Упр.» устройство управления предварительно программируется. Через этот же вход осуществляется загрузка необходимых констант. Возможна реализация блоков 4...9 в виде пакета компьютерных программ.

Ожидаемый положительный эффект от применения этой системы по сравнению с применением лазерного виброметра *PDV-100* заключается в следующем:

1. В возможности контролировать амплитуду вибрационных перемещений, частота которых превышает 100 кГц, в то время как верхняя предельная частота вибраций, контролируемых лазерным виброметром *PDV-100*, составляет 22 кГц. Начальная стадия износа подшипника качения характеризуется генерированием вибраций на частоте 40 кГц и выше.

2. В возможности контролировать параметры траектории вибрационного перемещения произвольной формы, в то время как лазерный виброметр *PDV-100* измеряет только проекцию мгновенного значения вибрационной скорости на оптическую ось виброметра.

Материалы и методы

Задача калибровки виброизмерительной системы, использующей размытие изображения тестового фрагмента круглой формы, заключается в определении функций, отображающих множество числовых значений параметров изображения тестового фрагмента круглой формы во множество числовых значений параметров траектории вибрационного перемещения.

Примерная схема установки для калибровки виброизмерительной системы, в основу которой положен анализ изображения фрагмента круглой формы с вибрационным размытием, представлена на рис. 2.

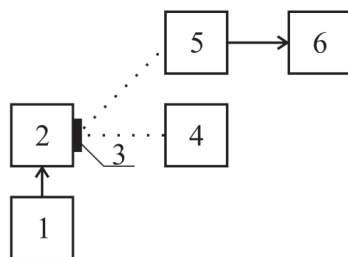


Рис. 2. Примерная схема установки для калибровки виброизмерительной системы, в основу которой положен анализ изображения фрагмента круглой формы с вибрационным размытием

Методика калибровки заключается в следующем. На вибростенде 1 устанавливают несущую деталь 2, на которой закрепляют тестовый фрагмент круглой формы 3. Интенсивность вибрационного перемещения этого фрагмента одновременно измеряют калибруемой ИИС 4, примерная структурная схема которой представлена на рис. 1, и образцовым контрольно-измерительным прибором 5 (например, портативным лазерным цифровым виброметром *PDV-100*). К аналоговому выходу образцового виброметра подключают осциллограф 6. С помощью ИИС 4 способом, описание и обоснование которого представлено в работе [11], измеряют амплитуду вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности. Параллельно осуществляют измерение амплитуды вибрационной скорости с помощью образцового виброметра и осциллографа. Поскольку вибростенд 1 совершает колебания по гармоническому закону, вычисление амплитуды вибрационного перемещения осуществляют по формуле $S = V / \omega$, где S – амплитуда вибрационного перемещения; V – амплитуда вибрационной скорости; ω – циклическая частота вибрации.

Частоту вибрации вибростенда устанавливают в пределах 50...120 Гц, так как в этом диапазоне оператору предоставляется возможность получить приемлемое разрешение процесса по времени для определения амплитуды по осциллографу, поскольку максимальная частота измеряемой вибрационной скорости виброметром *PDV-100* составляет 22 кГц. Амплитуду вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности несущей детали 2 варьируют в диапазоне ожидаемой вибрации объекта контроля. Уровень порога бинаризации также варьируют. В результате получают семейство функций относительного вибрационного приращения площади изображения тестового фрагмента от амплитуды вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности несущей детали 2 при различных порогах бинаризации.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлено полученное автором экспериментальное семейство таких функций.

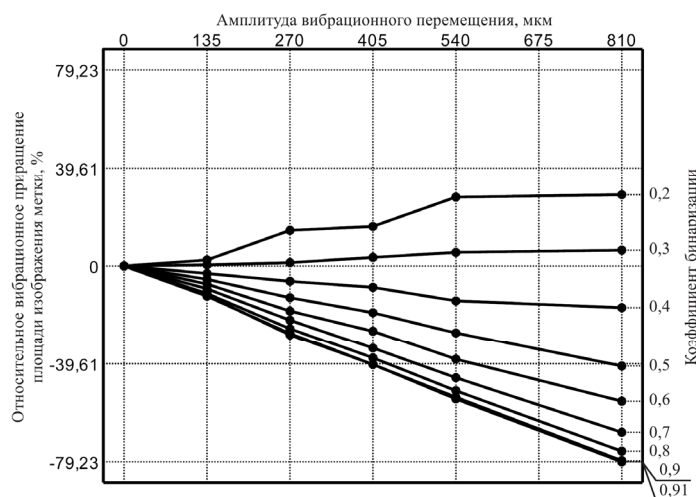


Рис. 3. Семейство экспериментальных графиков вибрационного приращения площади изображения круглой метки как функции амплитуды вибрационного перемещения при различных коэффициентах бинаризации

Каждую из полученных экспериментальных функций аппроксимируют полиномом первого порядка по методу наименьших квадратов. По результатам этой аппроксимации выявляют ту функцию, для которой среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от полученной прямой минимально. Пороговый уровень, соответствующий этой функции, принимают в качестве рабочего порогового уровня. В итоге функция преобразования амплитуды вибрационного перемещения несущей детали 2, генерируемого вибростендом 1, в относительное вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы выражается формулой

$$\delta_{Simt} = a_1 A_x + a_0, \quad (1)$$

где δ_{Simt} – относительное вибрационное приращение площади изображения тестового фрагмента круглой формы; a_1, a_0 – коэффициенты полинома первой степени, аппроксимирующего относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки как функцию амплитуды вызвавшего его вибрационного перемещения; A_x – амплитуда вибрационного перемещения исследуемого элемента поверхности объекта контроля.

В качестве восстановительной функции, встраиваемой в систему при ее штатном функционировании принимают полином первой степени

$$A_x = b_1 \delta_{Simt} + b_0, \quad (2)$$

коэффициенты которого вычисляют по формулам

$$b_1 = \frac{1}{a_1}; b_0 = -\frac{a_0}{a_1}. \quad (3)$$

Требования к образцовому виброметру:

- 1) образцовый виброметр должен быть бесконтактным;
- 2) для функционирования образцового виброметра в составе установки для калибровки виброизмерительной системы, в основу которой положен анализ вибрационного размытия тестового фрагмента круглой формы, достаточна его способность измерять одну проекцию вектора вибрационной скорости;
- 3) диапазон частот измеряемых вибраций: 50...120 Гц;
- 4) относительная погрешность измерения вибрационной скорости не должна превышать величину $\pm 0,5\%$.

Калибровочные коэффициенты определяются радиусом тестового фрагмента круглой формы. В процессе эксплуатации виброизмерительной системы качество тестового фрагмента и настройки объектива регистрирующего устройства могут измениться, поэтому калибровку виброизмерительной системы рекомендуется выполнять раз в год.

Заключение

В статье предложена новая методика калибровки виброизмерительной системы, в основу работы которой положен анализ изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием. Выполнена постановка задачи калибровки таких систем, обоснована ее актуальность для обнаружения предаварийных состояний как техногенных, так и природных объектов. Сформулирована проблема калибровки виброизмерительной системы

с применением анализа размытия изображения тестового фрагмента круглой формы. Составлена и обоснована примерная схема установки для калибровки виброизмерительных систем с анализом вибрационного размытия изображений. Сформулированы требования к образцовому виброметру, применяемому при калибровке виброизмерительной системы.

Список литературы

1. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Система контроля параметров воздушных линий электропередачи в режиме реального времени // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 90–95. doi:10.21685/2227-8486-2021-4-8
2. Алимуратов А. К. Способ сегментации речь/пауза на основе энергетического оператора Тигера // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 52–63. doi: 10.21685/2227-8486-2021-4-5
3. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 33–41. doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-4
4. Кошелев Н. Д., Алхатем А., Новиков К. С. [и др.]. Управление искусственных нейронных сетей распознавания раскладов образов высокого разрешения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 85–91. doi: 10.21685/2307-4205-2022-2-10
5. Юрков Н. К., Бецов А. В., Самокутяев А. М. Мультиагентное управление сложными динамическими системами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 6–12.
6. Григорьев А. В., Чибриков А. А., Таньков Г. В., Данилова Е. А. Вероятностное прогнозирование погрешностей измерения радиуса изображения круглой метки по технологиям подсчета строк и пикселей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 252–254.
7. Лысенко А. В., Рыбаков И. М., Горячев Н. В. [и др.]. Формирование управляющего сигнала интеллектуальной системы вибрационных испытаний электронной аппаратуры // Проектирование и технология электронных средств. 2022. № 3. С. 48–53.
8. Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Абдирашев О. К. [и др.]. Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 58–72. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-7
9. 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
10. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 131–138. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-14
11. Патент 2798740 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. ; опубл. 26.06.2023, Бюл № 18.

References

1. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Real-time monitoring system for overhead power transmission lines. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* =

- Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society.* 2021;(4):90–95. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-4-8
2. Alimuradov A.K. The method of segmentation speech/pause based on the energy operator Tigera. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2021;(4):52–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2021-4-5
 3. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):33–41. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-4
 4. Koshelev N.D., Alkhatem A., Novikov K.S. et al. Management of artificial neural networks for recognizing high-resolution image storyboards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):85–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-2-10
 5. Yurkov N.K., Betskov A.V., Samokutyaev A.M. Multi-agent control of complex dynamic systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality.* 2023;1:6–12. (In Russ.)
 6. Grigor'ev A.V., Chibrikov A.A., Tan'kov G.V., Danilova E.A. Probabilistic forecasting of errors in measuring the radius of the image of a round mark using row and pixel counting technologies. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality.* 2018;1:252–254. (In Russ.)
 7. Lysenko A.V., Rybakov I.M., Goryachev N.V. et al. Formation of the control signal of an intelligent system of vibration tests of electronic equipment. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means.* 2022;(3):48–53. (In Russ.)
 8. Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Abdirashev O.K. et al. Methodology for estimating the residual life of an electronic unit using accelerating factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):58–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-7
 9. 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
 10. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):131–138. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-14
 11. Patent 2798740 Russian Federation. A method for monitoring the technical condition of mechanisms. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; publ. 26.06.2023, Bull. No. 18. (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: a_grigorev@mail.ru

Aleksey V. Grigoryev
Candidate of technical sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department radio equipment
design and production,
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 23.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 02.10.2023

Принята к публикации/Accepted 17.11.2023