

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-4-29-37>

ОРТОГОНАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БАЗИСА ТРЕХОСЕВЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

© **Александр Степанович Жданов**

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

*Статья поступила 31 октября 2022 г. Поступила после доработки 5 ноября 2022 г.
Принята к публикации 21 февраля 2023 г.*

Трехосевые датчики вибрации, применяемые при проведении виброиспытаний материалов и создании виброизмерительных систем, обладают поперечной чувствительностью, которая приводит к снижению точности измерений. В работе приводится решение проблемы устранения погрешности, вызываемой наличием поперечной чувствительности. Погрешность измерения вибрации зависит от многих факторов, в том числе от соотношения вибрационных составляющих по осям чувствительности, ширины спектра вибрации и наличия собственных резонансов вибродатчика по основным и поперечным направлениям. Показано, что ее можно практически полностью компенсировать представленным методом. Анализ составляющих векторов чувствительности по измерительным направлениям показал, что векторы поперечной чувствительности, отражающие паразитные составляющие, проникающие из других направлений, могут быть разложены на составляющие вдоль измерительных осей. Для ортогонализации векторов чувствительности при калибровке предлагаемым методом проводится поворот векторов чувствительности до совпадения с ортогональными направлениями. При этом получается измерительный базис с нулевыми поперечными чувствительностями, в результате чего проводится приведение матрицы чувствительностей к диагональной. Рассмотрены принципы и практический алгоритм калибровки трехосевых вибродатчиков с ортогонализацией по методу последовательных приближений. Приведены матрицы чувствительности на каждом этапе процесса калибровки и показано, как происходит снижение поперечной чувствительности. Представлены результаты разработки трехосевого вибродатчика совместно с электронным преобразователем, показывающие, что в результате калибровки по описанному алгоритму поперечные чувствительности снижены практически до нуля. Поскольку калибровка проводится без разборки вибродатчика, то она может проводиться не только при его изготовлении, но и в процессе поверки в период эксплуатации, что увеличивает его срок службы. Использование описанной методики не только улучшает метрологические параметры датчиков вибрации, но и позволяет существенно снизить требования к точности изготовления их измерительной системы, что снижает издержки и себестоимость производства. Представленный метод перспективен для создания новых высокоточных многоосевых датчиков вибрации и прецизионных измерительных систем на их основе.

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

ORTHOGONALIZATION OF THE MEASURING BASIS OF TRIAXIAL VIBRATION TRANSDUCERS BY THE METHOD OF SUCCESSIVE APPROXIMATIONS

© **Aleksandr S. Zhdanov**

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

Received October 31, 2022. Revised November 5, 2022. Accepted February 21, 2023.

The transversal sensitivity of tri-axial vibration transducers, which have found vast application in various vibration measuring and material testing systems, decreases the accuracy of measurements. We present a solution to the problem of eliminating the error attributed to the presence of the transverse sensitivity. The measurement error depends on many factors including the ratio of vibration components along the sensitivity axes, the width of the vibration spectrum, and the presence of intrinsic resonances of the vibration transducers in the main and transverse directions. The developed method provides almost complete compensation of the error. Analysis of the components of sensitivity vectors along the measuring directions showed that the transversal sensitivity vectors are in fact the parasitic penetrations from other directions, and can be decomposed along the measuring axes. To orthogonalize the sensitivity vectors during calibration, the sensitivity vectors should be rotated until they coincide with the orthogonal directions. A measuring basis with zero transverse sensitivities is thus obtained, and the sensitivity matrix is reduced to a diagonal form. With this approach the fundamentals and practical algorithm using successive approximations of triaxial transducer calibration with orthogonalization are outlined. Each orthogonalization step is illustrated by the current sensitivity matrix, showing the progress of transversal sensitivity reduction. The results of the developed tri-axial transducer coupled to a special preamplifier-converter with transversal sensitivities reduced to nearly zero values using the developed method are presented. Since calibration is carried out without dismantling of a vibration transducer, it can be carried out not only during its manufacture, but also during verification upon operation, which increases the service life. The use of the described technique not only improves the metrological parameters of vibration transducers, but also provides a significant reduction of the requirements for the accuracy of manufacturing their measuring system, thus reducing the production costs. The presented method is promising for the developing new precise multi-axis vibration transducers and measuring systems on their base.

Keywords: vibration transducer; measurement accuracy; sensitivity vector; transversal sensitivity; orthogonalization.

Введение

При испытании материалов на прочность и ресурс важный этап — исследование их структуры на устойчивость к вибрации. В машиностроении надежность и ресурс выпускаемой продукции, такой как энергетические установки с вращающимися и вибрирующими узлами, в значительной степени зависят от их вибрационного состояния. Повышенный уровень вибрации приводит к ускоренному износу элементов механизма (подшипников, упругих элементов амортизаторов, демпферов и др.). При проведении виброиспытаний материалов этих элементов необходимо задавать вектор вибрации с необходимым направлением относительно базовой системы координат. Системы виброконтроля обеспечивают исследование динамики происходящих в таких объектах процессов. От точности измерения вибрации зависит не только качество виброиспытания материалов, но и эффективность систем вибромониторинга. При этом наиболее полную картину дает измерение вектора вибрации. Это необходимо как в процессе совершенствования конструкции выпускаемой продукции, так и для ее виброконтроля в период эксплуатации. Наиболее высоки требования к точности измерения вибрации в сложных механических системах, неисправности которых могут приводить не только к сбоям в их работе, но и катастрофам. В этих объектах происходят сложные нарастающие вибрационные процессы, которые могут приводить к их разрушению [1 – 3].

Для реализации математических моделей, описывающих эти процессы, принципиально

важно получить данные о параметрах многомерной вибрации с необходимой точностью — величину ее вектора и углов его пространственного положения относительно заданной системы координат.

При испытании материалов на прочность и ресурс важный этап — исследование их структуры на устойчивость к вибрации и ее влияние на деградацию свойств. Результаты исследований надежности и ресурса материалов, динамики износа и развития усталостных повреждений механических структур [4 – 7] показывают важность получения точных эмпирических данных для эффективной реализации математических моделей при анализе состояния различных механических объектов и создания измерительных систем высокой точности.

Первичное звено виброизмерительной системы — вибродатчик. От его характеристик точности, в первую очередь, зависит эффективность всей системы. Именно погрешности вибродатчиков определяют в конечном итоге точность измерения вибрации и анализа вибрационного состояния контролируемых объектов. Разработан метод и представлены средства повышения точности измерения вибрации в современных виброизмерительных системах [8, 9]. Наибольшее применение в практике виброизмерений нашли трехосевые датчики вибрации (ТДВ), позволяющие измерять вектор вибрации в заданной точке объекта. Один из существенных и практически неустраняемых в настоящее время источников погрешности измерения вибрации такими датчиками — их поперечная чувствительность, являю-

щаяся значимым источником погрешности измерений, которая может заметно снизить эффективность виброизмерительных систем.

Цель работы — анализ возможности устранения погрешности измерения вибрации, вызванной поперечной чувствительностью вибродатчика, с помощью электронного преобразователя и разработка алгоритма ортогонализации его измерительного базиса с помощью калибровки на измерительном стенде методом последовательных приближений.

Поперечная чувствительность и точность измерений

Поперечная чувствительность вибродатчика появляется в результате механических погрешностей сборки и разброса параметров их чувствительной системы. Так, трехосевые вибродатчики типов 4321 и 4321-V фирмы Брюль и Кьер (Дания) обладают поперечной чувствительностью, достигающей 5 % [10]. При этом эти значения приводятся лишь для частоты 30 Гц, т.е. в дорезонансной области рабочего диапазона частот (далеко до основных и поперечных механических резонансов), что не дает полной информации о величине поперечной чувствительности во всем рабочем диапазоне частот. Аналогичными характеристиками обладают ТВД других изготовителей [11, 12].

Влияние поперечной чувствительности на точность измерения вибрации недооценивается. В результате анализа влияния поперечной чувствительности вибродатчика на точность измерения вибрации предложена обобщенная формула для оценки погрешности измерения с учетом реальных характеристик вибрационного процесса [13]:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_0 + (a_{\pi}/a_0)S_{\pi}[1 + \Psi(f)\gamma], \quad (1)$$

где ξ_0 — номинальная (паспортная) погрешность; S_{π} — поперечная чувствительность; a_{π}/a_0 — отношение составляющих вибрации в поперечном и номинальном направлениях; $\Psi(f)$ — относительный коэффициент, отражающий подъем АЧХ на частотах поперечного резонанса; γ — коэффициент от 0 до 1, отражающий резонанс; f — частота.

На рис. 1 представлен график, иллюстрирующий формулу (1).

Из формулы (1) и рис. 1 следует, что на погрешность измерений существенно влияют характеристики вибродатчика в поперечном направлении. В результате она может значительно превысить паспортную (прямая 1). Исходная паспортная погрешность составляет 2 %, что близко к реальности. Видно, что если погрешность измерения вибрации при нулевых состав-

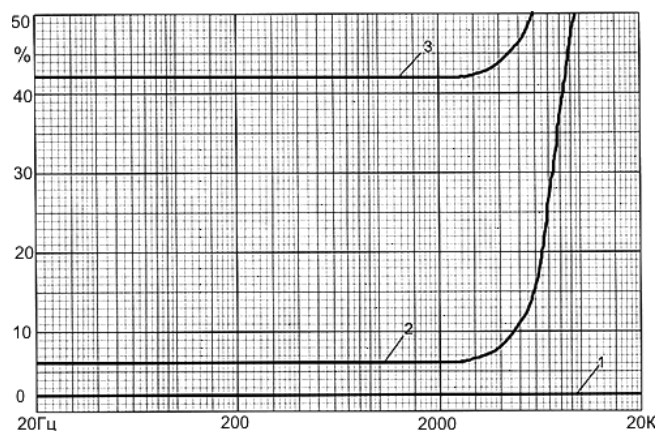


Рис. 1. АЧХ погрешности измерения вибрации при соотношениях составляющих вибрации в осевом и поперечном направлениях $a_{\pi}/a_0 = 0$ (1), 1 (2), 10 (3)

Fig. 1. Frequency response of vibration measurement error at different ratios of the vibration components in main and transversal directions $a_{\pi}/a_0 = 0$ (1), 1 (2), 10 (3)

ляющих в поперечном направлении равна паспортной погрешности датчика, то при уровне поперечных составляющих, превышающих осевую в 10 раз, погрешность измерения увеличивается до 42 %, а на частотах поперечного резонанса до еще больших значений, сокращая при этом рабочий диапазон частот.

Наличие поперечной чувствительности приводит к следующим недостаткам: 1) снижение точности измерения вибрации; 2) сокращение рабочего диапазона частот; 3) уменьшение динамического диапазона измерений.

Поперечная чувствительность — следствие технологической неточности сборки измерительной системы вибродатчика, но она может увеличиваться также из-за разброса и временного дрейфа направлений поляризации пьезопластин акселерометра относительно номинального направления векторов чувствительности по измерительным направлениям. Это относится не только к пьезоакселерометрам, но и к одно- и многоосевым вибродатчикам на основе других принципов преобразования вибрации в электрический сигнал, например датчикам на основе полупроводниковых преобразователей, на основе монолитного пьезоэлемента и др. У последних отклонение векторов чувствительности от ортогональных направлений может достигать 10 % и даже больших значений вследствие трудно управляемой структуры чувствительного элемента. Из-за этого они не нашли промышленного применения.

Поперечная чувствительность может возрасти в период эксплуатации вследствие ударов, падения датчика, деградаций пьезоэлементов и пр., что приводит к снижению точности измерений, и

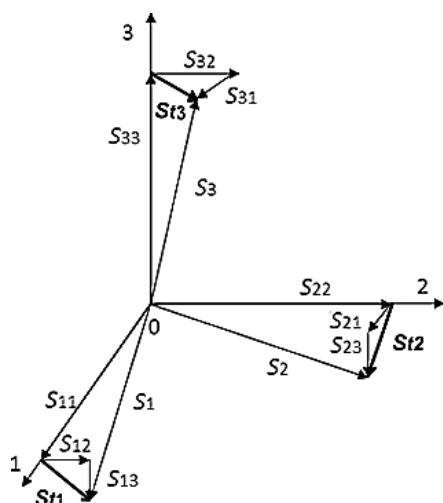


Рис. 2. Разложение векторов чувствительности ТДВ на составляющие по измерительным осям (S_1, S_2, S_3 — векторы чувствительности по соответствующим измерительным осям; S_{ij} — составляющие векторов S_1, S_2, S_3 (i, j — номера вектора и измерительной оси); S_{t1}, S_{t2}, S_{t3} — векторы поперечной чувствительности по соответствующим измерительным осям; 1, 2, 3 — ортогональные измерительные направления)

Fig. 2. Decomposition of sensitivity vectors along the measurement axes (S_1, S_2, S_3 — sensitivity vectors along corresponding measurement axes; S_{ij} — components of vectors S_1, S_2, S_3 (i, j — vector and measurement axis numbers); S_{t1}, S_{t2}, S_{t3} — transversal sensitivity vectors along corresponding measurement axes; 1, 2, 3 — orthogonal measurement axes)

вибродатчики фактически могут стать непригодными для дальнейшей эксплуатации. Для восстановления номинальных метрологических параметров вибродатчиков необходима их разборка и настройка на заводе производителя. Однако вибродатчики выпускаются неразборными, но даже если датчик разобрать, то устранение или уменьшение до значений, не влияющих на точность, поперечной чувствительности практически невозможно. Это определяет актуальность представленного метода корректировки пространственного положения векторов чувствительности вибродатчика без разборки и вмешательства в его конструкцию.

Система векторов чувствительности и принципы преобразований

Вследствие наличия у ТДВ поперечной чувствительности его векторы основной чувствительности не лежат точно вдоль измерительных осей. Измерительный базис трехосевого датчика можно представить графически (рис. 2).

Векторы поперечной чувствительности S_{t1}, S_{t2}, S_{t3} отражают паразитные составляющие, проникающие из других направлений, и раскладываются на составляющие вдоль измерительных осей. Так, общий вектор поперечной чувст-

вительности по оси 1 (X) S_{t1} раскладывается на два вектора — S_{12} и S_{13} . Первый отражает проникание помехи из оси 2 (Y), а второй — из оси 3 (Z). Общий вектор поперечной чувствительности по оси 3 S_{t3} представлен двумя составляющими — S_{31} и S_{32} . Первая отражает проникание помехи из оси 1, а вторая — из оси 2. Аналогично представлено разложение вектора поперечной чувствительности для оси 2.

При измерении ускорения $\vec{a}$ на выходах преусилителей появляются сигналы U_i , которые соответствуют своим измерительным осям ТДВ. Они пропорциональны скалярному произведению векторов $\vec{a}$ и $\vec{S}_i$;

$$\begin{cases} U_1 = \vec{S}_1 \vec{a} = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 \\ U_2 = \vec{S}_2 \vec{a} = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 \\ U_3 = \vec{S}_3 \vec{a} = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3, \end{cases} \quad (2)$$

где a_1, a_2 и a_3 — составляющие ускорения вдоль измерительных осей.

Это также может быть представлено в матричном виде следующим образом:

$$U = Sa,$$

где

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} —$$

вектор-столбец выходных сигналов преусилителей;

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} —$$

матрица чувствительности ТДВ;

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} —$$

вектор-столбец измеряемого виброускорения.

Недиагональные элементы S -матрицы представляют собой паразитные чувствительности к поперечным направлениям, которые появляются вследствие отклонения исходных векторов чувствительности ТДВ от ортогонального базиса. Диагональные элементы матрицы — элементы, отображающие ортогональные составляющие векторов чувствительности датчика, направленные вдоль его номинальных измерительных осей.

Для ортогонализации векторов чувствительности ТДВ необходимо осуществить поворот векторов чувствительности S_1, S_2, S_3 до совпадения с

ортогональными направлениями. При этом мы получим измерительный базис с нулевыми поперечными чувствительностями. Это преобразование основано на принципах линейного матричного преобразования сигналов в каналах. Математически результат этого преобразования — приведение S -матрицы чувствительностей ТДВ к диагональной. В такой матрице все недиагональные элементы равны нулю. Физически описанное выше преобразование ортогонализации измерительного базиса вибродатчика, приводящее к диагонализации матрицы чувствительностей, проводится посредством компенсации помеховых сигналов в каналах, соответствующих номинальным осям чувствительности ТДВ. Ниже описан алгоритм поэтапной ортогонализации посредством настройки коэффициентов перекрестных связей на входах суммирующих усилителей на основе метода последовательных приближений.

Структурная схема электронного преобразователя и принципы его работы

Прежде всего, необходимо сделать замечание по поводу принятой терминологии: «квазиортогональная» система измерительных осей ТДВ и «косоугольная». В принципе, любая система измерительных осей ТДВ, отличающаяся от ортогональной, является косоугольной. Термины «косоугольная» и «квазиортогональная» введены для того, чтобы отличать ТДВ, у которых векторы чувствительности отклонены, соответственно, под большими (более 20°) углами по отношению к ортогональному базису, от ТДВ, у которых векторы чувствительности отклонены под относительно небольшими (до 20°) углами по отношению к ортогональному базису. «Водораздел» в 20° , конечно, не строгий, но представляется разумным, поскольку влияет на выбор структуры электронного преобразователя.

Для ортогонализации векторов чувствительности ТДВ с квазиортогональным измерительным базисом необходим электронный преобразователь векторов чувствительности (ЭПВЧ) (рис. 3). Он осуществляет компенсацию помеховых сигналов в каналах, возникающих вследствие наличия поперечной чувствительности ТДВ. Для этого из векторов чувствительности S_1, S_2, S_3 формируются линейные комбинации и затем в соответствии с формулой (2) проводится их ортогонализация и нормализация.

Здесь необходимо сделать еще одно замечание касательно самого термина «ортогонализация измерительного базиса вибродатчика». Физически пространственное положение векторов чувствительности, формирующих его измери-

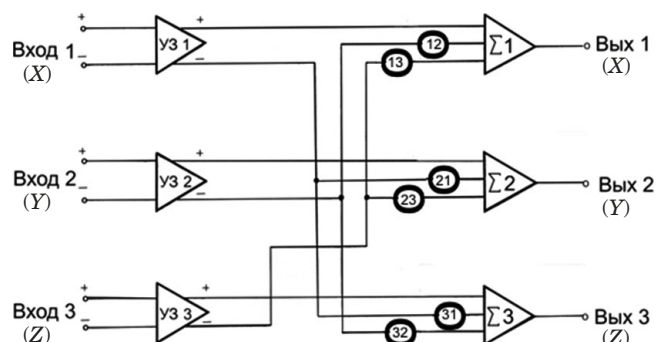


Рис. 3. Структурная схема преобразователя векторов чувствительности для ТДВ с квазиортогональным измерительным базисом (в кружках показаны матричные коэффициенты ортогонализации)

Fig. 3. Structure of the converter for triaxial transducers with quasi-orthogonal measuring basis (matrix orthogonalization coefficients are shown in circles)

тельный базис, при ортогонализации, естественно, не меняется, поскольку оно определяется механической конструкцией его измерительной системы. Однако при этом выходные сигналы ЭПВЧ соответствуют работе с датчиком, у которого измерительный базис стал строго ортогональным, т.е. его вектора чувствительности как бы повернулись. Поэтому будем далее условно считать, что мы проводим ортогонализацию измерительного базиса ТДВ. Поскольку ТДВ без ЭПВЧ работать не может, использование указанного термина справедливо.

Структурная схема ЭПВЧ для работы с ТДВ на основе пьезокерамики состоит из трех усилителей заряда (УЗ 1, УЗ 2 и УЗ 3) и трех суммирующих усилителей (Σ1, Σ2, Σ3). Усилители заряда проводят согласование с вибродатчиком и преобразуют вырабатываемые ими заряды в выходные напряжения. Сигналы, пропорциональные исходным векторам чувствительности ТДВ, с их выходов поступают на соответствующие входы линейных сумматоров. В качестве согласующих предусилителей могут использоваться не только усилители заряда, но и усилители напряжения, а также любые другие предусилители, осуществляющие сопряжение с вибродатчиками. Сумматоры Σ1, Σ2, Σ3 осуществляют разворот векторов чувствительности S_1, S_2, S_3 , формируя линейные комбинации. Их выходные сигналы можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \alpha_{11}U_1 + \alpha_{12}U_2 + \alpha_{13}U_3 \\ \tilde{U}_2 = \alpha_{21}U_1 + \alpha_{22}U_2 + \alpha_{23}U_3 \\ \tilde{U}_3 = \alpha_{31}U_1 + \alpha_{32}U_2 + \alpha_{33}U_3, \end{cases}$$

где U_1, U_2, U_3 — сигналы на выходах ТДВ; α_{ij} — элементы S -матрицы; $\tilde{U}_i$ — выходные сигналы измерительных каналов.

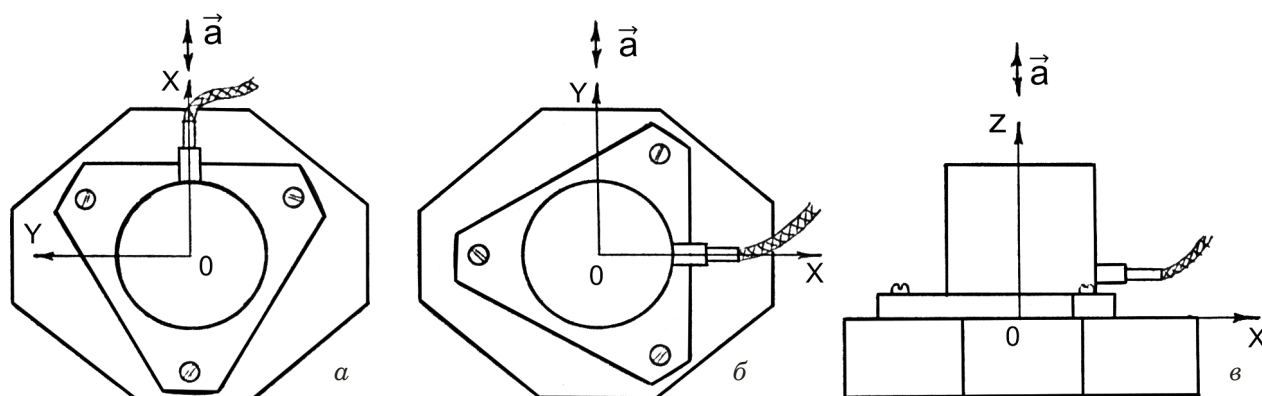


Рис. 4. Вибрация направлена вдоль осей X (а), Y (б), Z (в) (первый этап, шаг 1 – 3)

Fig. 4. Vibration is directed along X (a), Y (b), Z (c) axes (first stage, step 1 – 3)

Коэффициенты α_{11} , α_{22} , α_{33} — элементы S -матрицы, соответствующие основным (паспортным) осям чувствительности ТДВ. Остальные коэффициенты отражают проникание паразитных сигналов в измерительные каналы, возникающих вследствие отклонения векторов чувствительности от ортогональных направлений.

В результате настройки в идеале мы должны получить следующую матрицу чувствительностей:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix}.$$

В ней все поперечные чувствительности равны нулю, т.е. система измерительных осей стала строго ортогональной. При этом $S_{11} = S_{22} = S_{33}$.

Алгоритм практической реализации

Далее рассмотрим один из вариантов реализации описанного метода. Наиболее простой с точки зрения структуры электронного преобразователя способ ортогонализации методом последовательных приближений.

Для разворота векторов по соответствующим входам сумматоров $\Sigma 1$, $\Sigma 2$, $\Sigma 3$ устанавливаются весовые коэффициенты суммирования, равные коэффициентам при проекциях исходных векторов чувствительности S_1 , S_2 , S_3 в соответствии с (2). Эти проекции изображены на рис. 2. Сигналы с выходов усилителей УЗ 1, УЗ 2 и УЗ 3 поступают на соответствующие входы суммирующих усилителей $\Sigma 1$, $\Sigma 2$, $\Sigma 3$, которые проводят ортогонализацию и, при необходимости, нормализацию векторов чувствительности ТДВ. С математической точки зрения они выполняют операцию диагонализации матрицы чувствительностей [9].

Физически ортогонализация осуществляется посредством регулировки коэффициентов перекрестных связей в каналах в небольших пределах. Для этого на вибростенде последовательно задается вибрация по измерительным осям ТДВ. Можно начать с любой оси, например, задать вибрацию вдоль оси Z и регулировкой в сумматорах $\Sigma 1$, $\Sigma 2$ установить нули на выходах X и Y . Затем провести аналогичную процедуру, задав вибрацию по осям X и Y . Ортогонализация способом последовательных приближений проводится в несколько этапов, каждый из которых состоит из трех шагов.

На первом этапе (шаг 1) задаем вибрацию вдоль любой оси, например X (рис. 4, а). При этом уровень вибрации и частота должны быть в пределах рабочих значений параметров ТДВ и вибростенда. Далее регулировкой коэффициентов передачи ЭПВЧ k_{21} и k_{31} , которые отображают соответствующие элементы матрицы чувствительностей, устанавливаем нулевые напряжения на выходах Y и Z преобразователя, чем устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси X . В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S_{1\text{этап1}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ 0 & S_{22} & S_{23} \\ 0 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}.$$

Далее на шаге 2 задаем вибрацию вдоль оси Y (рис. 4, б). Теперь регулировкой коэффициентов k_{12} и k_{32} устанавливаем нулевые напряжения на выходах X и Z преобразователя, чем устраняет влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y . В ре-

зультате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S2_{\text{этап1}} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & S_{13} \\ \Delta S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ \Delta S_{31} & 0 & S_{33} \end{bmatrix},$$

где Δ — коэффициент в интервале от 0 до 1.

Мы видим, что в результате полностью устранены составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y , но при этом появились составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси X . Однако их величина стала меньше исходной.

На шаге 3 задаем вибрацию вдоль оси Z (рис. 4, в). Регулировкой коэффициентов k_{13} и k_{23} устанавливаем нулевые напряжения на выходах X и Y преобразователя, чем устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Z . В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S3_{\text{этап1}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta S_{12} & 0 \\ \Delta S_{21} & S_{22} & 0 \\ \Delta S_{31} & \Delta S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}.$$

В результате первого этапа полностью устранены составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y , но при этом появились составляющие поперечных чувствительностей, проникающих из осей X и Y . Однако их величина стала меньше исходной.

Таким образом, в результате трех установок датчика на вибростенде и регулировок межканальных коэффициентов мы получили датчик с нулевыми поперечными чувствительностями, проникающими из канала Z , и уменьшенными, по сравнению с исходными, поперечными чувствительностями, проникающими из осей X и Y .

Если остаточные значения поперечных чувствительностей превышают требования, то проводится второй этап ортогонализации.

Аналогично первому этапу задаем вибрацию вдоль оси X и регулировкой коэффициентов k_{21} и k_{31} устанавливаем нулевые напряжения на выходах Y и Z преобразователя, чем снова устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси X . В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S1_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta S_{12} & \Delta S_{13} \\ 0 & S_{22} & S_{23} \\ 0 & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}.$$

Далее задаем вибрацию вдоль оси Y , регулировкой коэффициентов k_{12} и k_{32} устанавливаем нулевые напряжения на выходах X и Z преобразователя, чем снова устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y . В результате получаем матрицу чувствительностей:

завателя, чем снова устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Y . В результате получаем матрицу чувствительностей:

$$S2_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & \Delta S_{13} \\ \Delta S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ \Delta S_{31} & 0 & S_{33} \end{bmatrix}.$$

На третьем шаге задаем вибрацию вдоль оси Z , регулировкой коэффициентов k_{13} и k_{23} устанавливаем нулевые напряжения на выходах X и Y преобразователя, чем снова устраняем влияние составляющих поперечных чувствительностей, проникающих из оси Z . В результате получаем следующую матрицу чувствительностей:

$$S3_{\text{этап2}} = \begin{bmatrix} S_{11} & \Delta \Delta S_{12} & 0 \\ \Delta \Delta S_{21} & S_{22} & 0 \\ \Delta \Delta S_{31} & \Delta \Delta S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}.$$

Как видим, в результате второго этапа мы получили датчик с нулевыми поперечными чувствительностями, проникающими из канала Z , и значительно уменьшенными, по сравнению с исходными и полученными после первого этапа, поперечными чувствительностями, проникающими из осей X и Y .

После ортогонализации при необходимости проводится нормализация основных векторов чувствительности, чтобы выполнялось равенство:

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{\text{ном}}.$$

Для этого задаем ускорения вдоль измерительных осей и регулировкой коэффициентов α_{11} , α_{22} и α_{33} , изменяющих общие коэффициенты передачи сумматоров $\Sigma 1$, $\Sigma 2$ и $\Sigma 3$, устанавливаем номинальные стандартные или любые другие требуемые значения основных чувствительностей ТВД. На этом процесс калибровки заканчивается.

Было проведено большое число экспериментов по ортогонализации измерительного базиса ТВД различной конструкции. Полученные эмпирические данные дают возможность оценить минимальное число этапов, позволяющее снизить поперечную чувствительность до необходимого уровня. В качестве грубой оценки можно принять, что в результате каждого этапа составляющие поперечной чувствительности уменьшаются на порядок исходной величины:

$$S_{ij}(n+1) \approx S_{ij}(n) \times S_{ij}(n),$$

где $S_{ij}(n)$, $S_{ij}(n+1)$ — составляющие поперечной чувствительности, оставшиеся после завершения n -го и $(n+1)$ -го этапов ортогонализации.



Рис. 5. ТДВ типа ТСП-1 и ЭПВЧ типа УЗТ-ОН-2

Fig. 5. Triaxial transducer of type TSP-1 and converter of type UZT-ON-2

Например, если исходная поперечная чувствительность равна 10 %, то после первого этапа ортогонализации она уменьшается приблизительно до 1 %, после второго — до 0,01 % и т.д. Чем меньше исходная поперечная чувствительность, тем меньше требуется этапов. Практика показывает, что обычно достаточно 2 – 3 этапов.

Представленный метод обладает высокой эффективностью и прошел апробацию как для улучшения метрологических характеристик промышленных вибродатчиков, так и при разработке новых ТДВ, например, при создании датчика на основе монолитного пьезоэлемента. Так, испытания и калибровка с ортогонализацией серии этих датчиков в соответствии с приведенной методикой показали, что исходные поперечные чувствительности, находившиеся в пределах от 1,4 до 13,8 %, были уменьшены практически до нуля [14]. Разработанный трехосевой помехоустойчивый вибродатчик типа ТСП-1, работающий совместно с электронным преобразователем УЗТ-ОН-2 (рис. 5), имеет поперечную чувствительность по выходам ЭПВЧ менее 0,1 %, коэффициент преобразования 10 мВ/мс² и работает в диапазоне частот 0,1 – 5000 Гц.

Заключение

Представленная методика показала свою эффективность и позволяет практически полностью устранить влияние поперечной чувствительности ТДВ на точность измерения вибрации и расширить его рабочий диапазон частот. Ортогонализация измерительного базиса ТДВ методом последовательных приближений выполняется электронным преобразователем с наиболее простой структурой и обеспечивает максимальный динамический диапазон по шумам, а также быструю сходимость в 2 – 3 этапа. Поскольку она проводится без разборки вибродатчика, то может проводиться не только при его изготовлении, но и в процессе поверки в период эксплуатации, что увеличивает его срок службы. Использование описанной методики не только улучшает метро-

логические параметры датчиков вибрации, но и дает возможность существенно снизить требования к точности изготовления их измерительной системы, что снижает издержки и себестоимость производства. Необходимо также отметить, что этот метод весьма перспективен для создания не только новых высокоточных многоосевых датчиков вибрации, но и других многоканальных линейных датчиков физических величин.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ганиев Р. Ф.** Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и беспшумность. — 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. **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
5. **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
6. **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
7. **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
8. **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.
9. **Жданов А. С.** Повышение точности измерения пространственной вибрации трехкомпонентными пьезодатчиками на основе электронной ортогонализации векторов чувствительности / Вестник науч.-тех. развития. 2011. № 5. С. 13 – 19.
10. **Triaxial Charge Accelerometer Types 4321 and 4321-V.** Product data. <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2034.ashx> (accessed 28.10.2022).
11. **IEPE Triaxial Accelerometer.** Kistler. Product catalogue. <https://www.kistler.com/files/document/000-928e.pdf> (accessed 28.10.2022).
12. **Test and Measurement Sensor Catalog.** Endevco. http://endevco.com/contentStore/MktgContent/Endevco/uploads/2019/08/EDV-Catalog_Lowres.pdf (accessed 28.10.2022).
13. **Жданов А. С.** Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации / Приборы. № 4(202). 2017. С. 1 – 6.

14. **Жданов А. С.** Помехоустойчивый трехкомпонентный пьезоакселерометр на основе монокристаллического пьезоэлемента / Приборы. 2014. № 7(169). С. 1 – 5.

REFERENCES

1. **Ganiev R. F.** Nonlinear resonances and disasters. Reliability, safety and noiselessness. — Moscow: Regul'yarnaya i Khaoticheskaya Dynamika, 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. Akad. Nauk. 2012. Vol. 444. N 1. P. 35 – 37 [in Russian].
4. **Lepov V. V.** The reliability and lifetime of engineering systems in extreme operation conditions / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 6. P. 36 – 39 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-6-36-39
5. **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 / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 12. P. 43 – 50 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-12-43-50
6. **Pustovoi V. N., Grishin S. A., V. Duka V. V., Fedosov V. V.** Setup for studying the kinetics of crack growth in cyclic ending tests / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 7. P. 59 – 64 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64
7. **Makhutov N. A., Kossov V. S., Oganyan E. S., et al.** Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 4. P. 46 – 55 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55
8. **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.
9. **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].
10. Triaxial Charge Accelerometer Types 4321 and 4321-V. Product data. <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2034.ashx> (accessed 28.10.2022).
11. IEPE Triaxial Accelerometer. Kistler. Product catalogue. <https://www.kistler.com/files/document/000-928e.pdf> (accessed 28.10.2022).
12. Test and Measurement Sensor Catalog. Endevco. http://endevco.com/contentStore/MktgContent/Endevco/uploads/2019/08/EDV-Catalog_Lowres.pdf (accessed 28.10.2022).
13. **Zhdanov A. S.** Impact of transversal sensitivity on vibration measurement accuracy / Pribory. 2017. N 4(202). P. 1 – 6 [in Russian].
14. **Zhdanov A. S.** Noise resistant triaxial piezoelectric accelerometer with monolithic piezoelement / Pribory. 2014. N 7(169). P. 1 – 5 [in Russian].