

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-11-34-43>

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОДАТЧИКОВ И УСЛОВИЙ ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ ИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БАЗИСА ДЛЯ СИСТЕМ ВИБРОКОНТРОЛЯ И ВИБРОИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

© **Александр Степанович Жданов**

Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; e-mail: alezhd@mail.ru

*Статья поступила 26 мая 2023 г. Поступила после доработки 10 июля 2023 г.
Принята к публикации 19 сентября 2023 г.*

Для выявления наиболее чувствительных к вибрации структур исследуемых материалов при виброиспытаниях необходимо определить вектор вибрации в ортогональном базисе. От точности измерения вектора зависит эффективность испытаний. Применяемые при виброиспытаниях и в системах виброконтроля трехосевые датчики вибрации обладают поперечной чувствительностью, приводящей к снижению точности и ограничению частотного диапазона измерений. Ее можно практически полностью компенсировать методом электронной ортогонализации векторов чувствительности вибродатчика. Метод предполагает искусственный поворот векторов чувствительности по сигналам на канальных выходах электронного ортогонализатора до их совпадения с ортогональными направлениями. Он разработан и хорошо работает в низкочастотной области рабочего диапазона частот, в котором амплитудно-частотные характеристики линейны, а набег фазы в каналах отсутствует. В работе представлены результаты исследования влияния фазовых характеристик вибродатчиков на формирование ортогонализирующих матриц, определяющих требования к электронному ортогонализатору. Приведены структура измерительной установки для их автоматической регистрации, методика и результаты экспериментального исследования амплитудно- и фазочастотных характеристик векторов чувствительности трехосевого пьезоакселерометра с единым инерционным элементом и косоугольным измерительным базисом. Показано, что конструкция измерительной системы вибродатчика позволяет проводить эффективную широкополосную ортогонализацию измерительного базиса. Полученные результаты могут быть использованы при создании ортогонализирующих преобразователей, устраняющих поперечную чувствительность в широком диапазоне частот, а также при совершенствовании конструкции датчиков для улучшения их метрологических характеристик.

Ключевые слова: датчик вибрации; точность измерений; вектор чувствительности; поперечная чувствительность; ортогонализация; фазочастотная характеристика.

STUDY OF THE PHASE CHARACTERISTICS OF VIBRATION SENSORS AND CONDITIONS OF ORTHOGONALIZATION OF THEIR MEASURING BASIS FOR THE SYSTEMS OF VIBRATION CONTROL AND VIBRATION TESTING OF MATERIALS

© **Alexander S. Zhdanov**

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute, RAS, 4, Maly Kharitonievsky per., Moscow, 101000, Russia; e-mail: alezhd@mail.ru

Received May 26, 2023. Revised July 10, 2023. Accepted September 19, 2023.

To identify the most vibration-sensitive structures of the materials during vibration tests, it is necessary to determine the vibration vector in an orthogonal basis. The effectiveness of the tests depends on the accuracy of the vector measurement. The transverse sensitivity of tri-axial vibration transducers, which have found vast application in various vibration measuring and material testing systems, leads to increased measurement errors and limits the frequency range of measurements. The errors can be reduced to almost zero using the proposed method of electronic orthogonalization, which involves rotation of the sensitivity vectors until they coincide with the orthogonal basis, resulting in zero transverse sensitivity. This approach has been successfully developed and works rather well in the low frequency band of the vibration transducer frequency response, wherein the amplitude-characteristics are linear and there is no phase shift in the channels. An emphasis is made on the influence of the phase characteristics of vibration sensors on the formation of orthogonalizing matrices that determine the requirements for an orthogonalizer. The structure of the installation for automated recording amplitude-frequency and phase-frequency responses of the vibration transducer, methodology and results of experimental study of a tri-axial piezoelectric accelerometer (TPA) with one inertia element and oblique-angle measuring basis are presented. The results obtained under vibration activated in three mutually perpendicular directions along the measuring axes show that the transducer measuring system is properly designed to provide for effective broadband orthogonalization of the measuring basis. The results obtained can be used to develop orthogonalizing transducers that eliminate transverse sensitivity in a wide frequency range, as well as to improve the design of sensors and their metrological characteristics.

Keywords: vibration transducer; measurement accuracy; sensitivity vector; transverse sensitivity; orthogonalization; phase response.

Введение

В практике виброизмерений широко применяют трехосевые вибродатчики, позволяющие измерять вектор вибрации в заданной точке механического объекта. Они используются в системах измерения, контроля вибрации, а также виброиспытаний материалов. Испытание материалов на воздействие вибрации дает возможность протестировать устойчивость их структуры к неблагоприятным воздействиям, выявить режимы, приводящие к снижению эксплуатационного ресурса, участки изделий с зарождающимися дефектами и принять меры по улучшению их качества. От точности измерения вектора вибрации зависит точность нахождения этих участков и определения уровня дефектов.

В машиностроении надежность продукции (например, энергетических установок с вращающимися и вибрирующими узлами) зависит от их вибрационного состояния. Системы 3D-вибромониторинга обеспечивают наиболее полное исследование динамики протекающих в таких объектах вибрационных процессов. Наиболее высокие требования к точности измерения вектора вибрации в сложных механических системах, неисправности которых могут приводить не только к сбоям в их работе, но и катастрофам [1 – 3]. Так, технологические машины с электродинамическим возбудителем колебаний при работе на нелинейную технологическую нагрузку могут входить в неустойчивые режимы, обуславливаю-

щие ряд особенностей динамического поведения машины и ее предельные возможности [4]. Анализ условий перехода объектов энергетики (тепловой, гидравлической, атомной) от штатных к аварийным и катастрофическим ситуациям показывает, что важное значение для обеспечения безопасной эксплуатации энергоустановок имеет уровень научно-практического обоснования прогнозируемых и приемлемых рисков, характеризующих штатные и предельные состояния таких объектов [5]. Проведены исследования надежности и ресурса материалов, динамики износа и развития усталостных повреждений механических структур [6 – 9].

Одно- и трехосевые вибродатчики в общем случае, кроме основных осевых чувствительностей, характеризуются нежелательной поперечной чувствительностью к другим ортогональным составляющим вибрации. Это приводит к тому, что их векторы чувствительности, определяющие электрический сигнал по соответствующему выходу, не точно направлены по измерительным осям. Отметим, что осевая (H_z) и поперечная (H_x) чувствительности одноосевого пьезодатчика для измерения, например, собственных шумов Земли могут составлять 10 и 0,75 В · с²/м соответственно [10, 11]. Это весьма высокая поперечная чувствительность, существенно ухудшающая точность определений, и снизить ее технологическими мерами невозможно [12].

В области низких частот (обычно до 1 кГц) механическая система пьезоэлектрического дат-

чика имеет жесткостной характер, и совокупность преобразований ускорение – сила – деформация – заряд практически не имеет инерционности. Поэтому при измерении гармонических ускорений не вносятся заметных фазовых искажений, коэффициенты преобразования ускорения в заряд вещественны и, следовательно, вещественны и векторы чувствительности. На более высоких частотах начинает проявляться влияние масс датчика и потерь в измерительной системе. Коэффициенты передачи заряд – ускорение становятся комплексными, и вместе с ними становится комплексной матрица чувствительностей датчика. Разработаны метод и средства повышения точности измерения вибрации в современных виброизмерительных системах посредством электронной компенсации погрешности измерения вибрации, вызываемой наличием поперечной чувствительности [13 – 17].

Когда матрица чувствительностей вещественна или комплексна, то задача устранения поперечной чувствительности датчика математически сводится к диагонализации матрицы в заданном ортогональном базисе. При этом ортогонализующая матрица имеет вещественные либо комплексные коэффициенты соответственно. Кроме того, в последнем случае комплексные диагональные коэффициенты матрицы должны обладать одинаковыми аргументами.

Цель работы — исследование влияния фазовых характеристик вибродатчиков на формирование ортогонализующих матриц, определяющих требования к электронному ортогонализатору.

Ортогонализация векторов чувствительности в низкочастотной области

Для исследований использовали прецизионный трехосевой пьезоакселерометр (ТПА) с единым инерционным элементом, измеряющий в координатном базисе и имеющий близкие электро-механические характеристики по всем измерительным направлениям. Считали, что низкочастотная область рабочего диапазона частот вибродатчика — это область, в которой фазовыми набегами можно пренебречь.

Пусть на выходах ТПА фиксируются электрические сигналы u_1 , u_2 , u_3 , пропорциональные составляющим a_1 , a_2 , a_3 измеряемого вектора ускорения $\mathbf{a}$:

$$\begin{aligned} u_1 &= s_{11}a_1 + s_{12}a_2 + s_{13}a_3, \\ u_2 &= s_{21}a_1 + s_{22}a_2 + s_{23}a_3, \\ u_3 &= s_{31}a_1 + s_{32}a_2 + s_{33}a_3, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\vec{a} = a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2 + a_3 \vec{e}_3, \quad (2)$$

где s_{ij} — составляющие векторов чувствительности по соответствующим измерительным осям; $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ — единичные безразмерные векторы базиса $\{0, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$, связанного с корпусом датчика и имеющего начало, совмещенное с измерительной точкой датчика.

Сигналы u_i , как правило, являются сигналами на выходе согласующих усилителей заряда или напряжения.

Систему уравнений (1) запишем в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В процессе измерений по известному вектору свободных членов $\mathbf{u}$ с помощью невырожденной матрицы чувствительностей $\mathbf{S}$ находим вектор неизвестных $\mathbf{a}$:

$$\mathbf{S}\mathbf{a} = \mathbf{u}. \quad (4)$$

Матрица $\mathbf{S}$ считается известной, поскольку она характеризует свойства конкретного датчика.

Каждый выходной сигнал u_i — строка матрицы $\mathbf{S}$ — определяется вектором чувствительности $\mathbf{s}_i$:

$$\mathbf{s}_i = (s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}). \quad (5)$$

Матрица $\mathbf{S}$ будет невырожденной, если векторы $\mathbf{s}_i$ не лежат в одной плоскости. В противном случае векторы чувствительности будут линейно-зависимыми (будут выражаться друг через друга).

Если выходные сигналы u_i датчика пропорциональны только одной компоненте вектора ускорения, имеющей тот же номер (a_i), то матрица $\mathbf{S}$ будет диагональной. При этом векторы чувствительности будут ортогональны, так как скалярное произведение обращается в ноль:

$$(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \sum_{k=1}^3 s_{ik} s_{jk} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, для устранения поперечной чувствительности трехосевого датчика необходимо диагонализировать матрицу чувствительностей или ортогонализировать векторы чувствительности по ортам заданного базиса.

Пусть $\mathbf{D}$ — диагонализующая матрица. Тогда

$$\mathbf{D}\mathbf{S}\mathbf{a} = \mathbf{D}\mathbf{u}, \quad \mathbf{D}\mathbf{S} = \mathbf{S}_d \quad (7)$$

и матрица $\mathbf{D}$ характеризует совокупность операций над вектором $\mathbf{u}$, приводящих к результиру-

ющей диагональной матрице S_d (она может быть задана).

Из (5) следует

$$D = S_d S^{-1}. \quad (8)$$

Поскольку матрица S невырожденная, будет существовать матрица D , с помощью которой можно ортогонализировать векторы чувствительности. При вещественной матрице S матрица D также будет вещественна, и с помощью линейного преобразования сигналов u_1, u_2, u_3 можно устранить поперечную чувствительность трехосевого датчика по всем выходам.

Ортогонализация векторов чувствительности в широкой полосе частот

На высоких частотах, где фазы становятся ненулевыми, сигналы u_i будут связаны с компонентами a_i ускорения дифференциальными уравнениями. Поэтому вместо уравнений (3) необходимо рассматривать уравнения, связывающие преобразования Фурье сигналов $u_i(j\omega)$ с преобразованиями Фурье сигналов $a_i(j\omega)$ через комплексные функции чувствительности $s_{ij}(j\omega)$:

$$\begin{bmatrix} s_{11}(j\omega) & s_{12}(j\omega) & s_{13}(j\omega) \\ s_{21}(j\omega) & s_{22}(j\omega) & s_{23}(j\omega) \\ s_{31}(j\omega) & s_{32}(j\omega) & s_{33}(j\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1(j\omega) \\ a_2(j\omega) \\ a_3(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(j\omega) \\ u_2(j\omega) \\ u_3(j\omega) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В соответствии с (9) матрица D также будет иметь комплексные элементы и, следовательно, при линейном преобразовании сигналов необходимо вводить еще и фазовую коррекцию сигналов.

Рассмотрим частный случай. Пусть функции чувствительности имеют одни и те же нормированные частотные характеристики, т.е.

$$s_{kl}(j\omega) = s_{kl}(\omega_0)\alpha(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (10)$$

где $s_{kl}(\omega_0)$ — часть коэффициента передачи на частоте ω_0 , равная модулю коэффициента передачи на этой частоте, умноженному на $e^{j\varphi(\omega)}$; $\alpha(\omega)$ — коэффициент, отражающий частотную зависимость чувствительности.

В этом случае матрица чувствительностей диагонализуется с помощью вещественных линейных уравнений, т.е. поперечную чувствительность можно устранить, используя линейные преобразования сигналов u_i с вещественными коэффициентами. Действительно,

$$S(j\omega) = S(\omega_0)\alpha(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (11)$$

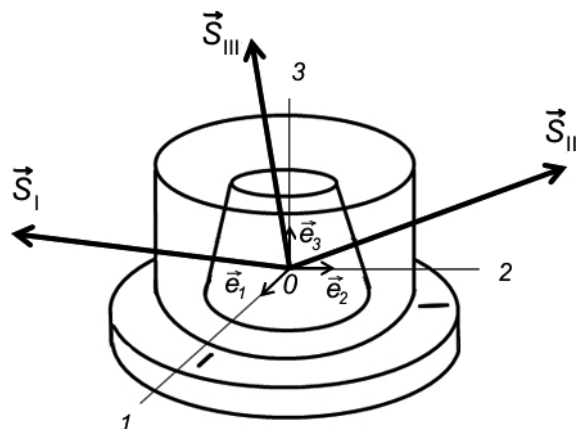


Рис. 1. Положение векторов чувствительности и измерительных осей ТПА

Fig. 1. Position of sensitivity vectors and measurement axes of TPA

$$DS(j\omega) = DS(j\omega_0)\alpha(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = S_d(\omega_0)\alpha(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (12)$$

где $S(\omega_0)$ — матрица вещественных коэффициентов передачи на частоте ω_0 с учетом знака.

Данный пример особенно показателен в случае датчика, измеряющего в косоугольном базисе. Если конструкция измерительной системы датчика выполнена такой, что частотные характеристики выходов при воздействии по трем ортогональным направлениям одинаковые, то и по результирующим сформированным и откорректированным выходам будут такие же частотные характеристики.

Методика измерения фазочастотных характеристик ТПА

Отметим, что датчик с косоугольным измерительным базисом наиболее сложен с точки зрения ортогонализации векторов чувствительности и одновременно отличается наилучшими метрологическими характеристиками.

Исследуемый ТПА типа ТСПА-ЗК с косоугольным измерительным базисом предназначен для работы в составе специализированного прецизионного помехоустойчивого трехканального виброметра с высокими требованиями к фазоидентичности каналов в рабочем диапазоне частот. Датчик имеет единый инерционный элемент и симметричную по измерительным направлениям измерительную систему с дифференциальными выходами. При этом обеспечивается высокая помехоустойчивость к внешним электромагнитным помехам.

На рис. 1 показано положение векторов чувствительности s_I, s_{II}, s_{III} ТПА типа ТСПА-ЗК.

Измерительный базис существенно отличается от ортогонального, поэтому необходима его

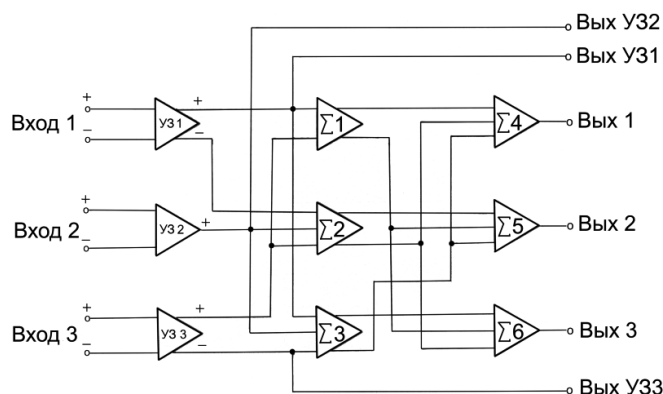


Рис. 2. Структурная схема формирующего ортонормализатора для ТПА с косоугольным измерительным базисом

Fig. 2. Structure of an orthogonizing converter for TPA with quasi-orthogonal measuring basis

ортонормализация и нормализация. Для перехода к прямоугольной системе измерительных осей сигналы с выходов датчика подаются на формирующе-ортонормализующее устройство (рис. 2) [18].

С выходов дифференциальных усилителей заряда УЗ1, УЗ2, УЗ3 сигналы поступают на «формирующие» сумматоры $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$, в которых из векторов чувствительности s_I, s_{II}, s_{III} формируются линейные комбинации в соответствии с угловым положением исходных измерительных осей относительно ортогонального базиса. Для рассматриваемого ТПА они выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{s}_1 &= \bar{s}_I - \frac{1}{2} \bar{s}_{II} - \frac{1}{2} \bar{s}_{III}, \\ \bar{s}_2 &= 0 + \bar{s}_{II} - \bar{s}_{III}, \\ \bar{s}_3 &= \bar{s}_I + \bar{s}_{II} + \bar{s}_{III}.\end{aligned}\quad (13)$$

Ортонормализующие сумматоры $\Sigma_4, \Sigma_5, \Sigma_6$ направляют сформированные векторы чувствительности $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3$ вдоль ортогональных направлений, а также проводят нормализацию чувствительностей, т.е. обеспечивают равенство $\|\bar{s}_I\| = \|\bar{s}_{II}\| = \|\bar{s}_{III}\|$.

Фазо-частотные характеристики (ФЧХ) ТПА измеряли на автоматической установке с помощью помехоустойчивого фазометра типа 2971 фирмы «Брюль и Кьер» на калибровочном вибростенде типа 4290 того же производителя. Для получения эталонного сигнала на первом этапе использовали внутренний пьезоакселерометр вибростенда с собственной резонансной частотой 65 кГц, поэтому в рабочем диапазоне частот (до 20 кГц) фаза эталонного сигнала оставалась постоянной ($\varphi_s = \text{const}$). Отметим, что при применении в качестве эталонного более широкополос-

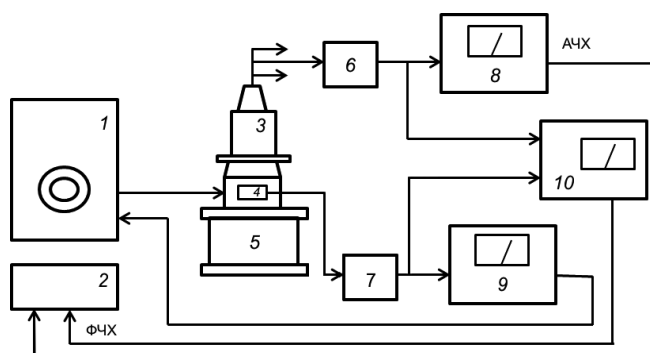


Рис. 3. Измерительная установка для автоматической записи ФЧХ и АЧХ: 1 — генератор; 2 — самописец; 3 — испытуемый датчик; 4 — образцовый акселерометр; 5 — вибратор; 6, 7 — усилители заряда; 8, 9 — измерительные усилители; 10 — фазометр

Fig. 3. Installation for automatic amplitude-frequency (AFR) and phase-frequency (PFR) responses registration: 1 — generator; 2 — recorder; 3 — transducer under test; 4 — reference transducer; 5 — exciter; 6, 7 — charge amplifiers; 8, 9 — measuring amplifiers; 10 — phasemeter

ного вибродатчика типа 4374 с резонансной частотой 85 кГц [19] результаты были те же.

На рис. 3 приведена схема установки для автоматического измерения ФЧХ и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ТПА. Автоматическое построение АЧХ обеспечивалось функцией стабилизации, поддерживающей заданный уровень ускорения.

Алгоритм и результаты измерений

Пусть датчик установлен, как показано на рис. 3, и задано ускорение вдоль одной из его измерительных осей (например, оси 3). Тогда в силу механической симметрии расположения трех пьезопреобразователей относительно оси вибростенда АЧХ и ФЧХ по каждому из выходов I, II, III будут иметь близкий вид. На рис. 4 приведены АЧХ и ФЧХ ТПА после предварительной сборки.

Видно, что на начальных участках первых резонансных пиков АЧХ наблюдаются выбросы вниз. Анализ выбросов на стенде крутильных колебаний типа VST-3201 (Япония) показал, что они связаны с собственными угловыми колебаниями чувствительного элемента. Из сравнения АЧХ и ФЧХ можно заключить, что даже значительный подъем АЧХ (кривая III) не вызывает заметного изменения фазы сигнала, в то время как незначительный выброс на АЧХ приводит к скачкообразному изменению фазы сигнала. Другими словами, фаза сигнала чувствительна к изменению знака производной от АЧХ.

На рис. 5 (воздействие ускорения вдоль оси 3) приведены АЧХ и ФЧХ ТПА после ударного воздействия, которое привело к нарушению механи-

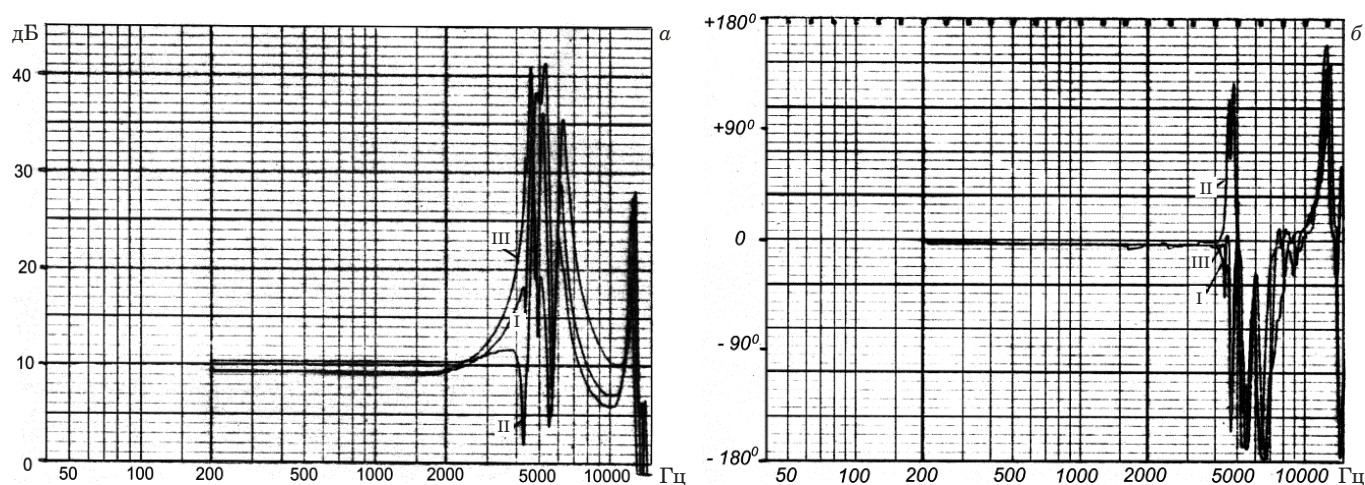


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) по выходам ТПА после сборки при воздействии ускорения вдоль оси 3

Fig. 4. AFR (a) and PFR (b) at just assembled TPA outputs upon vibration along axis 3

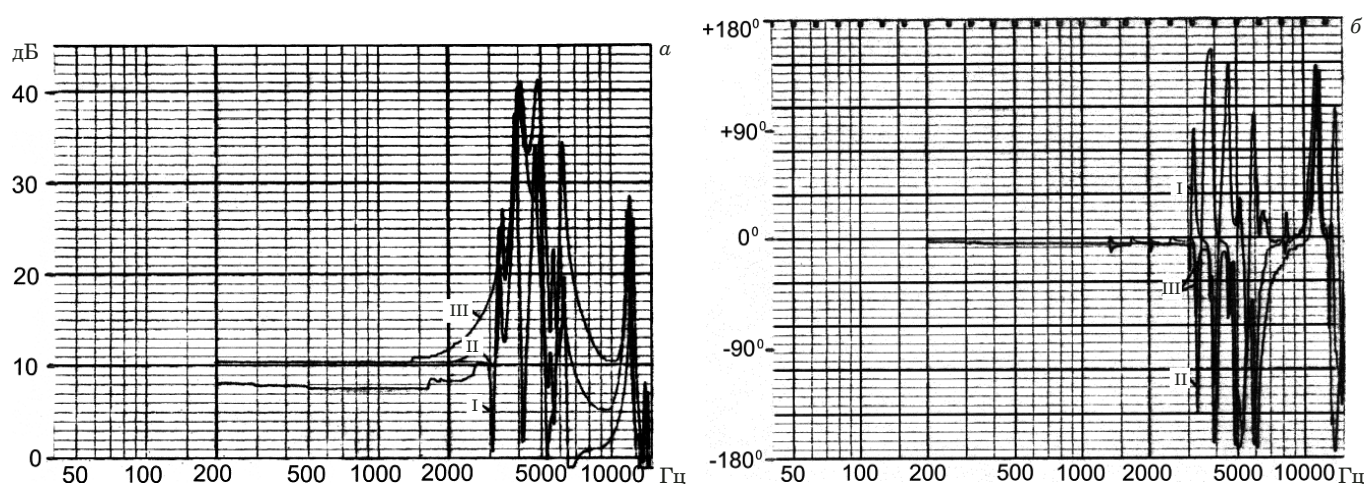


Рис. 5. АЧХ (а) и ФЧХ (б) по выходам ТПА после ударов по корпусу

Fig. 5. AFR (a) and PFR (b) at TPA outputs after several impacts on the TPA body

ческой симметрии за счет смещения и поворота чувствительного элемента и перераспределения сил поджатия трех преобразователей к основанию датчика. Полученные данные позволили внести изменения в конструкцию. Так, для фиксации чувствительного элемента самоустанавливающиеся опоры дополнительно упрочнили, для увеличения контакта между пьезоэлементами и электродами нанесли слой силиконового масла. Получившиеся АЧХ и ФЧХ ТПА после изменений представлены на рис. 6.

По сравнению с датчиком без смазки (см. рис. 4) резонансные пики АЧХ датчика со смазкой менее острые вследствие увеличения коэффициента потерь. Частота первого резонанса для всех трех направлений практически не изменилась и лежит в районе 5 кГц.

Фазовые характеристики выходов II и III ТПА относительно выхода I, взятого в качестве

эталонного, изображены на рис. 7 (воздействие линейного ускорения вдоль измерительной оси 3). Видно, что в рабочем диапазоне частот фазовые характеристики выходов ТПА одинаковы.

Далее исследовали АЧХ и ФЧХ в двух других взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 8).

При воздействии линейного ускорения вдоль измерительной оси 1 (рис. 9, а) проекции векторов чувствительности $\vec{s}_I$, $\vec{s}_{III}$ на измерительную ось 1 составляют $-\frac{3}{4}||\vec{s}_I||$ и $\frac{3}{4}||\vec{s}_{III}||$, а проекция вектора чувствительности $\vec{s}_{II}$ равна нулю. АЧХ и ФЧХ для этого случая приведены на рис. 10.

Выходы I и III имеют идентичные амплитудные и фазовые характеристики. В рабочем диапазоне частот амплитуда сигнала с выхода II на 20 дБ ниже амплитуды сигналов с выходов I и III, что недостаточно для устойчивой работы фа-

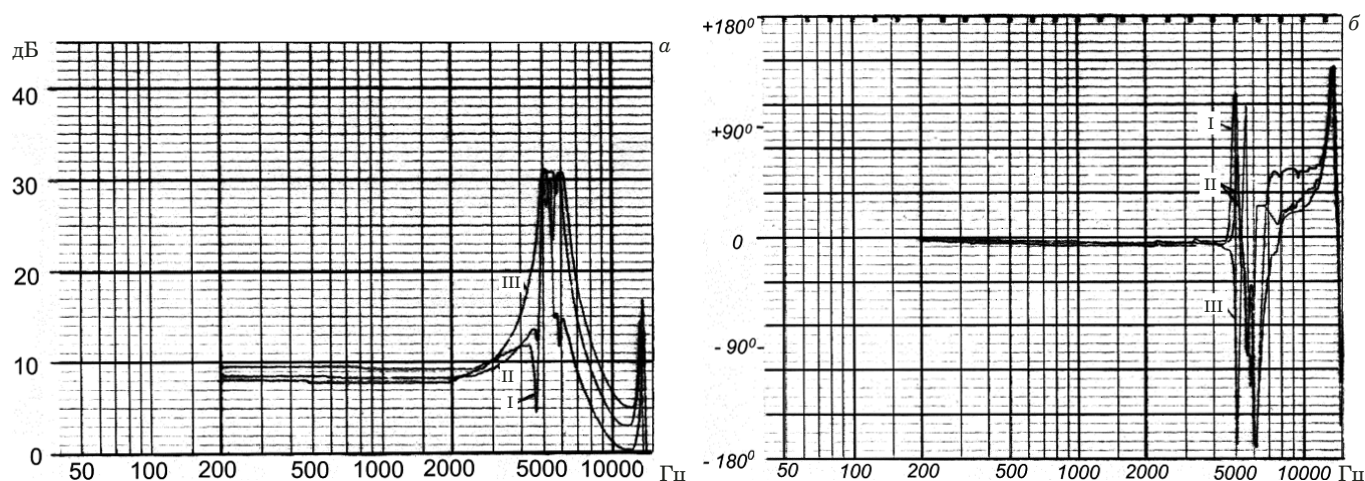


Рис. 6. АЧХ (а) и ФЧХ (б) после закрепления опор и смазки контактных поверхностей пьезоэлементов

Fig. 6. AFR (a) and PFR (b) after tightening the support and lubrication of the piezoelement surfaces

зометра. Поэтому ФЧХ выхода II на рис. 10, б не изображена.

При воздействии линейного ускорения вдоль измерительной оси 2 (рис. 9, б) проекции $\vec{s}_I$, $\vec{s}_{III}$ на ось 2 составят $-\frac{\sqrt{3}}{4}\|\vec{s}_I\|$, $-\frac{\sqrt{3}}{4}\|\vec{s}_{III}\|$, а проекция $\vec{s}_{II}$ равна $\frac{\sqrt{3}}{2}\|\vec{s}_{II}\|$. Эти соотношения, а также приведенные для оси 1, отражают частный случай и следуют из представления пространственного положения векторов и их исходных углов, принятые в конструкции ТПА. АЧХ и ФЧХ приведены на рис. 11.

В рабочем диапазоне частот амплитуда сигнала с выхода II на 6 дБ больше амплитуды сигналов с выходов I и III, что хорошо согласуется с теоретическим расчетом конструкции датчика. Выходы I и III имеют идентичные АЧХ и ФЧХ.

Первые резонансные пики для всех трех выходов совпадают и располагаются в районе 4 кГц, как и в случае воздействия линейного ускорения вдоль измерительной оси 1 (см. рис. 10). Небольшое смещение резонансных частот влево по сравнению с воздействием линейного ускорения вдоль оси 3 (см. рис. 6) можно объяснить увеличением массы вибростола за счет масс приспособления и дополнительного датчика, устанавливаемого для механической симметрии (см. рис. 8). Отметим, что ФЧХ (см. рис. 4 – 11) построены в диапазоне от $-\pi$ до π таким образом, чтобы при измерениях нулевая точка располагалась в середине шкалы фазометра. Это позволило устранить неопределенности при отклонении фазы от предельной отметки шкалы к нулевой и наоборот.

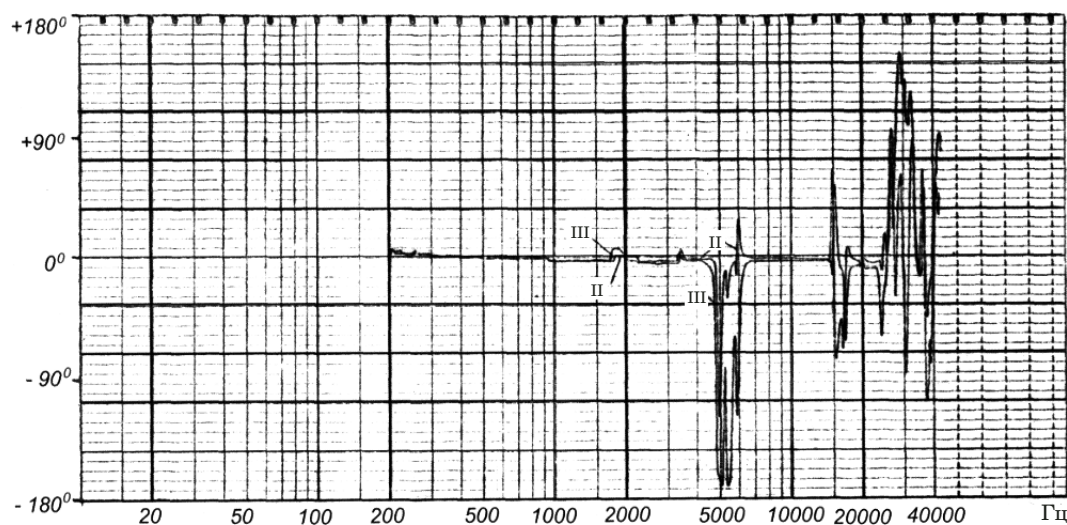


Рис. 7. ФЧХ выходов II и III ТПА относительно выхода I

Fig. 7. PFR of TPA outputs II and III relative to output I

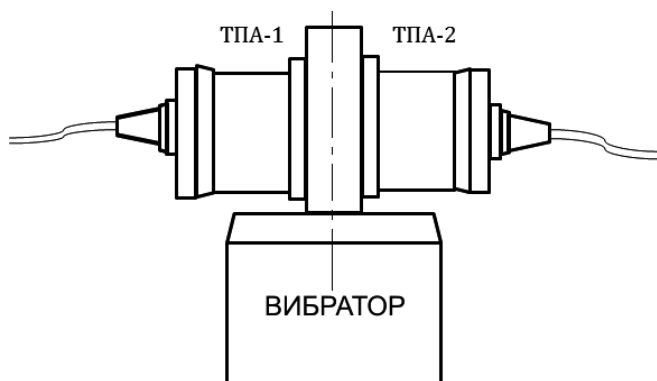


Рис. 8. Схема расположения ТПА для исследования АЧХ и ФЧХ при воздействии ускорения вдоль осей 1 и 2

Fig. 8. Position of TPA for AFR and PFR registration with vibration along axis 1 and 2

Заклучение

Исследование ФЧХ трехосевых вибродатчиков необходимо для создания ортогонализирующих преобразователей, устраняющих поперечную чувствительность в широком диапазоне частот, а также совершенствования конструкции датчиков для улучшения их метрологических характеристик. Это даст возможность проводить 3D-вибрационные испытания материалов с более высокой точностью в расширенном диапазоне частот и получать данные о проблемных участках с высоким разрешением. Виброиспытания материалов в различных режимах вибрационного воздействия (гармонического, полосного, ударного и др.) позволяют всесторонне исследовать материалы на виброустойчивость и выявить пути повышения их надежности и долговечности. Высокоточным направленным воздействием вибрации можно также формировать необходимые свойства мате-

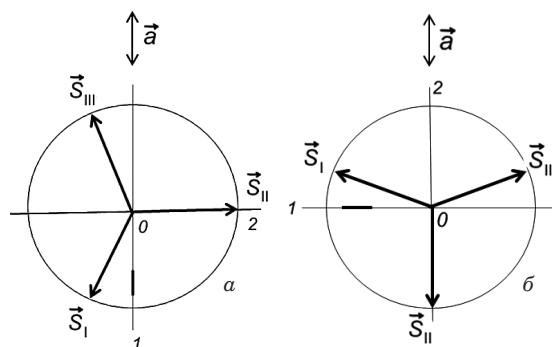


Рис. 9. Положение векторов чувствительности $\vec{s}_I$, $\vec{s}_{II}$, $\vec{s}_{III}$ ТПА при воздействии ускорения вдоль осей 1 (а) и 2 (б)

Fig. 9. Position of sensitivity vectors $\vec{s}_I$, $\vec{s}_{II}$, $\vec{s}_{III}$ of TPA under vibration along axes 1 (а) and 2 (б)

риалов на этапе их производства (например, улучшить однородность структуры и др.).

Проведенные исследования ФЧХ и АЧХ выходов ТПА при воздействии ускорений по трем взаимно перпендикулярным направлениям в направлении измерительных осей показали, что его измерительная система имеет оптимальную конструкцию. Частотные характеристики по выходам практически идентичные, а фазовая неидентичность в рабочем диапазоне частот до 3 кГц не превышает 1° . Следовательно, для датчиков данной и подобной конструкций в рабочем диапазоне частот фазовые характеристики не требуют изменения условий ортогонализации векторов чувствительности, которые можно рассматривать как вещественные.

Используя представленную методику, можно практически полностью устранить влияние поперечной чувствительности трехосевых вибродатчиков как с ортогональным, так и косоугольным измерительным базисом на точность измерения вибрации и расширить рабочий диапазон частот

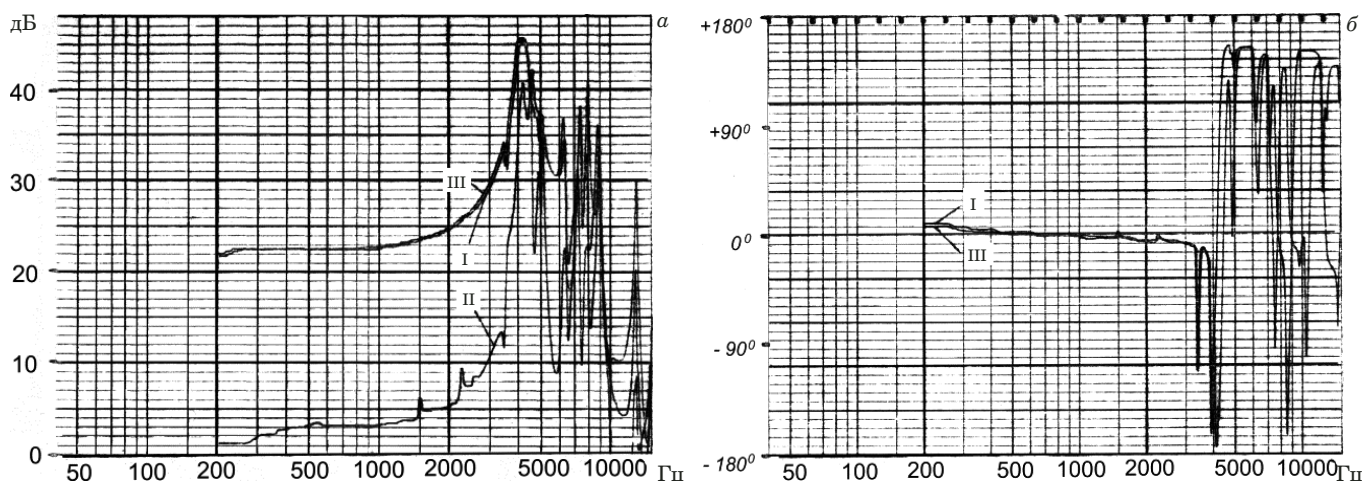


Рис. 10. АЧХ (а) и ФЧХ (б) выходов ТПА при воздействии ускорения вдоль оси 1

Fig. 10. AFR (а) and PFR (б) at TPA outputs under vibration along axis 1

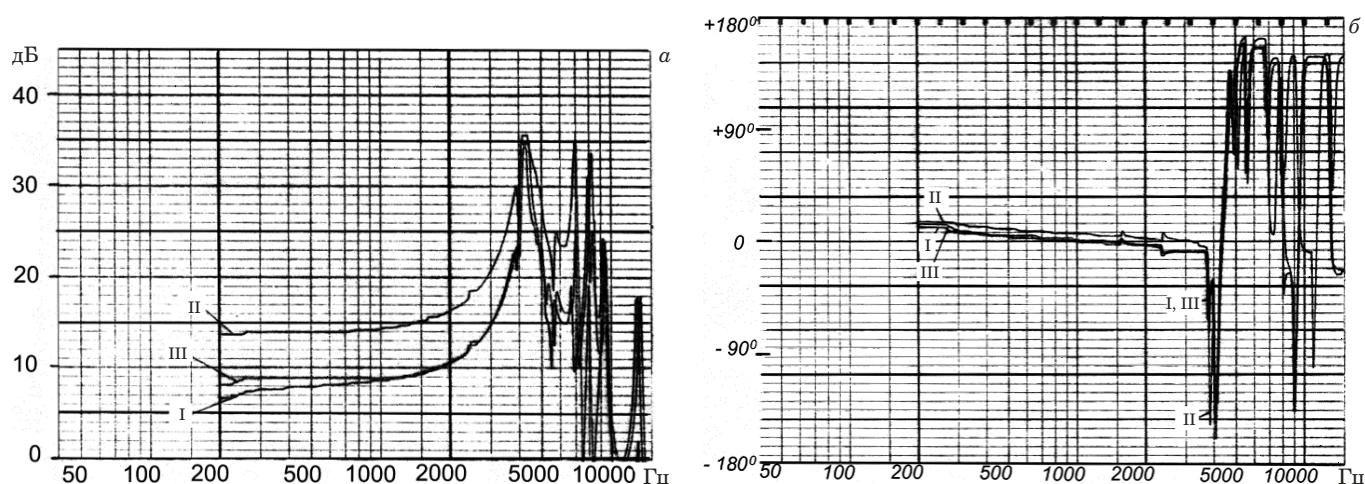


Рис. 11. АЧХ (а) и ФЧХ (б) выходов ТПА при воздействии ускорения вдоль оси 2

Fig. 11. AFR (a) and PFR (b) at TPA outputs under vibration along axis 2

за счет исключения влияния поперечных резонансов, ограничивающих его. Учет фаз канальных выходов особенно важен при создании широкополосных трехосевых датчиков вибрации с единым инерционным элементом и косоугольным измерительным базисом, обеспечивающим ортогонализацию измерительного базиса в широком диапазоне частот и повышающим точность измерения вектора вибрации в заданной точке механического объекта. Кроме улучшения метрологических параметров датчиков вибрации, приведенный метод позволяет снизить требования к точности изготовления их измерительной системы, что упрощает производство. Эта технология весьма перспективна для создания не только новых высокоточных многоосевых датчиков вибрации, но и других многоканальных линейных датчиков физических величин и измерительных систем.

Финансирование, благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, экспериментальные исследования — с использованием оборудования центра коллективного пользования ИМАШ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганиев Р. Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. — М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2013.
2. Ганиев Р. Ф., Ковальчук П. С. Динамика систем твердых и упругих тел (резонансные явления при нелинейных колебаниях). — М.: Машиностроение, 1980. — 208 с.
3. Ганиев Р. Ф., Балакшин О. Б., Кухаренко Б. Г. Бифуркация резонанса при флаттере лопаток ротора турбокомпрессора / Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 1. С. 35 – 37.
4. Асташев В. К., Пичугин К. А., Семенова Е. Б. Нелинейная динамика вибрационной машины с электродинамическим возбудителем колебаний / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. Т. 50. № 1. С. 15 – 24. DOI: 10.31857/S0235711921010065
5. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Анализ и управление параметрами прочности, ресурса и рисками безопасной эксплуатации энергоустановок с различными видами энергоресурсов / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. Т. 51. № 1. С. 47 – 56. DOI: 10.31857/S0235711922010060
6. Лепов В. В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 6. С. 36 – 39. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-36-39
7. Мовенко Д. А., Морозова Л. В., Шуртаков С. В. Исследование характера и причин разрушения карданного вала винтового двигателя / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 12. С. 43 – 50. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-12-43-50
8. Пустовой В. Н., Гришин С. А., Дука В. В., Федосов В. В. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 59 – 64. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64
9. Махутов Н. А., Коссов В. С., Оганьян Э. С. и др. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 4. С. 46 – 55. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55
10. Черепанцев А. С., Салтыков В. А. Широкополосный акселерометр для исследования высокочастотных собственных шумов Земли / Приборы и техника эксперимента. 2020. № 1. С. 130 – 135. DOI: 10.31857/S0032816220010115
11. IEPE Triaxial Accelerometer. Kistler. Product catalogue. https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-841e.pdf (accessed 17.05.2023).
12. Test and Measurement Sensor Catalog. Endevco. <http://endevco.com/contentStore/MktgContent/Endevco/uploads/2019/08/EDV-Catalog Lowres.pdf> (accessed 17.05.2023).
13. Zhdanov A. S., Morozov K. D. A new technology for improving vibration measurement accuracy with 3D piezoelectric transducers / Proceedings of the 10th International Congress on sound and vibration. — Stockholm, 2003. P. 943 – 950.
14. Жданов А. С. Повышение точности измерения пространственной вибрации трехкомпонентными пьезодатчиками на основе электронной ортогонализации векторов чувствительности / Вестник науч.-техн. развития. 2011. № 5. С. 13 – 19.
15. Жданов А. С. Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации / Приборы. 2017. № 4(202). С. 1 – 6.
16. Жданов А. С. Помехоустойчивый трехкомпонентный пьезоакселерометр на основе монолитного пьезоэлемента / Приборы. 2014. № 7(169). С. 1 – 5.

17. **Жданов А. С.** Ортогонализация измерительного базиса трехосевых вибродатчиков методом последовательных приближений / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 4. С. 29 – 37. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-29-37
18. **Жданов А. С.** Предусилитель-компенсатор для трехкомпонентных вибродатчиков / Приборы. 2015. № 4(178). С. 19 – 24.
19. Piezoelectric transducers DeltaShear, Uni-Gain, DeltaTron and special types. <https://kiptm.com/wp-content/uploads/2021/05/26/bryul-i-ker-datchik-vibracii-4321-4374-4375.pdf> (access 17.05.2023).

REFERENCES

1. **Ganiev R. F.** Nonlinear resonances and disasters. Reliability, safety and noiselessness. — Moscow: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2013 [in Russian].
2. **Ganiev R. F., Kovalchuk P. S.** Solid and flexible bodies: (Resonances under nonlinear vibration). — Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. — 208 p. [in Russian].
3. **Ganiev R. F., Balakshin O. B., Kuharenko B. G.** Resonance bifurcation at turbocompressor rotor blade flutter / Dokl. RAN. 2012. Vol. 444. N 1. P. 35 – 37 [in Russian].
4. **Astashev V. K., Pichugin K. A., Semenova E. B.** Nonlinear dynamics of a vibrating machine with an electrodynamic actuator / Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. Vol. 50. N 1. P. 11 – 18 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0235711921010065
5. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Analysis and control of the strength, useful life, and safe operation risks of power plants with various kinds of energy commodities / Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. Vol. 51. N 1. P. 37 – 45 [in Russian].
6. **Lepov V. V.** The reliability and lifetime of engineering systems in extreme operation conditions / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 6. P. 36 – 39 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-36-39
7. **Movenko D. A., Morozova L. V., Shurtakov S. V.** Study of the character and causes of destruction of the cardan shaft of the propeller engine / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 12. P. 43 – 50 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-12-43-50
8. **Pustovoi V. N., Grishin S. A., Duka V. V., Fedosov V. V.** Setup for studying the kinetics of crack growth in cyclic ending tests / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 7. P. 59 – 64 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64
9. **Makhutov N. A., Kossov V. S., Oganyan E. S., et al.** Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 4. P. 46 – 55 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55
10. **Cherepantsev A. S., Saltikov V. A.** Wide band accelerometer for high-frequency internal Earth noise research / Instruments and Experimental Techniques. 2020. N 1. P. 130 – 135 [in Russian].
11. IEPE Triaxial Accelerometer. Kistler. Product catalogue. https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-841e.pdf (accessed 17.05.2023).
12. Test and Measurement Sensor Catalog. Endevco. <http://endevco.com/contentStore/MktgContent/Endevco/uploads/2019/08/EDV-Catalog Lowres.pdf> (accessed 17.05.2023).
13. **Zhdanov A. S., Morozov K. D.** A new technology for improving vibration measurement accuracy with 3D piezoelectric transducers / Proceedings of the 10th International Congress on sound and vibration. — Stockholm, 2003. P. 943 – 950.
14. **Zhdanov A. S.** Improving 3D vibration measurement accuracy with triaxial transducers by means of electronic sensitivity vectors' orthogonalization / Vestn. Nauch.-Tekhn. Razvit. 2011. N 5. P. 13 – 19 [in Russian].
15. **Zhdanov A. S.** Impact of transversal sensitivity on vibration measurement accuracy / Pribory. 2017. N 4(202). P. 1 – 6 [in Russian].
16. **Zhdanov A. S.** Noise resistant triaxial piezoelectric accelerometer with monolithic piezo-element / Pribory. 2014. N 7(169). P. 1 – 5 [in Russian].
17. **Zhdanov A. S.** Orthogonalization of the measuring basis of triaxial vibration transducers by the method of successive approximations / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2023. Vol. 89. N 4. P. 29 – 37 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-29-37
18. **Zhdanov A. S.** Preamplifier-compensator for tri-axial vibration transducers / Pribory. 2015. N 4(178). P. 19 – 24 [in Russian].
19. Piezoelectric transducers DeltaShear, Uni-Gain, DeltaTron and special types. <https://kiptm.com/wp-content/uploads/2021/05/26/bryul-i-ker-datchik-vibracii-4321-4374-4375.pdf> (access 17.05.2023).