

А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Э. В. Лапшин

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОГО РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ОБЪЕКТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ

A. V. Grigor'ev, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, N. S. Reuta, E. V. Lapshin

### METHOD FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF MOVING MECHANISMS BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF VIBRATION BLURRING IMAGES OF A TEST OBJECT ROUND FORM

**Аннотация.** Доказывается потребность в достоверном периодическом контроле вибрационного состояния современных сложных систем с целью обнаружения в них дефектов на возможно более ранних стадиях их развития. Приведено описание процесса износа подшипников качения и связанной с ним динамики параметров вибрационного сигнала. Проведен анализ требований стандартов к чувствительности средств вибрационного контроля. Проведен анализ установленных действующими стандартами зон вибрационного состояния и возможностей современного контрольного оборудования определять, в какой из этих зон находится контролируемая сложная техническая система. Приведено описание технической сущности предлагаемого в статье способа контроля вибрационного состояния движущихся механизмов. Приведена схема реализации этого способа. Проведен анализ литературных источников, описывающих различные аспекты анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы. Проведен анализ частотного диапазона контролируемого предлагаемым способом вибрационного сигнала. Обоснован прогнозируемый уровень порога чувствительности системы, реализуемой предлагаемым в статье способ контроля. Приведено описание экспериментальной апробации способа. Представлен и проанализирован экспериментальный график последовательности вибрационных приращений площади изображения круглой метки. Приведено описание принципов формирования инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения, на основе которого осуществляется выявление и оценка интенсивности, скрытой на фоне шумов тенденции изменения во времени параметров вибрации испытуемого источника.

**Ключевые слова:** движущийся механизм, подшипник качения, скрытый дефект, износ, вибрационное состояние, контроль, круглая метка, площадь изображения, математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение, критерий Вилкоксона.

**Abstract.** The article proves the need for reliable periodic monitoring of the vibrational state of modern complex systems in order to detect defects in them at the earliest possible stages of their development. A description is given of the wear process of rolling bearings and the associated dynamics of the vibration signal parameters. An analysis of the vibration control tools currently used is shown, which shows that these tools do not support the vibration signal control of operating systems in the required frequency range and with the required sensitivity. The analysis of the vibrational state zones established by the current standards and the capabilities of modern control equipment to determine which of these zones the controlled complex technical system is located in is carried out. The description of the technical essence of the method proposed in the article for controlling the vibrational state of moving mechanisms is given. The implementation scheme of this method is given. The analysis of literary sources describing various aspects of the analysis of vibrational blur of the image of a test object of a round shape is carried out. The analysis of the frequency range controlled by the proposed method of the vibration signal. The predicted level of the sensitivity threshold of the system that implements the control method proposed in the article is substantiated. A description of the experimental testing of the method. An experimental graph of the sequence of vibrational increments of the image area of a round mark is presented and analyzed. The principles of the formation of an invariant of the rate of change of the amplitude of the vibrational displacement are described, on the basis of which the intensity of the tendency of the vibrational parameters of the source under test that is hidden against the background of noise is detected and evaluated.

**Keywords:** moving mechanism, rolling bearing, latent defect, wear, vibrational state, control, round mark, image area, mathematical expectation, standard deviation, Wilcoxon criterion.

### Введение

В процессе эксплуатации движущихся механизмов неизбежно возникают дефекты, которые незаметно развиваются и в конечном итоге приводят к отказам, в том числе и аварийным. Чтобы избежать аварийных ситуаций, необходимо осуществлять периодический контроль работающего механизма, оценивать его техническое состояние для того, чтобы выводить оборудование в ремонт не в аварийном, а в плановом порядке. При этом большое значение имеет контроль вибрационный [1]. Это объясняется тем, что такой контроль осуществляется непосредственно на работающем оборудовании без его остановки и разборки [2]. Кроме того, именно вибрационный сигнал является наиболее информативным [3]. Сравнительный анализ методов измерения параметров вибрации выполнен в статье [4].

Износ подшипника качения осуществляется следующим образом [5]. На начальной стадии износа гладкая поверхность дорожек, по которым перемещаются тела качения (шарики или ролики), становится шероховатой. По этим шероховатостям прокатываются тела качения и генерируют вибрационный сигнал частотой 40–60 кГц, который с течением времени нарастает по амплитуде.

Далее при работе подшипника на его дорожках образуются небольшие углубления. Тела качения (шарики или ролики) прокатываются по этим углублениям. В результате формируется огибающая амплитудно модулированного вибрационного сигнала. Диапазон частот этой огибающей от 1 до 5 кГц. Высокочастотные колебания при этом могут увеличиться в два раза.

С течением времени углубления, образовавшиеся на предыдущей стадии износа, увеличиваются в размере, их количество также увеличивается. Возрастает амплитуда вибрационного сигнала и глубина его модуляции.

На следующей стадии углубления сливаются друг с другом, создавая неровные следы и сколы на дорожках и телах качения подшипника. Подшипник находится в поврежденном состоянии.

Средства вибрационного контроля, которые применяются в настоящее время, не воспринимают высокочастотный вибрационный сигнал подшипников. Например, диапазон частот анализируемой вибрации вибрoанализатора *BALTECH VP-3470-Ex* составляет 2Гц...10кГц. Диапазон частот измеряемой вибрации лазерного виброметра *PDV-100* фирмы *Polytec GmbH* – 0...25кГц. Эти приборы начинают регистрировать вибрационный сигнал тогда, когда появляется низкочастотная огибающая. При этом важно обнаруживать вибрацию уже на той стадии, когда огибающей еще нет. Это позволило бы на более ранней стадии прогнозировать остаточный ресурс, существенно сократило бы время простоя неисправного оборудования, увеличило бы срок его службы, удешевило ремонт и техническое обслуживание.

### Обоснование требований к чувствительности средств вибрационного контроля

Для количественной оценки вибрационного состояния машин и механизмов стандарт [6] устанавливает зоны такого состояния. Контролируемый параметр вибрации нового механизма, только вводимого в эксплуатацию, должен соответствовать зоне *A*. Контролируемый параметр вибрации пригодного к эксплуатации механизма должен соответствовать зоне *B*. Нахождение контролируемого параметра вибрации в зоне *C* указывает на то, что оборудование может функционировать лишь ограниченный промежуток времени до его вывода в ремонт. Вибрация в зоне *D* – это сигнал к немедленной остановке оборудования и выводу его в ремонт.

Стандарт [6] предусматривает два критерия оценки технического состояния: по абсолютной величине контролируемого параметра и по скорости его изменения. Стандарт [7] устанавливает границы зон технического состояния для различных видов оборудования по обоим критериям. При этом второй критерий представляется более универсальным. Его стандартные показатели не зависят от типа контролируемого оборудования. Для всех типов рассматриваемого в стандарте [7] оборудования (насосы, электродвигатели, вентиляторы, компрессоры, редукторы, паропроводы) границе между зонами *B* и *C* соответствует скорость изменения вибрационного ускорения 2,5 (м/с<sup>2</sup>)/ч, скорость изменения вибрационной скорости 1,5 (мм/с)/ч, скорость изменения вибрационного перемещения 4 мкм/ч. Для того, чтобы адекватно оценить скорость изменения реального вибрационного сигнала, следует выполнить приблизительно 100 измерений контролируемого параметра вибрации в течение одного часа. В результате для идентификации границы между зонами *B* и *C* потребуются, чтобы порог чувствительности измерительной системы по вибрационному перемещению не превышал 0,04 мкм.

### Техническая сущность способа

На рис. 1 представлена схема реализации способа контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы.

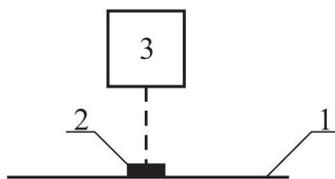


Рис. 1. Схема системы анализа размытия изображения тестового объекта круглой формы

На поверхность 1 объекта контроля или на поверхность, механически связанную с этой поверхностью, наносится тестовый объект в виде метки 2 круглой формы. Изображение этой метки фиксируется регистрирующим устройством 3, в качестве которого может быть применена, например, цифровая фотокамера. Далее обрабатывающее устройство, в качестве которого может быть применен компьютер или контроллер, подсчитывает количество пикселей цифрового изображения круглой метки и идентифицирует это количество как площадь изображения круглой метки [8]. При увеличении амплитуды вибрации растет и вибрационное размытие изображения круглой метки. Для оконтуривания области изображения круглой метки применяются методики, разработанные для обработки электронно-дифракционных картин [9–11]. Технология измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки представлена в статье [12]. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки изложены в статье [13]. Калибровочные измерения вибрметра размытия изображения круглой метки описаны в статье [14].

Фотографирование метки повторяется определенное количество раз (например, 100) через определенный временной интервал. На основе анализа динамики полученных значений площади изображения круглой метки принимается решение о том, развивается там дефект или нет. Если амплитуда вибрационного сигнала нарастает, значит, увеличивается и площадь изображения круглой метки. А это указывает на то, что в механизме развивается дефект.

### Оценка верхней граничной частоты контролируемой вибрации и порога чувствительности системы, реализующей данный способ

Измерительным сигналом, по которому судят об интенсивности вибрационного процесса, является вибрационное приращение площади изображения круглой метки, определяемой количеством пикселей, приходящихся на изображение круглой метки. Это вибрационное приращение (которое может быть как положительным, так и отрицательным) обусловлено размытием изображения круглой метки вследствие вибрационного перемещения ее оригинала. От частоты вибрации вибрационное размытие изображения не зависит. Верхняя граничная частота вибрационного сигнала, воспринимаемого системой, – удвоенная частота излучения, в котором формируется изображение. Если в качестве такого излучения применяется видимый свет, то верхняя граничная частота лежит в области сотен терагерц.

Чувствительность системы по отношению к вибрационному перемещению определяется следующим образом. Вибрационное приращение среднего радиуса изображения круглой метки пропорционально вибрационному перемещению ее оригинала. О среднем радиусе здесь говорится потому, что в результате вибрации круглая форма нарушается. В качестве измерительного сигнала вибрационного перемещения круглой метки выбрано приращение не радиуса, а площади ее изображения. Пусть площадь изображения круглой метки при выключенном испытываемом источнике вибрации составила  $S_{im0} \text{ pix}^2$ , где  $1 \text{ pix}$  – расстояние между центрами пикселей, соседствующих между собой в строке или в столбце раstra. При включенном испытываемом источнике вибрации площадь изображения круглой метки увеличилась на величину  $\Delta S_{im}$ , т.е.

$$S_{imt1} = S_{imt0} + \Delta_{S_{imt}}, \quad (1)$$

где  $S_{imt1}$  – площадь изображения круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации.

Из формулы площади круга следует, что

$$r_{imt} = \sqrt{\frac{S_{imt}}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $r_{imt}$  – радиус изображения круглой метки, измеренный в  $pix$ ;  $S_{imt}$  – площадь изображения круглой метки, измеренная в  $pix^2$ .

Из формулы (2) следует, что

$$r_{imt0} = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}}, \quad (3)$$

где  $r_{imt0}$  – радиус изображения круглой метки при выключенном испытуемом источнике вибрации, измеренный в  $pix$ :

$$r_{imt1} = \sqrt{\frac{S_{imt1}}{\pi}}, \quad (4)$$

где  $r_{imt1}$  – радиус изображения круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации, измеренный в  $pix$ .

Абсолютное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\Delta_{rimp}$ , выраженное в  $pix$ :

$$\Delta_{rimp} = r_{imt1} - r_{imt0}. \quad (5)$$

Относительное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\delta_{rimt}$ :

$$\delta_{rimt} = \frac{\Delta_{rimp}}{r_{imt0}}. \quad (6)$$

Абсолютное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\Delta_{rimm}$ , выраженное в микрометрах, которое является оценкой вибрационного перемещения информативной точки – геометрического центра оригинала круглой метки:

$$\Delta_{rimm} = r_t \delta_{rimt}, \quad (7)$$

где  $r_t$  – радиус оригинала круглой метки.

Последовательные вычисления по формулам (1), (3)–(7) показали, что если, например, радиус оригинала круглой метки  $r_t = 2$  мм, а количество пикселей, приходящихся на изображение круглой метки,  $S_{imt0} = 100000pix^2$  (что вполне доступно при применении недорогого *USB* микроскопа *DigiMicroProf*, реальная разрешающая способность которого составляет  $1Mpix$ ), то при увеличении площади изображения круглой метки на один пиксель оценка вибрационного перемещения информативной точки составит  $0,01$  мкм.

Это и есть порог чувствительности системы к вибрационному перемещению. Применение камер с более высокой разрешающей способностью позволит еще более снизить порог чувствительности системы.

### Экспериментальная апробация способа

Авторами был проведен эксперимент. На поверхность источника питания компьютера, содержащего в своем составе вентилятор размером  $80 \times 80 \times 25$  мм, была нанесена белая круглая метка на черном фоне. Источник питания до эксперимента практически не был в эксплуатации, работает бесшумно. Авторы получили сто фотографий круглой метки при выключенном испытуемом источнике вибрации (вентиляторе) и сто фотографий круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации. Последовательность регистрации фотографий была следующая: сначала регистри-

ровались пять фотографий при выключенном испытуемом источнике вибрации, затем пять фотографий – при включенном испытуемом источнике вибрации, после этого снова пять фотографий – при выключенном испытуемом источнике вибрации и пять фотографий – при выключенном испытуемом источнике вибрации. И так до тех пор, пока не было получено сто цифровых фотографий при выключенном испытуемом источнике вибрации и сто цифровых фотографий при включенном испытуемом источнике вибрации. Формировалась последовательность вибрационных приращений площади изображения круглой метки, вычисленных по формуле

$$\Delta_{Simt}(i) = S_{imt1}(i) - S_{imt0}(i), \quad (8)$$

где  $i$  – порядковый номер результата измерения площади изображения круглой метки в серии.

Графически эта последовательность представлена на рис. 2.

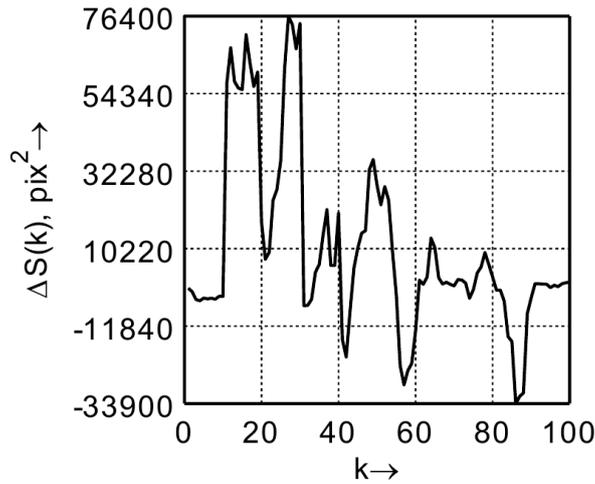


Рис. 2. Экспериментальная последовательность вибрационных приращений площади изображения круглой метки

То, что источник питания новый, и то, что работает он бесшумно, указывает на то, что шарикоподшипник вентилятора находится в начальной стадии износа. Амплитуда вибраций мала, а их частота лежит в ультразвуковом диапазоне. В экспериментальной последовательности преобладают изменения случайного характера, обусловленные большим количеством не поддающихся учету факторов.

На фоне случайных изменений прослеживается общая тенденция вибрационного приращения в сторону уменьшения. Эта тенденция объясняется тем, что измерения проводились на только что включенном источнике питания, когда вибрация снижается за счет саморазогрева вентилятора.

Для того, чтобы засечь эту тенденцию и оценить уровень ее интенсивности, необходимо сформировать статистический инвариант скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения.

### Формирование инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения

На первом шаге формирования инварианта амплитуды вибрационного перемещения вычисляются разности между каждым из приращений  $\Delta_{Simt}(i)$  полученной выборки и всеми последующими ее приращениями:

$$d(k) = \Delta_{Simt}(i) - \Delta_{Simt}(j), \quad (9)$$

где  $i$  и  $j$  – порядковые номера экспериментальных значений вибрационного приращения в выборке значений  $\Delta_{Simt}(i)$  при выполнении условия  $j > i$ ;  $k$  – порядковый номер значения разности  $d$ .

Если выборка  $\Delta_{Simt}$  абсолютно случайная, то сумма отрицательных значений  $d(k)$  приблизительно равна сумме положительных значений  $d(k)$ . Если на фоне случайных изменений прослежива-

ется отрицательный или положительный тренд, то сумма отрицательных или положительных значений  $d(k)$ , соответственно, будет преобладать. Для того, чтобы количественно оценить величину этого преобладания, предлагается вычислить расчетное значение критерия Вилкоксона  $T_{pe}$  [15] по выборке значений разности  $d(k)$ . Объем выборки  $n$  значений разности  $d$  связан с объемом выборки  $n_s$  значений приращения  $\Delta_{Simt}$  формулой

$$n = \frac{n_s(n_s - 1)}{2}. \quad (10)$$

Если  $n \geq 10$ , то закон распределения расчетного значения критерия Вилкоксона  $T_{pe}$  можно считать нормальным, независимо от того, по какому закону распределена исходная выборка значений  $\Delta_{Simt}(i)$ . Параметры этого распределения:

$$M(T_{pe}) = \frac{n(n+1)}{4}, \quad (11)$$

$$\sigma(T_{pe}) = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}, \quad (12)$$

где  $M(T_{pe})$  и  $\sigma(T_{pe})$  – соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение нормально распределенной случайной величины: экспериментальный критерий Вилкоксона [15].

На основе полученного экспериментального значения критерия Вилкоксона формируется статистический инвариант скорости изменения интенсивности вибрации испытуемого источника:

$$Z_T = \frac{T_{pe} - M(T_{pe})}{\sigma(T_{pe})}. \quad (13)$$

Полученное значение  $Z_T$  не зависит от объема выборки  $n$ . Закон распределения величины  $Z_T$  – стандартное нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю и со среднеквадратичным отклонением, равным единице. Если, например, экспериментально полученное  $Z_T$  превышает значение  $u_{0,95}$  – квантиля стандартного нормального распределения при доверительной вероятности 0,95, то можно с доверительной вероятностью более 0,95 утверждать, что обнаружен положительный тренд вибрации. Экспериментальным путем могут быть установлены пороговые уровни  $Z_T$ , соответствующие границам зон  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  вибрационного состояния в соответствии с работой [7].

### Заключение

Обоснована актуальность вибрационного контроля движущихся механизмов, имеющих в своем составе подшипники качения. Приведено описание процесса износа подшипника качения. Обоснована потребность в создании средств контроля, обнаруживающих износ подшипника качения на более ранней его стадии, чем его обнаруживают средства контроля, применяемые в настоящее время. На основе анализа стандартов сформулированы требования к порогу чувствительности средств вибрационного контроля технического состояния движущихся механизмов. Приведены и обоснованы оценки верхней граничной частоты контролируемой вибрации и порога чувствительности системы, реализующей предлагаемый способ. Приведено описание экспериментальных исследований, подтверждающих реализуемость и эффективность представленного в статье способа контроля технического состояния движущихся механизмов. Приведено описание процесса формирования инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения.

### Библиографический список

1. Test station for fibre-optic pressure sensor of reflection type / T. Brostilova, S. Brostilov, N. Yurkov, V. Bannov, A. Grigoriev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the 13th International Conference on TCSET. – 2016. – P. 333–335. – DOI 10.1109/TCSET.2016.7452050.
2. Киселев, Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники / Ю. В. Киселев. – Самара : СГАУ, 2010.

3. Зрюмов, Е. А. Теоретическое и экспериментальное исследование структуры изображения вибрирующего тест-объекта, полученного с помощью ПЗС-фотоприемника видеокамеры / Е. А. Зрюмов, В. С. Падалко, П. А. Зрюмов, С. П. Пронин // Измерение, контроль, информатизация : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2015. – С. 93–97.
4. Сравнительный анализ методов измерения параметров вибрации / П. А. Боков, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, И. Ю. Наумова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 200–202.
5. Бойкин, С. Четыре стадии развития дефекта в подшипнике качения / С. Бойкин. – URL: <http://blog.vibroexpert.ru/?p=348> (дата обращения: 06.06.2020).
6. ГОСТ ISO 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. – Москва : Стандартинформ, 2007.
7. ГОСТ 32106-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. – Москва : Стандартинформ, 2019.
8. Пат. RU 2032218 Устройство для селекции изображений объектов / А. Л. Држевецкий, В. Н. Кантишев, А. В. Григорьев, А. Г. Царев. – Оpubл. 27.03.1995, Бюл. № 24-2000.
9. Григорьев, А. В. Информационно-измерительная система для контроля микроструктуры и фазового состава тонкопленочных материалов : дис. ... канд. техн. наук / Григорьев А. В. – Пенза, 1999.
10. Оконтуривание склона электронно-дифракционного рефлекса / А. В. Григорьев, И. Д. Граб, Н. А. Паксяев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 332–334.
11. Принцип негативно-контурной классификации растровых элементов полутоновых изображений / А. В. Григорьев, А. Л. Држевецкий, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, А. С. Кособоков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 21–24.
12. Технология измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 45–53.
13. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, С. А. Бростилов, Э. В. Лапшин, М. Ю. Михеев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 78–86.
14. Калибровочные измерения виброметра размытия изображения круглой метки на ее размытом изображении / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, А. В. Лысенко, В. А. Трусов, П. Г. Андреев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 208–211.
15. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

## References

1. Brostilova T., Brostilov S., Yurkov N., Bannov V., Grigoriev A. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: proceedings of the 13th International Conference on TCSET*. 2016, pp. 333–335. DOI 10.1109/TCSET.2016.7452050.
2. Kiselev Yu. V. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruksiy aviatsionnoy tekhniki* [Vibration diagnostics of aircraft systems and structures]. Samara: SGAU, 2010. [In Russian]
3. Zryumov E. A., Padalko V. S., Zryumov P. A., Pronin S. P. *Izmerenie, kontrol', informatizatsiya: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Measurement, control, Informatization: proceedings of the XVI international scientific and technical conference]. Barnaul, 2015, pp. 93–97. [In Russian]
4. Bokov P. A., Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Naumova I. Yu. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 200–202. [In Russian]
5. Boykin S. *Chetyre stadii razvitiya defekta v podshipnike kacheniya* [Four stages of development of a defect in a rolling bearing]. Available at: <http://blog.vibroexpert.ru/?p=348> (accessed Jun. 06, 2020). [In Russian]
6. GOST ISO 10816-3-2002. *Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh* [GOST ISO 10816-3-2002. Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts]. Moscow: Standartinform, 2007. [In Russian]
7. GOST 32106-2013. *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Vibratsiya tsentrobezhnykh nasosnykh i kompressornykh agregatov* [GOST 32106-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines. Monitoring of equipment of hazardous production facilities. Vibration of centrifugal pumping and compressor units]. Moscow: Standartinform, 2019. [In Russian]

8. Pat. RU 2032218 *Ustroystvo dlya seleksii izobrazheniy ob"ektov* [Device for selecting images of objects]. A. L. Drzhevetskiy, V. N. Kontishev, A. V. Grigor'ev, A. G. Tsarev. Publ. 27.03.1995, bull. no. 24-2000. [In Russian]
9. Grigor'ev A. V. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema dlya kontrolya mikrostruktury i fazovogo sostava tonkoplenochnykh materialov: dis. kand. tekhn. nauk* [Information and measurement system for monitoring the microstructure and phase composition of thin-film materials: dis. ... cand. tech. sciences']. Penza, 1999. [In Russian]
10. Grigor'ev A. V., Grab I. D., Paksyaev N. A., Trusov V. A., Bannov V. Ya. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2008, vol. 1, pp. 332–334. [In Russian]
11. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Bannov V. Ya., Trusov V. A., Kosobokov A. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 2, pp. 21–24. [In Russian]
12. Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Podsyakin A. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1 (25), pp. 45–53. [In Russian]
13. Grigor'ev A. V., Lysenko A. V., Brostilov S. A., Lapshin E. V., Mikheev M. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 78–86. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Lysenko A. V., Trusov V. A., Andreev P. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 208–211. [In Russian]
15. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p. [In Russian]

**Григорьев Алексей Валерьевич**

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

**Кочегаров Игорь Иванович**

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

**Юрков Николай Кондратьевич**

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

**Реута Никита Сергеевич**

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

**Grigoriev Alexey Valeryevich**

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

**Kochegarov Igor' Ivanovich**

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

**Reuta Nikita Sergeevich**

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

**Лапшин Эдуард Владимирович**

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

**Lapshin Eduard Vladimirovich**

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

---

**Образец цитирования:**

Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 55–63. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-7.