

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

**В.В. Сеницин**

Предложено устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов, проводящее измерение непосредственно с подвижных элементов, в частности с валов и шестерен машин, причем, питание и передача данных осуществляется беспроводным способом. Описана математическая модель данного устройства, выявлены существенные преимущества над существующими аналогами с точки зрения возможностей измерения и разделения по независимым координатам виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

*Ключевые слова:* виброускорение, механическая система, акселерометр, крутильные колебания, диагностика.

### Введение

В настоящий момент, существуют работы и исследования [1–3], доказывающие, что мониторинг состояния машин и механизмов дает наибольший экономический эффект во многих отраслях промышленности.

Одним из наиболее распространенных и надежных методов мониторинга состояния машин и механизмов является виброакустическая диагностика, сущность которой состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки параметров технических состояний объекта диагностирования без его разборки в рабочих условиях по характеристикам виброакустических процессов, сопровождающих его функционирование [4, 5].

В настоящее время разработаны и применяются множество различных контактных и бесконтактных способов измерения вибраций на неподвижных и вращающихся частях механизмов [4–7].

Одним из наиболее распространенных способов измерения вибраций конструкций и механизмов (в том числе и роторных механизмов) является установка акселерометров (датчиков виброускорения) на статорных элементах машин, например на опорах подшипников. Общие руководящие принципы измерения и оценки механической вибрации статорных элементов машин описаны в [6]. Данный метод обладает достоинствами, такими как простота, надежность и др., но в то же время не позволяет, например, по полученным сигналам построить траекторию движения вала.

Для некоторых машин, например с гибкими роторами, измерения вибрации на неподвижных частях могут оказаться недостаточными. В этих случаях, наряду с вышеуказанным методом, осуществляют измерения вибрации вращающихся роторов с помощью датчиков бесконтактного типа (через измерение изменения длины оптического пути, индуктивности, емкости или вносимых потерь между двумя точками) или инерционного типа, например контактного датчика-зонда [7]. На качество измерений таким методом влияет множество факторов, таких как шероховатость и ее изменение в месте измерения вибрации, нестабильность свойств окружающей среды (например, масляный туман). Так же, описанным методом, нет возможности прямого измерения виброускорения колебаний вращающегося вала, что существенно сказывается на диагностике зарождающихся дефектов [5].

В случае диагностики электромеханических систем [8–10], например электроприводов трубопроводной арматуры, анализируют временные и спектральные характеристики токового сигнала двигателя, примененного в электромеханической системе. Описанный метод, обладая неоспоримыми достоинствами (возможностью диагностики оборудования, расположенном в труднодоступных местах, и отсутствием необходимости в дополнительных измерительных элементах на корпусе исследуемого устройства), не позволяет проводить построение траекторий движения валов, подвержен высокому зашумлению измерительного сигнала электрическими помехами и зна-

чительному снижению чувствительности к дефектам, возникающим в удаленных от двигателя узлах и элементах кинематической цепи.

В данной работе предлагается использовать акселерометр (датчик виброускорения) с беспроводным питанием и передачей данных, закрепленный на подвижном элементе (валу) механизма. Это позволит получить устройство, измеряющее виброускорения колебаний системы контактным способом непосредственно с самого вала без влияния на качество измерений девиации внешней среды и не вносящий существенного влияния на качество работы механической системы.

### Устройство измерения виброускорения

Устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов (рис. 1) содержит роторный и статорный блоки, расположенные соосно на минимально возможном расстоянии друг от друга таким образом, чтобы во время движения вала не соприкасались. Роторный блок жестко закреплен через отверстие на вращающемся валу таким образом, чтобы роторный блок располагался перпендикулярно оси вращения вала и не создавал дисбаланса по оси вращения. Статорный блок жестко закреплен на корпусе механизма таким образом, чтобы отверстие располагалось соосно с валом, причем статорный и роторный блоки располагаются параллельно друг другу.

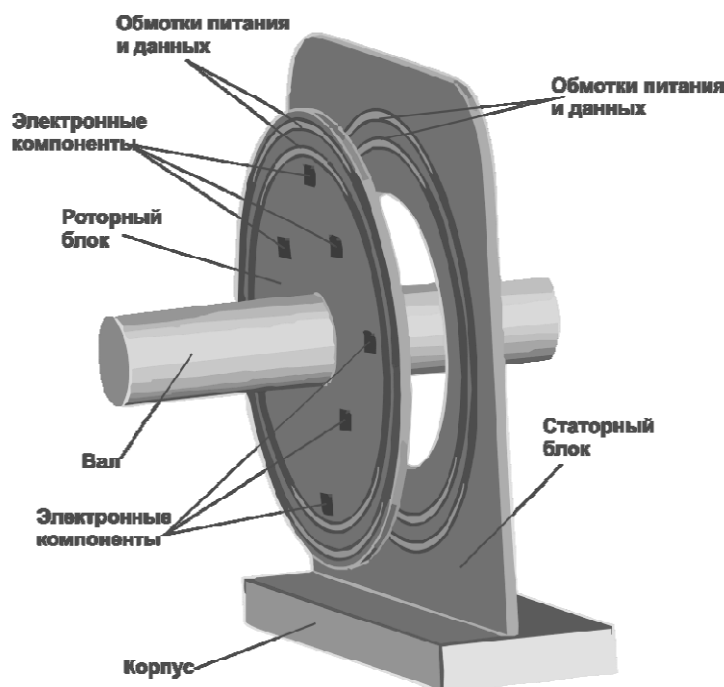


Рис. 1. Устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов

Роторный блок содержит обмотку данных для приема и передачи данных беспроводным способом и обмотку питания, для беспроводного питания компонентов роторного блока, причем, вообще говоря, может быть применена одна обмотка и для питания, и для передачи данных. Также на роторном блоке установлен, как минимум, один датчик виброускорения и электронные компоненты для питания, фильтрации, предварительной обработки и передачи данных по беспроводному каналу. Статорный блок содержит обмотку данных для приема и передачи данных беспроводным способом и обмотку питания для беспроводного питания роторного блока, причем так же, как и на роторном блоке, может быть применена одна обмотка для питания и передачи данных. Также на статорном блоке размещены разъемы, присоединенные к обмоткам, для подключения источника питания и приемопередатчика для получения данных.

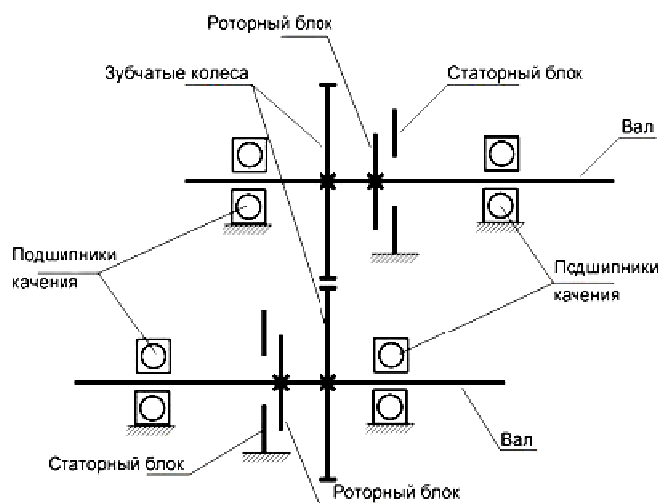
Во время работы устройства генератор сигналов создает сигнал требуемой формы, частоты и амплитуды, затем, усилитель мощности усиливает сигнал с генератора и возбуждает обмотку питания на статорном блоке. На обмотке питания, расположенной на статорном блоке, возникает

напряжение, питающее электронную схему на роторном блоке, в том числе, акселерометры, микропроцессор и приемопередатчик, благодаря чему данные, пропорциональные измеряемым вибрациям, передаются через обмотки данных на статорный блок (рис. 2). Подробно устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов описано в [11].

Устройство измерения виброускорения имеет широкий спектр областей применения, в частности, для мониторинга одноступенчатой зубчатой передачи (рис. 3).



**Рис. 2. Блок-схема работы устройства измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов**



**Рис. 3. Кинематическая схема одноступенчатого зубчатого редуктора с устройствами измерения виброускорения**

Сочетание нескольких акселерометров с различной ориентацией осей чувствительности, закрепленных на валу или шестерне механизма, позволяет измерять и разделять по независимым координатам движения виброускорения в точке съема информации в каждый момент времени. При этом, измерительное устройство, являясь сбалансированным по оси вращения элемента и обладая малой массой и размерами (благодаря отсутствию массивных компонентов, таких как аккумулятор), не оказывает существенного влияния на работу механизма, не требуя регулярного обслуживания в связи с отсутствием внутренних источников питания, а также частей, подверженных интенсивному износу (токоподводов).

Таким образом, описанное выше устройство, позволяет измерять и разделять виброускорения колебаний и движения механической системы в точке съема информации по независимым координатам. По полученной с устройства информации, возможно построение траектории движения подвижных элементов механической системы, при этом на качество измерений не влияет ни шероховатость поверхности в точке закрепления устройства, ни изменение свойств окружающей среды.

Так как существенной особенностью и новизной предложенного устройства является место закрепления акселерометров – подвижный элемент механической системы, требуется математическое описание (модель) самого устройства измерения, сфокусированное на вопросах ускорений, измеряемых датчиками.

### **Математическая модель устройства измерения виброускорения**

Рассмотрим простейший случай: на валу механизма перпендикулярно и соосно оси вращения жестко закреплен диск, на котором закреплены акселерометры 1 и 2, расположенные на одной линии и равноотстоящие от центра диска, при этом диск – жесткий.

Для последующих рассуждений введем две системы координат (СК):  $Oxyz$  – неподвижная система координат, связанная с основанием механизма, при этом ось  $Ox$  – скрепляющийся перпендикуляр к оси вращения вала,  $Oy$  – коллинеарна оси вращения вала,  $Oz$  – ориентирована таким образом, чтобы  $Oxyz$  образовывали правую тройку;  $O_1x_ey_ez_e$  – система координат, связанная с центром вала, при этом не вращающаяся вместе с валом, причем, центр системы координат расположен в точке пересечения центра диска и оси вращения вала, а так же ось  $Ox_e$  – перпендикулярна оси вращения вала,  $Oy_e$  – коллинеарна оси вращения вала,  $Oz_e$  – ориентирована таким образом, чтобы  $O_1x_ey_ez_e$  образовывали правую тройку (рис. 4).

Примем, что диск совершает ускоренное вращение вокруг оси вала (вокруг оси  $Oy_e$ ) при этом вал колеблется вдоль оси  $Oz$ . Рассмотрим движение акселерометров, принадлежащих диску в плоскости  $Oxz$  (рис. 5).

Стоит отметить, что на акселерометры 1 и 2 кориолисова сила не действует, так как переносное движение является поступательным, а относительное вращательным.

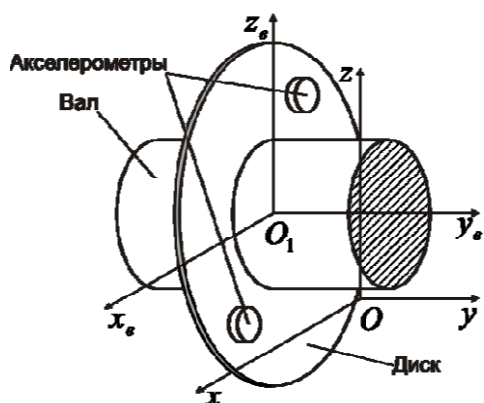


Рис. 4. Система «вал-диск» с СК

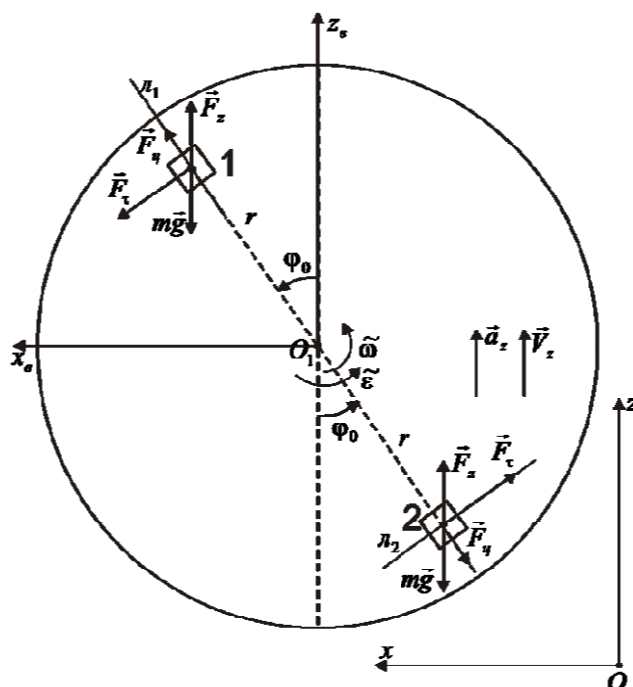


Рис. 5. Система «вал-диск» в плоскости  $Oxz$

Запишем систему векторных уравнений движения акселерометров 1 и 2, принимая акселерометры одинаковыми и равноудаленными от центра диска на расстояние  $r$  и пренебрегая переходными процессами их внутренних компонентов, причем ось чувствительности первого акселерометра ориентирована осецистремительно, а второго – тангенциально (рис. 5):

$$\begin{cases} m\vec{a}_1 = m\vec{g} + \vec{F}_y + \vec{F}_\tau + \vec{F}_z; \\ m\vec{a}_2 = m\vec{g} + \vec{F}_y + \vec{F}_\tau + \vec{F}_z; \\ F_y = -a_n m; \\ F_z = a_z m; \\ F_\tau = a_\tau m; \\ a_n = \omega^2 r; \\ a_\tau = \varepsilon \cdot r. \end{cases} \quad (1)$$

Спроецировав действующие силы на оси чувствительности каждого акселерометра, приняв, что положительное направление осей – от центра диска и против часовой стрелки, получим систему уравнений (2):

$$\begin{cases} ma_1 = \omega^2 rm + ma_z \cos \varphi - mg \cos \varphi, \\ ma_2 = \varepsilon rm + ma_z \sin \varphi - mg \sin \varphi; \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол поворота вала вдоль оси вращения,  $g$  – ускорение свободного падения,  $a_1, a_2$  – измеряемые ускорения акселерометрами 1 и 2, соответственно.

Исключив из системы (2) массу  $m$  и приняв, что  $\varepsilon = \dot{\omega} = \ddot{\varphi}$  и  $a_z = \dot{V}_z = \ddot{z}$ , получили систему уравнений ускорения акселерометров 1 и 2 по оси их чувствительности (3):

$$\begin{cases} a_1 = \ddot{\varphi}^2 r - g \cos \varphi + \ddot{z} \cos \varphi, \\ a_2 = \ddot{\varphi} r - g \sin \varphi + \ddot{z} \sin \varphi. \end{cases} \quad (3)$$

В связи с тем, что рассматривается горизонтально расположенный вал и принимается, что измерения начинаются до начала движения, начальные условия для решения системы уравнений (3) выбраны следующим образом:  $\ddot{z}_0 = 0, \dot{z}_0 = 0, z_0 = 0, \ddot{\varphi}_0 = 0, \dot{\varphi}_0 = 0, \varphi_0 = \arctg \left( 1 - \frac{a_1^0 + a_2^0}{a_1^0} \right)$ ,

где  $a_1^0, a_2^0$  – измеренные акселерометрами ускорения до начала движения.

Система уравнений (3) – система дифференциальных уравнений с двумя неизвестными, решение которой дает ускорения  $\ddot{\varphi}$  крутильных колебаний вокруг оси вращения вала и  $\ddot{z}$  поступательных колебаний вдоль оси  $Oz$ .

### **Заключение**

Описанное устройство виброускорения подвижных элементов машин и механизмов обладает рядом преимуществ над существующими методами измерения вибраций: не чувствительность к изменениям окружающей среды и шероховатости поверхности в точке закрепления, возможность построения траекторий движения подвижных элементов, пониженная чувствительность к электрическим помехам. В свою очередь, составленная математическая модель показывает, что устройство, кроме измерения и разделения (по независимым координатам движения) виброускорения поступательных колебаний подвижных элементов механической системы, позволяет измерять и виброускорения крутильных колебаний. Описанный подход к измерению виброускорений машин и механизмов применен впервые.

### **Литература**

1. Rao, B.K.N. *Advances in diagnostic and prognostic strategies and technologies for failure-free maintenance of industrial assets* / B.K.N. Rao // *Comadem, 22<sup>nd</sup> International Congress*. – 2009. – С. 17–38.
2. Белоусов, М.Д. *Метод самодиагностики термпреобразователя сопротивлений в процессе работы* / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2009. – № 3(136). – С. 17–19.
3. Белоусов, М.Д. *Оценка собственного состояния средств измерения* / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2011. – № 2 (219). – С. 19–23.
4. Randall, Robert Bond. *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications* / Robert Bond Randall. – John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 289 с.
5. Генкин, М.Д. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов* / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
6. ГОСТ ИСО 10816-1-97. *Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Общие требования*.
7. ГОСТ ИСО 10817-1-2002. *Вибрация. Системы измерений вибрации вращающихся валов. Часть 1. Устройство для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации*.

8. *A diagnostic approach for electro-mechanical actuators in aerospace systems* / E. Balaban, P. Bansal, P. Stoelting, A. Saxena // *Aerospace conference, IEEE*. – 2009. – С. 1–13.
9. *Jangbom, Chai. Non-invasive diagnostics of motor-operated valves* / Chai Jangbom, R.H. Lyon, J.H. Lang // *American Control Conference*. – 1994. – Vol. 2. – С. 2006–2012.
10. Адаменков, А.К. *Ваттметрия. Диагностика электроприводной арматуры по мощности – возможность перехода от ремонта по регламенту к ремонту по техническому состоянию* / А.К. Адаменков // *Арматуростроение*. – 2006. – № 2 (41). – С. 57–61.
11. *Патент на полезную модель RU 142934 U1. Устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов* / В.В. Сеницын, В.В. Сеницын, А.С. Семенов, А.Л. Шестаков. – Оpubл. 10.07.2014, Бюл. № 19.

**Сеницын Владимир Владимирович**, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); 160403@land.ru.

*Поступила в редакцию 28 мая 2014 г.*

---

***Bulletin of the South Ural State University***  
***Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”***  
***2014, vol. 14, no. 3, pp. 127–133***

---

## THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DEVICE MEASURING ACCELERATION OF MOVING PARTS OF MACHINES AND MECHANISMS

**V.V. Sinitsin**, *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 160403@land.ru*

The acceleration measuring device of machines moving parts and mechanisms is proposed. This device conducts data measurement directly from mobile elements, particularly from the shafts and machines gears. Besides meals and transfers are realized wirelessly. A mathematical model of this device describes significant advantages of existing counterparts from the viewpoint of measurement capabilities and separation due to independent coordinates of vibratory displacement, vibration speed and acceleration.

*Keywords: vibroacceleration, mechanical system, accelerometer, thrash, diagnostics.*

### References

1. Rao B.K.N. *Advances in Diagnostic and Prognostic Strategies and Technologies for Failure-free Maintenance of Industrial Assets. Comadem, 22<sup>nd</sup> International Congress, 2009*, pp. 17–38.
2. Belousov M.D., Shestakov A.L. [Method of the On-line Self-diagnostic of the Resistance Temperature Detector]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Radio electronics*, 2009, no. 3(136), pp. 17–19. (in Russ.)
3. Belousov M.D., Shestakov A.L. [Estimation of Eigenstate of Resistive Thermometers]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technology, Automatic Control, Radio electronics*, 2011, no. 2(219), pp. 19–23. (in Russ.)
4. Randall Robert Bond *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 289 p.
5. Genkin M.D., Sokolova A.G., *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibration Diagnostics of Machines and Mechanisms]. Moscow, Mechanical Engineering, 1987. 288 p.

6. GOST ISO 10816-1-97. *Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyah. Obshchie trebovaniya* [Mechanical Vibration. Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotation Parts. Part 1. General Guidelines].
7. GOST ISO 10817-1-2002. *Vibratsiya. Sistemy izmereniy vibratsii vrashchayushchikhsya valov. Chast' 1. Ustroystvo dlya snyatiya signalov odnositel'noy i absolyutnoy vibratsii.* [Mechanical Vibration. Rotating Shaft Vibration Measuring Systems. Part 1: Relative and Absolute Sensing of Radial Vibration].
8. Balaban E., Bansal P., Stoelting P., Saxena A. Diagnostic Approach for Electro-mechanical Actuators in Aerospace Systems. *Aerospace Conference IEEE*, 2009, pp. 1–13.
9. Jangbom Chai, Lyon R.H., Lang J.H. Non-invasive Diagnostics of Motor-operated Valves. *American Control Conference*, 1994, vol. 2, pp. 2006–2012.
10. Adamenkov A.K. [Wattmeter. Diagnosis of Motorized Valves for Power – the Ability to Transition from Repair to Repair under the Rules on the Technical Condition], *Valve Manufacturing*, 2006, no. 2(41), pp. 57–61. (in Russ.)
11. Patent RU 142934 U1. *Ustroystvo izmereniya vibrouskoreniya podvizhnykh elementov mashin i mehanizmov* [Acceleration Measuring Device Moving Parts of Machines and Mechanisms]. V.V. Sinitsin (Jr.), V.V. Sinitsin, A.S. Semenov, A.L. Shestakov. Publ. 10.07.2014, Bull. no. 19.

**Received 28 May 2014**