

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДАВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО ВИБРАЦИОННОМУ РАЗМЫТИЮ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ФРАГМЕНТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ

А. В. Григорьев

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предпринимается попытка расширения функциональных возможностей информационно-измерительных систем, предназначенных для дистанционного измерения и анализа вибрационных процессов, протекающих в техногенных и природных объектах. Актуальность этой проблемы обусловлена тем, что вибрационные процессы содержат много информации о состоянии объекта контроля. Известные на сегодняшний день информационно-измерительные системы добывают только небольшую часть этой информации. *Материалы и методы.* Исследования амплитуды вибросмещения элемента поверхности объекта контроля и ее динамики проведены путем многократных измерений площади изображения фрагмента круглой формы с последующей проверкой нулевой гипотезы методами математической статистики. *Результаты.* Сформулирован принцип оценивания среднеквадратичного значения вибрационного перемещения элемента поверхности объекта контроля по произвольной траектории на основе анализа вибрационного размытия изображения тестового фрагмента круглой формы. Предложена методика экспериментального определения кратности обнаружения вибрационного сигнала объекта контроля, по результатам которого принимается решение о возможности вибрационного мониторинга конкретного объекта с целью заблаговременного предупреждения о приближающихся отказах оборудования, техногенных авариях и природных катастрофах. *Выводы.* Разработана и экспериментально апробирована методика исследования возможности идентификации предаварийного состояния объекта контроля по вибрационному приращению площади изображения тестового фрагмента круглой формы. Подтверждена возможность мониторинга источника питания компьютера «CZ» с целью идентификации его предаварийного состояния информационно-измерительной системой на основе анализа изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием.

Ключевые слова: вибрационный контроль, круглая метка, вибросмещение, произвольная траектория, предаварийное состояние, обнаружение сигнала, среднеквадратичное значение, доверительный интервал

Для цитирования: Григорьев А. В. Исследование возможности идентификации предаварийного состояния объекта по вибрационному размытию изображения тестового фрагмента круглой формы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 1. С. 149–158. doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-11

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF IDENTIFYING A PRE-EMERGENCY CONDITION OF AN OBJECT BY VIBRATION BLURRY OF THE IMAGE OF A ROUND-SHAPED TEST FRAGMENT

A.V. Grigoryev

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

Abstract. *Background.* The article attempts to expand the functionality of information-measuring systems designed for remote measurement and analysis of vibration processes occurring in man-made and natural objects. The relevance of this problem is due to the fact that vibration processes contain a lot of information about the state of the test object. Currently known information measurement systems obtain only a small part of this information. *Materials and methods.* Studies of the amplitude of vibration displacement of the surface element of the test object and its dynamics were carried out by repeated measurements of the image area of a circular fragment, followed by testing the null hypothesis using mathematical statistics methods. *Results.* A principle is formulated for estimating the root-mean-square value of the vibrational movement of a surface element of a test object along an arbitrary trajectory based on an analysis of the vibrational blurring of the image of a round test fragment. A technique is proposed for experimentally determining the frequency of detection of a vibration signal of a monitored object, based on the results of which a decision is made on the possibility of vibration monitoring of a specific object in order to provide early warning of impending equipment failures, man-made accidents and natural disasters. *Conclusions.* A method has been developed and experimentally tested to study the possibility of identifying the pre-emergency state of a test object by the vibration increment of the image area of a round test fragment. The possibility of monitoring the power supply «CZ» of the computer in order to identify its pre-emergency state by an information-measuring system based on image analysis of a round-shaped test fragment with vibration blur has been confirmed.

Keywords: vibration control, round mark, vibration displacement, arbitrary trajectory, pre-emergency state, signal detection, root mean square value, confidence interval

For citation: Grigoryev A.V. Research of the possibility of identifying a pre-emergency condition of an object by vibration blurry of the image of a round-shaped test fragment. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(1):149–158. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-1-11

Введение

Идентификация предаварийных состояний техногенных систем и состояний, предшествующих природным катастрофам, повышает безопасность жизни людей и экономит ресурсы, предназначенные для обслуживания оборудования. В частности, в статье [1] анализируются причины аварий на воздушных линиях электропередачи, обосновывается необходимость создания информационно-измерительной системы (ИИС) контроля таких линий непосредственно в процессе их эксплуатации. В статье [2] анализируется метод активного вибросейсмического мониторинга. Обосновано, что достоверность прогнозирования землетрясений этим методом самая высокая в мире. В исследовании [3] говорится о том, что промышленное внедрение этого метода тормозит необходимость создания дорогостоящих сетей сейсмического

наблюдения. В диссертационной работе [4] обоснована актуальность дистанционного вибрационного контроля состояния механических систем, содержащих подшипники качения. Известен способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации [5]. В статьях [6–9] предлагаются методы моделирования вибрационного сигнала с целью прогнозирования состояний различных объектов. Методы требуют экспериментальной проверки. Для ее осуществления, так же, как и для решения проблемы идентификации предаварийных состояний объектов, необходимы соответствующие виброизмерительные системы. Однако применяемые в настоящее время методы и средства измерения параметров вибрации не соответствуют поставленным задачам по трем причинам:

1. Все описанные выше способы контроля технического состояния объектов основаны на обработке последовательности разнесенных во времени значений контролируемого параметра вибрации. В связи с этим верхняя граница частотного диапазона контролируемой применяемых в настоящее время в вибродиагностике контактных систем не превышает 10 кГц, а бесконтактных – 22 кГц. В то время как, например, тела качения в шариковых и роликовых подшипниках, прокатываясь по шероховатостям дорожек, генерируют вибрационный сигнал частотой 40–60 кГц.

2. Применяемые в настоящее время системы при решении выше указанных задач дают сильно заниженную оценку общего уровня вибрации, так как измеряют только одну проекцию траектории вибрации исследуемого элемента поверхности объекта контроля (ОК).

3. Для контроля параметров вибрации распределенных объектов, таких как линии электропередач, фрагменты литосферы Земли, мосты, здания, сооружения, необходимо большое количество контактных датчиков, размещение и эксплуатация которых представляет весьма сложную задачу. К тому же прогнозируется неудовлетворительная надежность таких систем.

В патенте [10] предлагается способ измерения параметров вибрации объекта, в основу которого положен анализ параметров изображения тестового объекта с вибрационным размытием. В качестве тестового объекта применяется мира, у которой параллельные парные штрихи расположены на расстоянии, равном удвоенной ширине штриха. В результате преодолевается первый из описанных недостатков и, возможно, третий, но второй недостаток остается.

В патенте [11] предлагается способ контроля технического состояния механизмов, составной частью которого является способ измерения вибросмещения исследуемого элемента поверхности, свободный от перечисленных выше недостатков. Этот способ также основан на анализе изображения тестового фрагмента с вибрационным размытием, но форма этого тестового фрагмента является круглой. В результате преодолеваются все три вышеописанных недостатка применяемых в настоящее время виброизмерительных систем:

1. Верхняя частотная граница исследуемой вибрации превышает частоты всех возможных вибрационных процессов, поскольку частота вибрации на параметры размытия изображения не влияет.

2. По причине круглой формы тестового фрагмента в приращении площади его изображения принимают равное участие вибрационные составляющие по всем направлениям.

3. Возможен контроль вибраций распределенных объектов по многим точкам, поскольку данная виброизмерительная система встраивается в систему дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы

Изображение тестового фрагмента круглой формы при активном источнике вибрации деформируется. В результате изменяется площадь этого изображения, измеряемая количеством составляющих его растровых элементов. Это изменение (приращение) x площади изображения тестового фрагмента круглой формы принимается в качестве инварианта общего уровня вибрационного сигнала ОК, вызвавшего это приращение. Периодический контроль x является базой для идентификации предаварийного состояния ОК. Для измерения x необходима статистическая выборка пар изображений тестового фрагмента. Внутри каждой из этих пар одно изображение принимают в качестве **информационного** (того, площадь которого учитывают), а другое – в качестве **опорного** (того, относительно площади которого отсчитывают приращение площади информационного изображения).

Для оценки общего уровня вибрации применялась экспериментальная установка, примерная схема которой представлена на рис. 1.

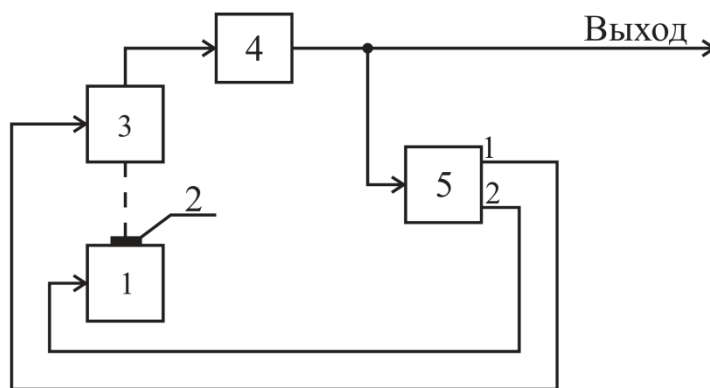


Рис. 1. Структура экспериментальной установки для оценки среднего квадратичного значения вибросмещения тестового элемента поверхности ОК при произвольной вибрационной траектории

На поверхность источника вибрации 1 наносят тестовый фрагмент круглой формы 2. Регистрирующее устройство 3 настраивают таким образом, чтобы тестовый фрагмент 2 оказался в плоскости объекта регистрирующего устройства 3. Изображения, формируемые регистрирующим устройством 3, поступают в вычислительное устройство 4, которое осуществляет обработку и анализ поступающих в него данных. Оно же через узел коммутации 5 управляет источником вибрации 1 и регистрирующим устройством 3.

Регистрирующее устройство 3 под управлением вычислительного устройства 4 формирует видеопоток, представленный в виде матрицы D :

$$D = (d_{kij})_{K \times 2 \times I \times J} \quad (1)$$

Описание индексов в формуле (1) приведено в табл. 1.

Таблица 1

Индексы в формуле (1)

Обозначение	Диапазон	Описание
k	$[1, K]$	Порядковый номер пары изображений
c	$[1, 2]$	Идентификатор роли изображения в паре
	1	Опорное
	2	Информационное
i	$[1, I]$	Порядковый номер растровой строки
j	$[1, J]$	Порядковый номер растрового столбца

Вычислительное устройство 4 начинает обработку поступающих в него данных с преобразования матрицы элементов полутонных изображений D в матрицу элементов бинарных изображений B :

$$B = (b_{kcij})_{K \times 2 \times I \times J}, b_{kcij} = \theta(d_{kcij} - d_{il}), \quad (2)$$

где θ – единичная функция Хевисайда; d_{il} – порог бинаризации.

Далее вычислительное устройство 4 вычисляет площадь s_{kc} каждого бинарного изображения тестового фрагмента, входящего в видеопоток B , в результате чего формируется матрица значений площади изображения тестового фрагмента S :

$$S = (s_{kc})_{K \times 2}, s_{kc} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{kcij}. \quad (3)$$

Формируют матрицу X вибрационных приращений x площади изображения тестового фрагмента:

$$X = (x_{1k})_{1 \times K}, x_{1k} = s_{k2} - s_{k1}. \quad (4)$$

Вычисляют среднее значение m_X и среднеквадратичное отклонение σ_X элементов матрицы X :

$$m_X = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_{1k}, \quad (5)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_{1k} - m_X)^2}. \quad (6)$$

Решение задачи обнаружения вибрационного сигнала ОК начинается с определения границ доверительного интервала C_{mX} , в пределах которого с заданной доверительной вероятностью находится среднее значение (СЗ) m_X элементов матрицы X , если вибрационный сигнал ОК отсутствует. Вибрационное приращение x площади изображения тестового фрагмента круглой формы является монотонной функцией среднего квадратичного значения вибросмещения тестового элемента поверхности ОК, вызвавшего это приращение. В зависимости от уровня порога бинаризации эта функция является либо монотонно возрастающей, либо монотонно убывающей. В первом случае доверительный интервал C_{mX} является правосторонним, а во втором – левосторонним, т.е.

$$C_{mX} = \begin{cases} (-\infty, m_{X \min p}), d_{il} \leq d_{ilinc} \\ (-m_{X \min p}, \infty), d_{il} \geq d_{ildec} \end{cases}, \quad (7)$$

где $m_{X \min p}$ – граница критической области значений m_X ; d_{ilinc} – уровень порога бинаризации, ограничивающий сверху область возрастания функции $m_X(d_{rms})$; d_{ildec} – уровень порога бинаризации, ограничивающий снизу область убывания функции $m_X(d_{rms})$; d_{rms} – среднее квадратичное значение вибросмещения тестового элемента поверхности ОК. Если $d_{il} \in (d_{ilinc}, d_{ildec})$, то вибрационное приращение x площади изображения тестового фрагмента круглой формы практически не коррелирует с d_{rms} .

Из формулы (7) следует, что

$$H_1 = \theta(|m_X| - m_{X \min p}), \quad (8)$$

где H_1 – функция обнаружения вибрационного сигнала ОК, принимающая значение, равное единице, в случае такого обнаружения, и нулю, в противном случае; $m_{X \min p}$ – минимальное по абсолютной величине значение m_X , при котором виброизмерительная система отличает d_{rms} от нуля с заданной доверительной вероятностью p .

Значение $m_{X \min p}$ вычисляют в соответствии с ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) «Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего», принимая во внимание, что ожидаемое значение m_X равно нулю при условии равенства нулю функции H_1 :

$$m_{X \min p} = \frac{t_{pK}}{\sqrt{K}} \sigma_X, \quad (9)$$

где t_{pK} – односторонний квантиль распределения Стьюдента при доверительной вероятности p и объеме выборки K .

На основе полученного результата вычисляют кратность обнаружения вибрационного сигнала ОК V_{sdr} :

$$V_{sdr} = \frac{|m_X|}{m_{X \min p}}. \quad (10)$$

Эксперимент с целью оценки V_{sdr} заключался в следующем. К корпусу источника вторичного электропитания компьютера «CZ» был прикреплен тестовый фрагмент круглой формы. Последовательности изображений этого фрагмента формировались с помощью микроскопа *DigiMicroProf*. В качестве источника вибрационного сигнала был принят вентилятор, расположенный внутри блока. Этот вентилятор новый, его работа на слух не воспринимается. Коммутация источника питания осуществлялась через каждые пять фотографий фрагмента. В итоге были получены две последовательности фотографий одного и того же тестового фрагмента круглой формы, состоящие из 100 элементов каждая ($K = 100$).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены два изображения тестового фрагмента круглой формы, полученные с помощью микроскопа *DigiMicroProf*.



Рис. 2. Изображения тестового фрагмента круглой формы, полученные с помощью микроскопа *DigiMicroProf*:
 а – без вибрационного размытия; б – с вибрационным размытием

По формуле (4) вычислялись значения элементов матрицы X . На рис. 3 они представлены графически.

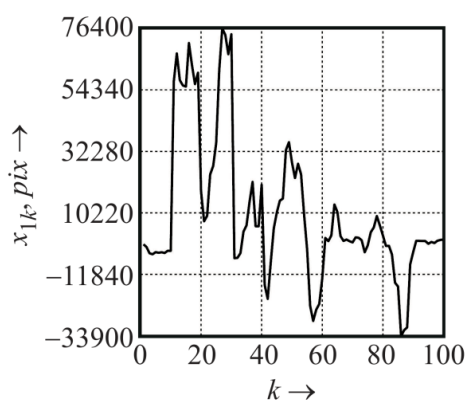


Рис. 3. Значения элементов матрицы X

Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 2

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Формула	Значение	
1	2	3	4	5	
Количество элементов матрицы X	K	–	*	100	
Среднее значение элементов матрицы X	m_X	pix	(5)	10162	
Среднее квадратичное значение элементов матрицы X	σ_X	pix	(6)	25764	
Доверительная вероятность	p	–	*	0,95	0,99
Квантиль распределения Стьюдента	t_{pK}	–	**	1,661	2,364
Граница критической области значений m_X	$m_{Xmin p}$	pix	(9)	4278	6092

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	
Функция обнаружения вибрации ОК	H_1	–	(8)	1	1
Кратность обнаружения вибрационного сигнала ОК	V_{sdr}	–	(10)	2,375	1,668

П р и м е ч а н и я: * – исходные данные. ** – ГОСТ Р 50779.22-2005.

Из табл. 2 видно, что минимальное m_x , при котором виброизмерительная система отличает вибрационный сигнал испытуемого вентилятора от нуля с доверительной вероятностью $p = 0,95$, в 2,375 раза меньше экспериментального m_x . Из этого следует потенциальная возможность применения данной виброизмерительной системы для вибрационного мониторинга аналогичных вентиляторов с целью идентификации предаварийных (предотказных) состояний.

Заключение

Обоснована актуальность проблемы совершенствования методов и средств вибрационного контроля объектов с целью предупреждения отказов оборудования и аварий. Изложены общие принципы контроля вибрационных процессов на основе анализа изображения тестового фрагмента круглой формы с вибрационным размытием. Сформулирован и обоснован инвариант среднеквадратичного значения вибросмещения тестового элемента поверхности ОК. Приведена общая структура экспериментальной установки для оценки общего уровня вибрации источника. Поэтапно описан процесс формирования матрицы вибрационных приращений площади изображения тестового фрагмента круглой формы. Приведена методика оценки кратности обнаружения вибрационного сигнала объекта контроля. Показано, что знание этого параметра позволяет выработать рекомендации о возможности применения конкретной виброизмерительной системы для оценки возможности идентификации предаварийного состояния объекта контроля. Приведено описание экспериментального исследования возможности идентификации предотказного состояния вентилятора источника вторичного электропитания компьютера «CZ».

Экспериментальная виброизмерительная система на основе анализа изображения тестового фрагмента круглой формы показала кратность обнаружения вибрационного сигнала нового, заведомо *не* находящегося в предотказном состоянии, вентилятора 2,375 с доверительной вероятностью 95 %. Этот результат указывает на возможность и целесообразность мониторинга состояния вентилятора, аналогичного испытуемому, с целью идентификации его предотказного состояния по вибрационному размытию изображения тестового фрагмента круглой формы.

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. Kovalevsky V. V., Glinsky B. M., Khairtdinov M. S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // *Active Geophysical Monitoring*. 2019. P. 43–65.
3. Соловьев В. М., Еманов А. Ф., Елагин С. А., Галева Н. А. Развитие сети активного вибромониторинга в сейсмоактивном Алтае-Саянском регионе // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 2, № 2. С. 46–55. doi: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-46-55
4. Зубко А. И. Комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05. М. : МАИ, 2020. 167 с.
5. Патент 2514119 Российская Федерация. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации / Костюков В. Н., Науменко А. П., Бойченко С. Н., Кудрявцева И. С. ; № 2012100600/28 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. 3 с.
6. Хохлов А. Е., Горбаченко В. И. Анализ устойчивости алгоритмов моделирования колебаний пластин методом конечных разностей // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2022. № 3 (43). С. 158–167. doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-10
7. Якимов А. Н. Моделирование влияния производственных погрешностей на излучение микроволновых антенн // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. № 3. С. 74–82. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9
8. Волотов Е. М., Волотова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеокамер общего назначения // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. № 1. С. 29–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4
9. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистический контроль стабильности вибраций гидроагрегата с использованием метода главных компонент // *Надежность и качество сложных систем*. 2021. № 1 (33). С. 41–48. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-4
10. Патент 2713097 Российская Федерация. Способ измерения параметров вибрации объекта / Зрюмов Е. А., Падалко В. С. ; 2019114530 ; заявл. 13.05.2019 ; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4. 12 с.
11. Патент 2798740 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. ; 2022100947 ; заявл. 17.01.2022 ; опубл. 26.06.2023, Бюл. № 18. 14 с.

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. Kovalevsky V.V., Glinsky B.M., Khairtdinov M.S. Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results. *Active Geophysical Monitoring*. 2019:43–65.
3. Solov'ev V.M., Emanov A.F., Elagin S.A., Galeva N.A. Development of an active vibration monitoring network in the seismically active Altai-Sayan region. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*. 2019;2(2):46–55. (In Russ.). doi: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-46-55
4. Zubko A.I. *Complex technique of vibroacoustic diagnostics of the technical condition of bearing supports of gas turbine engines*. PhD dissertation: 05.07.05. Moscow: MAI, 2020:167. (In Russ.)
5. Patent 2514119 Russian Federation. *Sposob vibrodiagnostiki mekhanizmov po kharakteristicheskoy funktsii vibratsii = Method of vibration diagnostics of mechanisms according to the characteristic function of vibration*. Kostyukov V.N., Naumenko A.P., Boychenko S.N., Kudryavtseva I.S.; № 2012100600/28; appl. 10.01.2012; publ. 27.04.2014, Bull. № 12. 3 p. (In Russ.)

6. Khokhlov A.E., Gorbachenko V.I. Stability analysis of algorithms for modeling plate vibrations by the finite difference method. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2022;(3):158–167. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2022-3-10
7. Yakimov A.N. Modeling the effect of manufacturing errors on the radiation of micro-wave antennas. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):74–82. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9
8. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of the error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4
9. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical control of vibration stability of a hydraulic unit using the principal component method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):41–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-4
10. Patent 2713097 Russian Federation. *Sposob izmereniya parametrov vibratsii ob"ekta* = *A method for measuring the vibration parameters of an object*. Zryumov E.A., Padalko V.S.; 2019114530; appl. 13.05.2019; publ. 03.02.2020, Bull. № 4. 12 p. (In Russ.)
11. Patent 2798740 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov* = *A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; 2022100947; appl. 17.01.2022; publ. 26.06.2023, Bull. № 18. 14 p. (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 of design
and production of radio equipment,
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 11.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 20.02.2024

Принята к публикации/Accepted 04.03.2024