

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-38-48

## СПОСОБ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВИБРОМОНИТОРИНГА, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б.А. ЧИЧКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

В процессе эксплуатации таких машин, как авиационные двигатели и наземные газотурбинные установки, выполняется обязательный вибрационный мониторинг, направленный на предупреждение их возможных повреждений и разрушений при работе на резонансных режимах или из-за усталости материала. В настоящее время для такого контроля, как правило, используется штатная или дополнительная аппаратура, включающая в свой состав одноосевые датчики вибрации различных типов. Контроль в большинстве случаев осуществляется непрерывно, а частота регистрации может различаться от нескольких значений за полет до нескольких значений в секунду. Данные, полученные в ходе штатного вибромониторинга, представляют собой амплитудные значения вибраций. Их подвергают диагностической обработке с использованием допускового контроля и ряда способов сглаживания и оценкам тенденции изменения вибрации в процессе эксплуатации. Все больше распространяющиеся в настоящее время микроэлектромеханические системы (MEMS), как правило, позволяют получать данные о виброускорении, не предоставляя сведений о частотных характеристиках вибрации. Но и штатная аппаратура контроля вибрации, используемая в процессе эксплуатации рассматриваемых машин, не предоставляет сведений о частотных характеристиках вибрации. Однако микроэлектромеханические устройства позволяют получать данные с существенно более высокой частотой отсчета (в десятки и сотни раз), по сравнению с используемой в настоящее время массовой аппаратурой виброконтроля, и осуществлять одновременный контроль вибрации по трем осям при использовании одного датчика. Кроме того, фиксируется не просто амплитудное значение вибрации, но и положение относительно начала отсчета. Имеет ли большой диагностический потенциал информация, получаемая с учетом отмеченных выше особенностей? Не станет ли препятствием к оперативной обработке размерность массивов, получаемых в процессе контроля данных? Материалы настоящей статьи являются попыткой дать ответы на эти вопросы и составить представление о возможности и особенностях оценки технического состояния машин по результатам обработки временных рядов виброускорений, полученных с использованием микроэлектромеханических систем, и способах такой обработки. Представляется, что рассмотренный в статье способ обработки данных вибрационного мониторинга при достаточной простоте реализации позволяет решить задачу оценки технического состояния контролируемого объекта.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, вибрация, датчик вибрации, мониторинг, система микроэлектромеханическая, состояние техническое, способ обработки данных, ускорение вибрационное.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка вибрационного состояния машин (в том числе авиационных двигателей) – неотъемлемая часть процесса технической эксплуатации<sup>1,2</sup> машин [1–5]. Актуальна и задача разработки способов снижения вероятности проявления опасных вибраций и их последствий.

Ранее, в работах [6–7], были рассмотрены способы вибрационного мониторинга роторных машин и способ мониторинга с использованием устройств, имеющих в своем составе микроэлектромеханические системы (далее – MEMS). Мониторинг с использованием MEMS обеспечивает расширение возможностей штатных систем вибрационного мониторинга ро-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52526-2006. Установки газотурбинные с конвертируемыми авиационными двигателями. Контроль состояния по результатам измерений вибрации на невращающихся частях: национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 31320-2006. Вибрация. Методы и критерии балансировки гибких роторов: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.

торных машин – при их наличии, или организации вибрационного мониторинга в случае отсутствия штатных систем вибромониторинга.

Его отличительными чертами является то, что:

- 1) осуществляется одновременная трехосевая оценка виброускорений и вектора вибрации с графическим и символьным представлением данных в режиме реального времени;
- 2) возможно размещение мобильного устройства на различных местах корпусов и агрегатов роторных машин;
- 3) обеспечивается меньшее запаздывание в оценке виброускорений по сравнению с датчиками сейсмического типа;
- 4) возможна архивация регистрируемых данных на внутренний или внешний накопитель мобильного устройства или мониторинг в режиме реального времени, в том числе с передачей на внешние устройства.

Особенностью получаемых массивов данных является их большая размерность вследствие высокой частоты опроса и регистрации (порядка 1000 Гц), достигаемой при применении микроэлектромеханических систем. С одной стороны, полученные массивы достаточно информативны для оценки вибрационного состояния машины, но, с другой стороны, требуют значительных вычислительных ресурсов для диагностической обработки.

Настоящая статья посвящена способу обработки данных вибромониторинга, полученных с использованием MEMS.

## ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

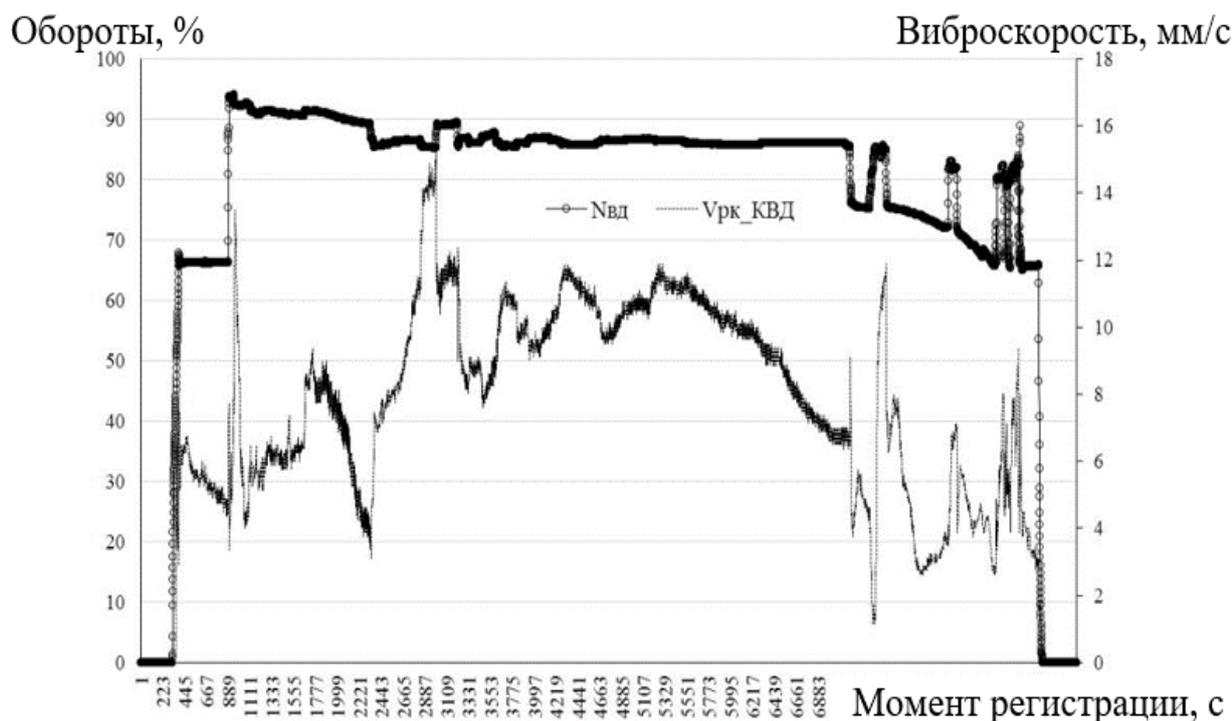
Вибрационный мониторинг и связанные с ним исследования в общем случае базируются на методах анализа частотных характеристик, спектрального и дискриминантного анализа временных рядов [3, 8], допускового контроля [1, 2] и в перспективе нейронных сетей. Для авиационных двигателей они реализованы в ряде способов и методик обработки данных, регистрируемых в эксплуатации<sup>3</sup>.

С целью установления моментов времени и режимов работы двигателя, на которых отмечался существенный рост вибрации, могут использоваться графики вида рис. 1. Они представляют собой графическое изображение временных рядов данных, полученных с использованием бортовой системы контроля, осуществляющей сбор данных с частотой 5 Гц.

Для сглаживания межполетных данных используется процедура скользящего среднего по 10 полетам.

В практике эксплуатации ТРДД вибромониторинг, как правило, сводится к допусковому контролю и тренд-анализу вибраций по наработке с расчетом базового значения параметра по первым 10 полетам (или с учетом работ по техническому обслуживанию). Если обнаруживается опасный тренд параметра и (или) более двух выходов за предельно-допустимое отклонение, то требуется выполнить действия в соответствии с указаниями диагностического Бюллетеня конкретного типа двигателя.

<sup>3</sup> Бюллетень № 94148-БЭ-Г. Изделие: Двигатель ПС-90А. По вопросу: Внедрения в эксплуатацию 2-й очереди наземной автоматизированной системы диагностирования «АСД-Диагноз-90» двигателя ПС-90А на самолете Ил-96-300. Пермь: Авиадвигатель, 1996. 71 с.



**Рис. 1.** Пример изменения за полет оборотов каскада высокого давления (Nвд) и вибрации в районе разделительного корпуса ТРДД, генерируемой компрессором высокого давления (Vрк\_КВД)  
**Fig. 1.** An example of a rotation change of a high pressure spool (Nвд) and vibrations of intermediate case of bypass turbojet vibration, generated by the high pressure compressor (Vрк\_КВД)

### СПОСОБ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВИБРОМОНИТОРИНГА, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MEMS

Предлагаемый далее способ обработки данных вибромониторинга учитывает особенности массивов данных, получаемых с использованием MEMS. Это очень высокая частота опроса датчиков и регистрации данных, одновременное измерение параметров вибрации по трем осям и оценка не только амплитудных значений вибрации, но и положения относительно начала отсчета.

С использованием MEMS были получены временные ряды виброускорений для газотурбинного двигателя в различных технических состояниях и для лабораторной установки «ротор-корпус», в том числе с искусственным нарушением весовой симметрии корпуса [7].

Рассматриваемые данные измерения параметров вибрации могут быть представлены в виде временных рядов (рис. 2–4).

К этим рядам применяется процедура сглаживания с использованием скользящего среднего. Результаты анализа скользящего среднего позволяют выявить направление вектора вибрации с асимметричным распределением, что может указывать на состояние объекта виброконтроля, отличное от исправного.

Данный принцип применим и для анализа сглаженных временных рядов направляющего конуса угла вектора вибрации.

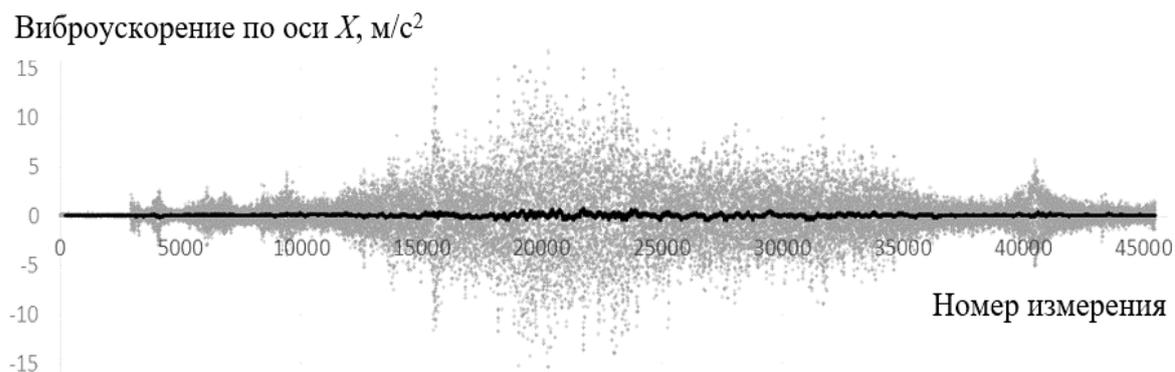


Рис. 2. Временной ряд виброускорений по оси X и скользящее среднее  
Fig. 2. A time series of vibro-accelerations on axes X and a moving average

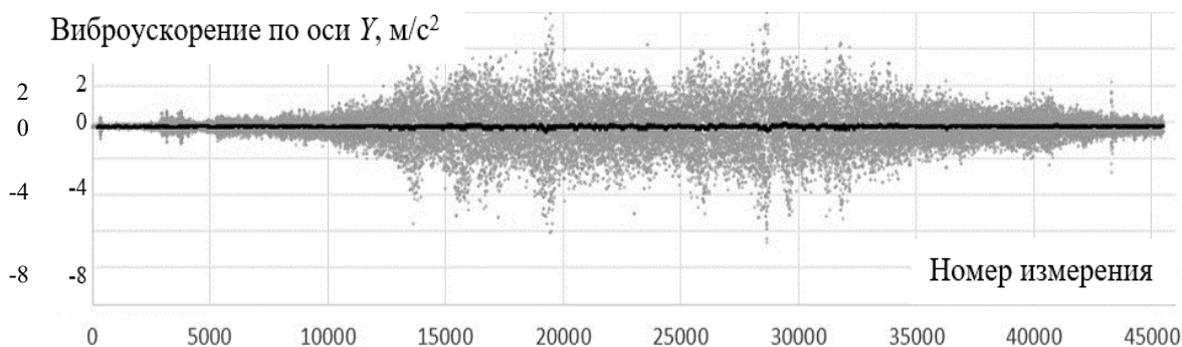


Рис. 3. Временной ряд виброускорений по оси Y и скользящее среднее  
Fig. 3. A time series of vibro-accelerations on axes Y and a moving average

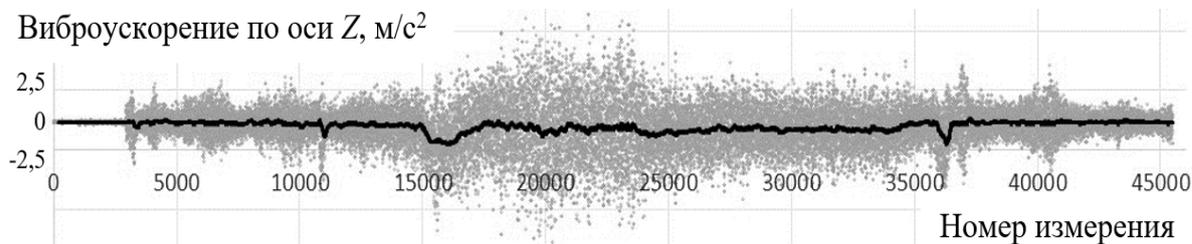


Рис. 4. Временной ряд виброускорений по оси Z и скользящее среднее  
Fig. 4. A time series of vibro-accelerations on axes Z and a moving average

Описание в полярных координатах характеризует вибрационный сигнал в векторной форме для оценки как полного значения вибрации, так и направления ее вектора.

Длина вектора вибрации в  $i$ -м измерении  $L_i$  в трехмерном пространстве (пример динамики на рис. 5):

$$|L_i| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}. \quad (1)$$

Положение вектора вибрации определяется углами  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  и описывается направляющими косинусами этих углов (рис. 6).

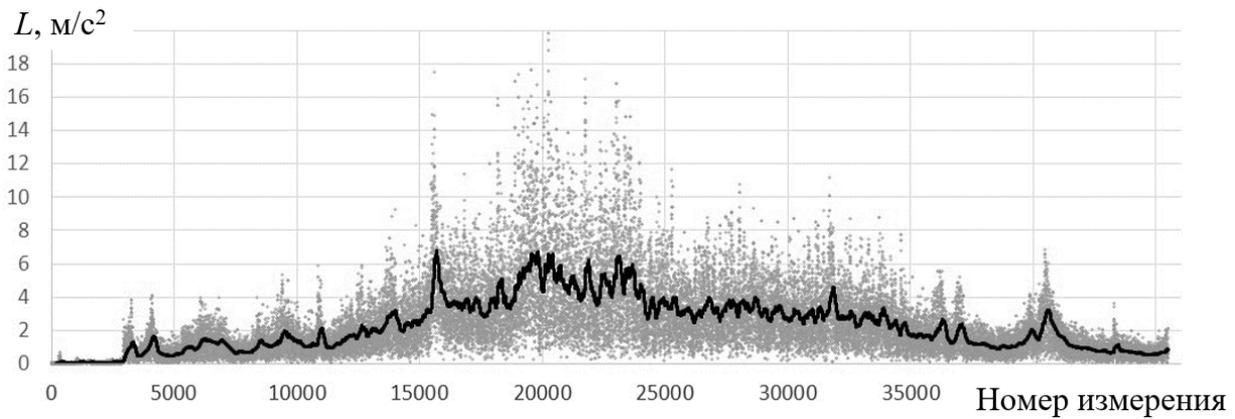


Рис. 5. Временной ряд длин вектора вибрации  
Fig. 5. A time series of lengths of a vibration vector

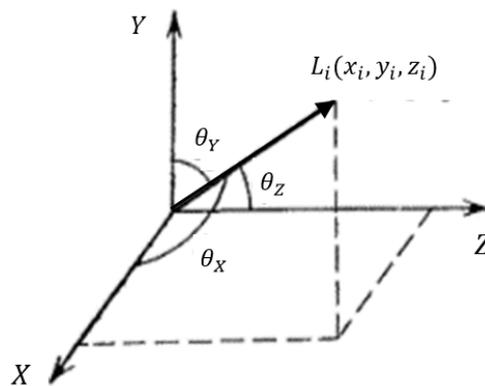


Рис. 6. Положение вектора вибрации  
Fig. 6. The position of a vibration vector

Направляющие косинусы углов (пример динамики на рис. 7):

$$\cos \theta_X = \frac{x_i}{|L_i|}, \quad \cos \theta_Y = \frac{y_i}{|L_i|}, \quad \cos \theta_Z = \frac{z_i}{|L_i|}. \quad (2, 3, 4)$$

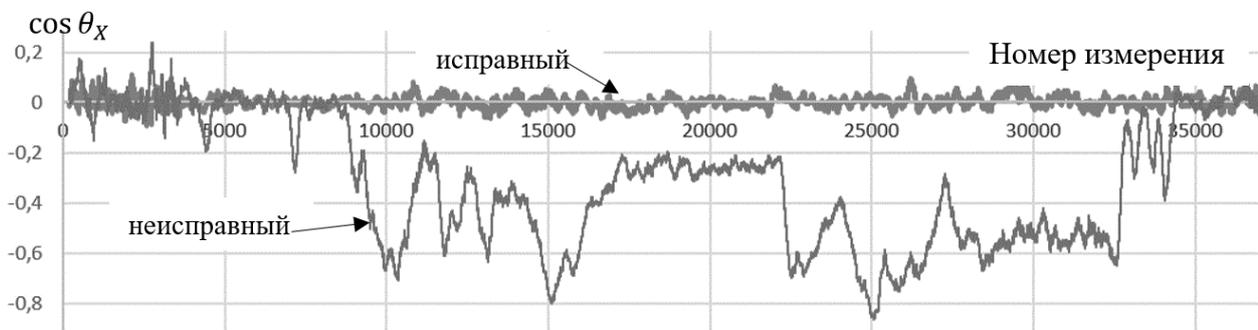
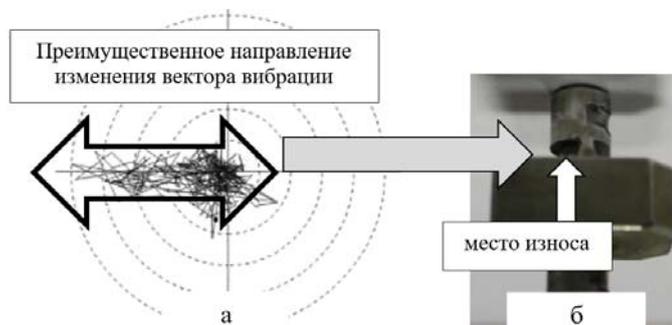
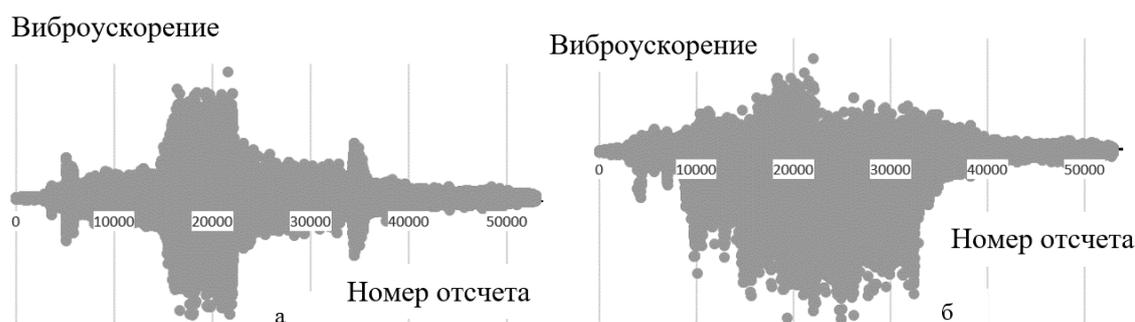


Рис. 7. Сравнение направляющего конуса угла вектора вибрации по оси X для исправного и неисправного состояния объекта вибромониторинга  
Fig. 7. Comparison of a director cone of an angle of vibration vector on axis X for operational and failed condition of a vibromonitoring item

В целом критерием, например, существенно несимметричного износа конструкции опоры двигателя вдоль определенной оси (рис. 8<sup>4</sup>, б) скорее всего может служить явная асимметрия графика, представляющего временной ряд анализируемого вибропараметра (см. рис. 9).

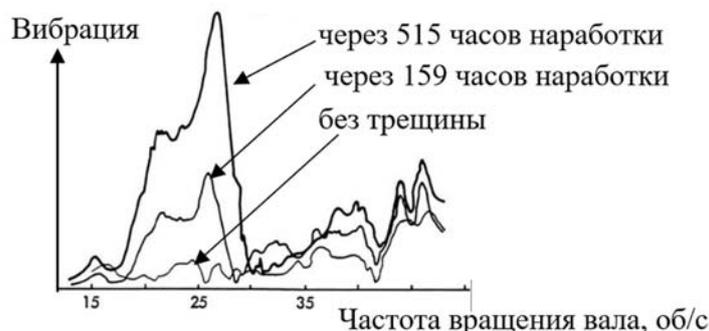


**Рис. 8.** К установлению связи между износом детали крепления двигателя к воздушному судну (б) и преимущественным направлением вектора вибрации (а)  
**Fig. 8.** To establish the connection between the wear of the engine mount component (б) and a primary direction of a vibration vector (а)



**Рис. 9.** Характер временного ряда вибропараметра для исправной (а) и неисправной опоры (б)  
**Fig. 9.** Pattern of a time series of vibro-accelerations for an operational engine mount (а) and a failed engine mount (б)

Объект исследования с развитием трещины вала в эксплуатации в настоящей работе не наблюдался, однако данные исследований указывают на аналогичные, по сути, особенности поведения амплитудно-частотных характеристик (рис. 10) [5].



**Рис. 10.** Рост вибрации на критической частоте вращения вала, связанный с ростом трещины  
**Fig. 10.** Vibration growth on critical frequency of a shaft rotation because of a crack growth

<sup>4</sup> Исследование возможности использования мобильных устройств (смартфонов и планшетов) для проведения вибрационного мониторинга: отчет о НИР. № Госрегистрации 115102260032. М.: МГТУ ГА, 2018. 80 с.

Полученные результаты измерения вибраций могут быть также подвергнуты анализу распределений (рис. 11) с последующей оценкой гипотез о виде распределения.

### Количество попаданий в интервал

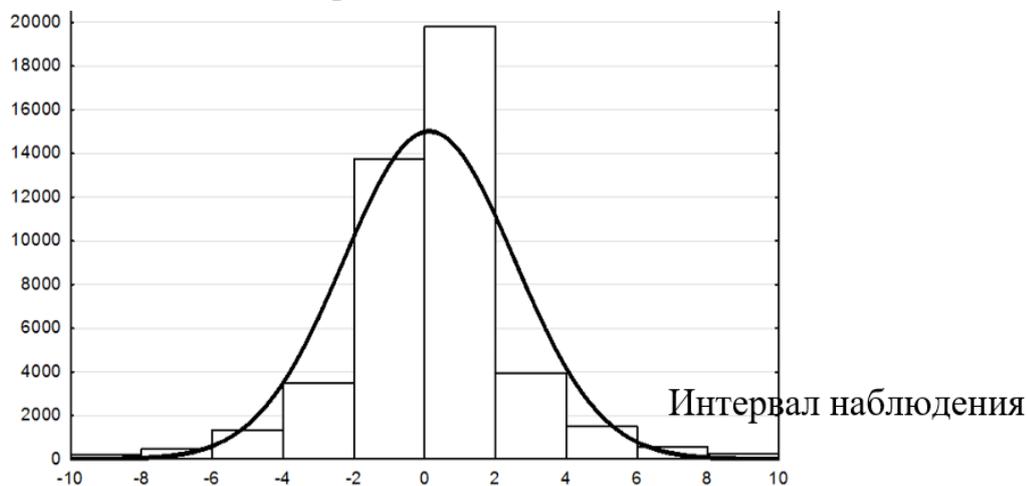


Рис. 11. Пример гистограммы и кривой нормального распределения виброускорений  
Fig. 11. An example of the histogram and a curve of a normal distribution of vibro-accelerations

Однако можно предложить и менее трудоемкий способ анализа получаемых данных в рамках оценки технического состояния объекта. Для этого оказалось достаточно отсортировать данные временного ряда по возрастанию значений [9] и представить его на графике.

Результаты анализа позволяют сформировать критерий отнесения объекта виброконтроля к исправному или неисправному состоянию, исходя из симметрии частей кривой, описывающей ряд, полученный сортировкой в порядке возрастания значений параметра вибрации (рис. 12–14).

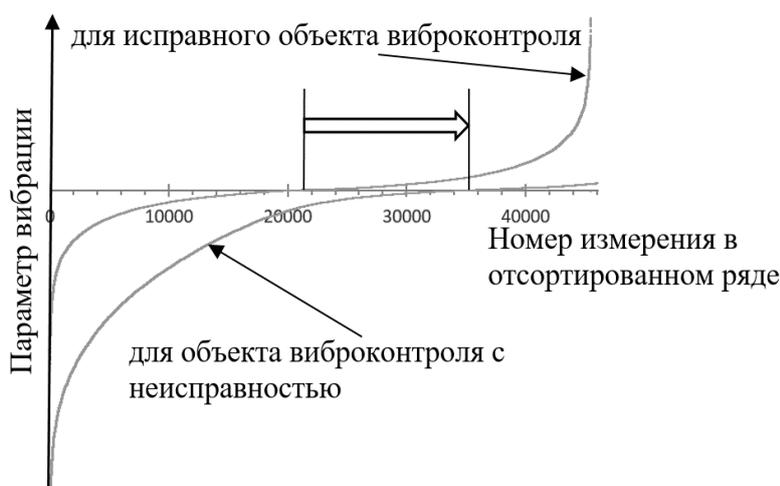
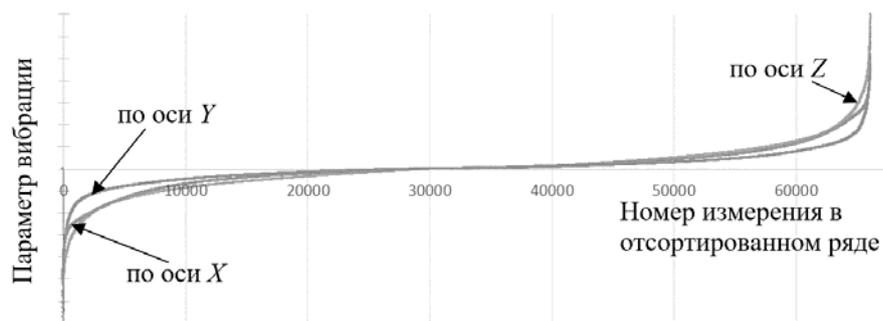
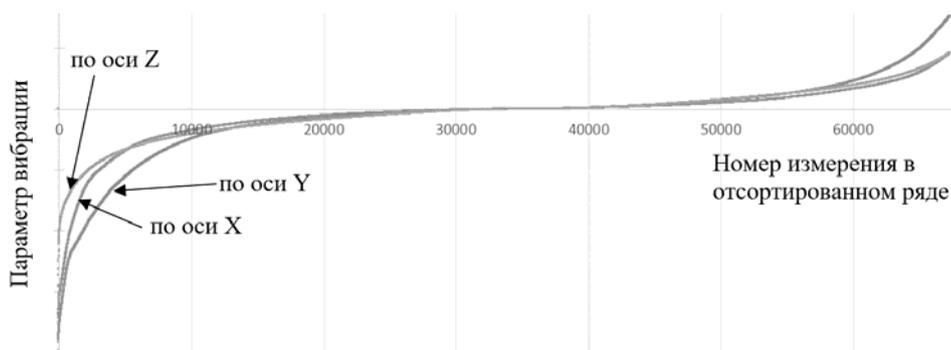


Рис. 12. Различие в поведении рядов параметра вибрации для объектов виброконтроля с разным техническим состоянием

Fig. 12. Distinction in behavior of series of vibration parameter for items in a different technical state

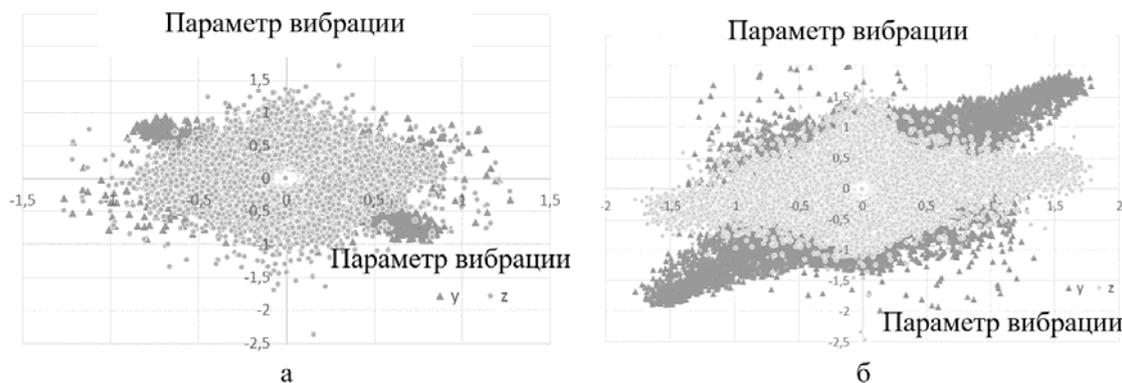


**Рис. 13.** Поведение рядов параметра вибрации для объекта виброконтроля с дисбалансом ротора, но в целом исправного  
**Fig. 13.** The behavior of series of vibration parameter for an item with a rotor misbalance, which is in an operational order



**Рис. 14.** Поведение рядов параметра вибрации для объекта виброконтроля с дисбалансом ротора и искусственно внесенной массовой асимметрией корпуса  
**Fig. 14.** The behavior of series of vibration parameter for an item with a misbalance of a rotor and an artificially brought mass asymmetry of the frame

Различие в поведении рядов параметров вибрации по осям Y и Z в зависимости от вибраций по оси X для рассмотренных случаев представлено на рис. 15.



**Рис. 15.** Поведение рядов параметров вибрации по осям Y и Z в зависимости от вибраций по оси X для случая рис. 13, а и рис. 14, б  
**Fig. 15.** Behavior of series of vibration parameters on axes Y and Z depending on vibrations on axis X for a case fig. 13 (a) and fig. 14 (б)

Результаты вибромониторинга для рассмотренных случаев подтверждают критерий несимметричности распределения параметра вибраций в случае, когда состояние объекта вибромониторинга отлично от предписанного нормативно-технической документацией. В отличие от случая износа узла крепления двигателя, при нарушении массово-жесткостных характеристик корпуса наблюдалась асимметрия распределений виброускорений, зафиксированных по всем трем осям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях все большее распространение получают микроэлектромеханические системы (MEMS), включающие различные типы датчиков.

Для эксплуатации различного рода машин (в том числе авиационных двигателей) наибольший интерес представляют устройства контроля вибрации. Эти устройства позволяют выполнять оценку виброускорений. От массово эксплуатируемых в настоящее время систем контроля вибрации MEMS отличает существенно более высокая частота регистрации и возможность измерения виброускорений одновременно по трем осям.

С использованием MEMS были получены временные ряды виброускорений для газотурбинного двигателя в различных технических состояниях и для лабораторной установки «ротор-корпус», в том числе с искусственным нарушением весовой симметрии корпуса.

Для формирования критериев оценки технического состояния объекта виброконтроля были выполнены оценки временных рядов параметров вибрации исходных, сглаженных с использованием скользящего среднего, анализа распределений, динамики длины вектора вибрации и направляющих косинусов.

Предложен критерий отнесения объекта виброконтроля к исправному или неисправному состоянию исходя из симметрии частей кривой, описывающей ряд, полученный сортировкой в порядке возрастания значений параметра вибрации.

При минимальных вычислительных затратах предложенный способ анализа временных рядов значений виброускорений, отсортированных в порядке возрастания позволяет различать исправное состояние объекта виброконтроля и развитие неисправности. Для обработки данных рекомендуется использовать современные вычислительные устройства не менее чем с 6 Гб физической оперативной памяти.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / под ред. В.Л. Степаненко. М.: Транспорт, 1985. 116 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 112 с.
3. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 252 с.
4. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. Т. IV–21. Самолеты и вертолеты. Кн. 3. Авиационные двигатели / под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина, Ю.М. Темиса. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
5. Randall R.B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. A John Wiley and Sons, 2011. 309 p.
6. Чичков Б.А. Способ вибрационного мониторинга роторных машин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 1. С. 137–146.
7. Чичков Б.А., Баисов А.А. Вибромониторинг с использованием приспособления на базе микроконтроллерной платы Arduino // Гражданская авиация на современном этапе

развития науки, техники и общества: сб. тезисов докладов международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию гражданской авиации. Москва, 16–17 мая 2018 г. С. 60.

8. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами: пер. с англ. М.: Мир, 1973. 959 с.

9. Блаттнер П. Использование Microsoft Office Excel 2003: спец. изд. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2005. 864 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Чичков Борис Анатольевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, b.chichkov@mstuca.aero.

## TECHNIQUE OF PROCESSING OF VIBRATION MONITORING DATA, RECEIVED BY THE USE OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Boris A. Chichkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

During the operation of such machines as aviation engines and land based gas turbines, the obligatory vibration monitoring is carried out which is focused on the prevention of their possible damages and destructions during the work on resonant modes or because of material fatigue. Nowadays, as a rule, the standard or additional equipment is used for such control which includes as a component various types of one-axial vibration gauges. In most cases, the control is carried out continuously, and the frequency of registration can differ from several values for a flight to several values in a second. The data received during routine vibration monitoring is peak values of vibrations. They are diagnosed, using the pre-start control and some ways of fit and the tendency of changes of vibration during the operation. Microelectromechanical systems gaining now the increasing distribution (MEMS), as a rule, allow to obtain the data about vibro-acceleration without giving data about the frequency vibration characteristics. But also the regular equipment of vibrational control used during the operation of considered machines does not give data about the frequency vibration characteristics. However, microelectromechanical devices allow to obtain the data with the essential higher frequency of sample rate (in tens and hundreds times) in comparison with mass equipment used now for control, and to carry out the simultaneous control of vibration on three axes using one gauge. Apart from the vibration peak value the position relative to a reference point is fixed. Does the information received according to mentioned above features have better diagnostic potential? Will the array dimension received during data verification be an obstacle to the operational processing? Materials of the present article are an attempt to give answers to these questions and to make representation about possibility and features of an estimation of a technical state of machines by the results of processing of time series vibro-accelerations received with the use of such processing microelectromechanical systems. It is represented that the way of data processing of vibrating monitoring considered in the article at sufficient simplicity of realization allows to solve the problem of an estimation of a technical state of monitoring item.

**Key words:** the aviation engine, vibration, the vibration gauge, monitoring, microelectromechanical system, a technical state, data processing procedure, vibrational acceleration.

### REFERENCES

1. *Prakticheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Practical diagnostics of aviation gas-turbine engines] (1985). Ed. V.L. Stepanenko. Moscow: Transport, 116 p. (in Russian)

2. **Кеба, I.V.** (1980). *Diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Diagnostics of aviation gas-turbine engines]. Moscow: Transport, 112 p. (in Russian)

3. **Shirman, A.R. and Solov'ev, A.B.** (1996). *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya* [Practical vibration based diagnostics and monitoring of a state of the mechanical equipment]. Moscow, 252 p. (in Russian)
4. *Mashinostroeniye* [Mechanical engineering]. *T. IV–21*. [Vol. IV–21]. *Samolety i vertolety. Kn. 3. Aviatsionnye dvigateli* [Airplanes and helicopters. The book 3. Aviation engines]. (2010). Ed. V.A. Skibin, V.I. Solonin, Yu.M. Temis. Moscow: Mashinostroeniye, 720 p. (in Russian)
5. **Randall, R.B.** (2011). *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive application*. A John Wiley and Sons, 309 p.
6. **Chichkov, B.A.** (2018). *Sposob vibratsionnogo monitoringa rotornykh mashin* [Technique of vibration monitoring]. The Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 1, pp. 137–146. (in Russian)
7. **Chichkov, B.A. and Baisov, A.A.** (2018). *Vibromonitoring s ispolzovaniem prisposobleniya na baze mikrokontrollernoy platy Arduino* [Vibration monitoring based on Arduino]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu grazhdanskoy aviatsii. Moskva, 16–17 Maya, 2018 g.* [Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society: coll. of abstracts of the International Scientific and Technical Conference devoted to the 95<sup>th</sup> anniversary of civil aviation. Moscow, the 16<sup>th</sup> – the 17<sup>th</sup> of May 2018], p. 60. (in Russian)
8. **Khimmel'blau, D.** (1973). *Analiz protsessov statisticheskimi metodami* [Process analysis by statistical methods]. *Per. s angl.* [Translated from English]. Moscow: Mir, 959 p. (in Russian)
9. **Blattner, P.** (2005). *Ispolzovaniye Microsoft Office Excel 2003* [The use of Microsoft Office Excel 2003]. *Spetsialnoye izdaniye. Per. s angl.* [Special edition, translated from English]. Moscow: Vilyams, 864 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Boris A. Chichkov**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of The Aircraft Engine Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.chichkov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 17.12.2018  
Принята в печать 21.03.2019

Received 17.12.2018  
Accepted for publication 21.03.2019