

УДК 662- 791.2: 662- 799

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВИБРАЦИИ ТРЁХКОМПОНЕНТНЫМИ ПЬЕЗОДАТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ ВЕКТОРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

© А.С. Жданов

Учреждение Российской Академии наук Институт машиноведения
им А.А.Благодирова РАН, Москва, Россия,
E- Mail: alezhd@mail.ru

Аннотация. Представлен новый способ повышения точности измерения пространственной вибрации. На базе описанной математической модели создан трёхкомпонентный пьезодатчик с единым инерционным элементом, косоугольной системой измерительных осей и электронным ортогонализатором векторов чувствительности. Поперечная чувствительность снижена до величин менее 0.1 %. Датчик измеряет вибрацию в одной точке. Кроме того, при данном подходе снижаются требования к точности изготовления и сборки компонентов измерительной системы датчика, что позволяет снизить его себестоимость и производить его регулярную поверку и калибровку во время эксплуатации.

Ключевые слова: Трёхкомпонентный пьезодатчик, поперечная чувствительность, измерительные оси, ортогонализация векторов чувствительности.

1. Введение. Поскольку большинство физических величин, характеризующих энергетические процессы в механических системах, имеют трёхмерный характер, то наиболее полную картину их технического состояния дают трёхмерные измерительные системы. В частности, такие системы широко используются в промышленных системах мониторинга вибрации и акустических шумов, а также в научных исследованиях и прецизионных системах калибровки. Кроме того, такие системы применяются для вычисления акустического давления и скорости частиц в заданной точке [1], измерении распространения вибрационной и акустической энергии [2] и т. п.

Большинству широко используемым в виброизмерительных системах промышленным трёхкомпонентным пьезодатчикам (далее- ТКП) присущи погрешности, определяемые конструкцией их измерительной системы. Эти погрешности зачастую существенно снижают точность измерений и эффективность всего измерительного комплекса. Объясняется это тем, что фактически такой ТКП представляет собой три независимых однокомпонентных пьезоакселерометра, укрепленных на кубическом основании в трёх ортогональных плоскостях. Эта конструкция обладает следующими очевидными недостатками.

Прежде всего, и это, по мнению автора, наиболее существенно, поперечная чувствительность у таких ТКП определяется точностью механического изготовления и сборки компонентов измерительной системы датчика и даже у дорогих ТКП может достигать величин порядка нескольких процентов относительно осевой чувствительности. При неблагоприятных условиях, когда, например, вибрационные составляющие в поперечном направлении значительно превышают таковые в направлении измерительной оси датчика, погрешность измерения может достигать недопустимых значений (50% и более), приводящих к невозможности оценки уровня вибрации с заданной точностью, нарушению правильного функционирования систем мониторинга и другим нежелательным последствиям.

Второй недостаток заключается в том, что у обычного ТКП отсутствует единая измерительная точка. Физически он измеряет вибрацию в трёх разнесённых друг относительно друга измерительных точках. В некоторых случаях, когда, например длина волны вибрации сравнима или меньше по сравнению с разном измерительных точек, точное измерение вектора вибрации в заданной точке становится невозможным.

Что касается промышленного производства ТКП, то необходимо отметить, что для обеспечения приемлемых характеристик точности технология налагает высокие требования к качеству изготовления деталей и сборки ТКП, что снижает выход продукта и повышает его себестоимость. Кроме того, при случайных повреждениях датчика во время эксплуатации (например, вследствие падения) его характеристики точности ухудшаются. Часто при этом ещё более возрастает поперечная чувствительность.

Необходимо отметить, что технологические возможности производства, похоже, на настоящий момент исчерпаны и не позволяют обеспечить дальнейшее снижение указанных погрешностей ТКП.

Разработанный в лаборатории Института Машиноведения им. А. А. Благонравова ТКП совместно с соответствующим многофункциональным согласующим преусилителем, который получил название “ортонормализатор“, свободен от указанных выше недостатков и имеет простую с технологической точки зрения конструкцию. Он позволяет проводить измерения многомерной вибрации в заданной точке с точностью, недостижимой при использовании обычных промышленных ТКП.

Его измерительная система включает один инерционный элемент, воздействующий симметрично на три косоугольные измерительные системы с симметричным выходом, вырабатывающие заряд, пропорциональный величине виброускорения в одной измерительной точке, расположенной в центре масс инерционного элемента. Ортонормализатор производит прецизионную ортогонализацию векторов чувствительности ТКП на основе математического аппарата линейных матричных преобразований в многоканальных системах, и, кроме того, осуществляет их нормализацию, то есть приведение к стандартному значению, по всем выходам. Он включает три согласующих усилителя заряда с симметричным входом и специальную схему ортогонализации и нормализации.

Изготовленный экспериментальный образец ТКП типа ТСПА5к совместно с ортонормализатором УЗТ-ОН-2 обладает поперечной чувствительностью менее 0.1% и подавлением внешних симметричных помех не менее 60 дБ (см. Табл.1). Он измеряет вибрацию в одной точке и позволяет производить регулярную поверку и калибровку в период эксплуатации, что значительно повышает его ресурс. На Рис.4 представлен его внешний вид.

1. Система векторов чувствительности. Как было отмечено выше, стандартные промышленные ТКП измеряют вибрацию в трёх различных точках. Рассматриваемый датчик измеряет вибрацию в одной назначенной точке, что достигается тем, что его измерительная система включает один инерционный элемент, воздействующий одновременно на три пьезоэлектрические чувствительные системы, расположенные под одинаковыми углами по отношению друг к другу и базе датчика.

Основные принципы конструкции предлагаемого ТКП и математических преобразований изложены в работе [6]. Его исходные векторы чувствительности образуют косоугольную систему, исходящую из начала координат – точка 0, как показано на Рис.1. Из Рис.1 видно, что физически датчик измеряет в повернутой косоугольной системе координат. $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ - это векторы чувствительности его измерительной системы. Вектор чувствительности \vec{S}_{II} расположен в плоскости 012 и в общем случае под углом α к оси 02.

Проекции векторов $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ на плоскость 012 (см. Рис.2) расположены под взаимными углами 120° . В идеальном случае их длина равна:

$$|\vec{S}_I| = |\vec{S}_{II}| = |\vec{S}_{III}| = S$$

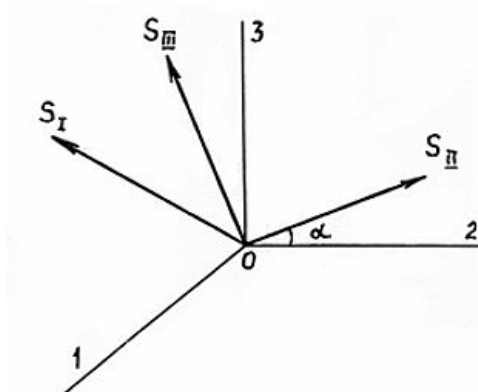


Рис.1. Взаимное положение векторов чувствительности и измерительных осей ТКП

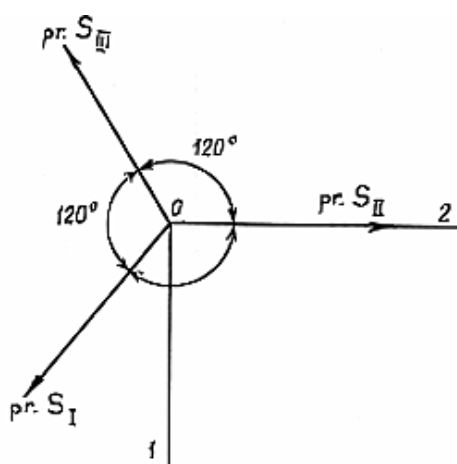


Рис.2. Проекция векторов чувствительности на плоскость 012

2. Ортогонализация векторов чувствительности. Как видно из Рис.1 и Рис.2, исходная система векторов чувствительности описываемого ТКП существенно отличается от ортогональной. Для того, чтобы преобразовать её в ортогональную систему 0123 выходные сигналы I, II, III подаются на соответствующие входы 1, 2, и 3 ортогонализующей схемы, на выходе которой образуются линейные комбинации исходных векторов чувствительности:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= \vec{S}_I + 0 \vec{S}_{II} - \vec{S}_{III} \\ \vec{S}_2 &= -0,5 \vec{S}_I + \vec{S}_{II} - 0,5 \vec{S}_{III} \\ \vec{S}_3 &= \vec{S}_I + \vec{S}_{II} + \vec{S}_{III} \end{aligned} \quad (1)$$

Проекция векторов чувствительности $\vec{S}_I, \vec{S}_{II}, \vec{S}_{III}$ в ортогональной системе осей:

$$\begin{aligned} \vec{S}_I &= (S 3^{0,5} \cos \alpha ; \quad -S 0,5 \cos \alpha ; \quad S \sin \alpha) \\ \vec{S}_{II} &= (\quad 0 \quad ; \quad S \cos \alpha ; \quad S \sin \alpha) \\ \vec{S}_{III} &= (-S 3^{0,5} \cos \alpha ; \quad -S 0,5 \cos \alpha ; \quad S \sin \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= (S_3^{0,5} \cos \alpha ; 0 ; 0) \\ \vec{S}_2 &= (0 ; S_1,5 \cos \alpha ; 0) \\ \vec{S}_3 &= (0 ; 0 ; S_3 \sin \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

Из соотношений (3) следует, что в идеале у векторов чувствительности $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$ поперечная чувствительность равна нулю. На практике, однако, вследствие механических погрешностей сборки датчика эти векторы расположены не строго вдоль ортогональных осей 1, 2, и 3, что приводит к появлению некоторой поперечной чувствительности.

Векторы чувствительности (см. Рис.3) могут быть также представлены в виде:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= S_{11}\vec{n}_1 + S_{12}\vec{n}_2 + S_{13}\vec{n}_3 \\ \vec{S}_2 &= S_{21}\vec{n}_1 + S_{22}\vec{n}_2 + S_{23}\vec{n}_3 \\ \vec{S}_3 &= S_{31}\vec{n}_1 + S_{32}\vec{n}_2 + S_{33}\vec{n}_3, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ - орты вдоль измерительных осей.

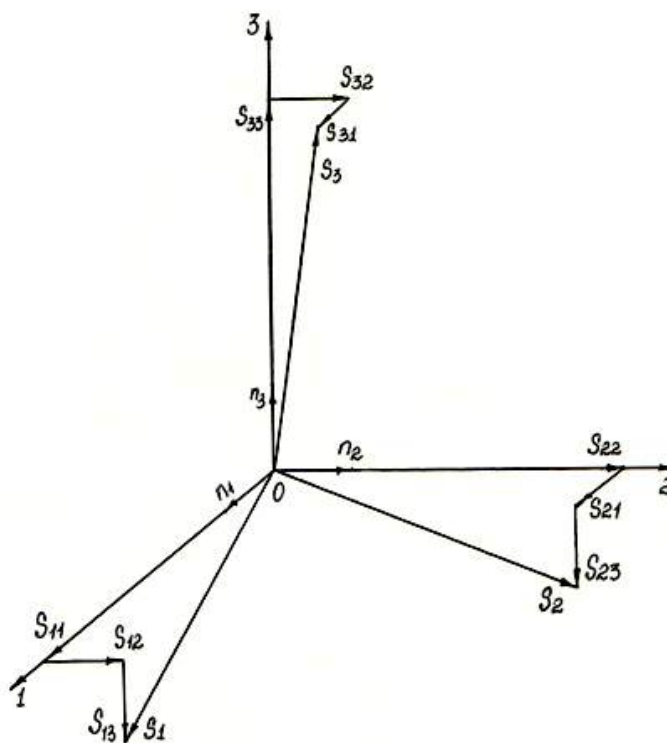


Рис.3. Представление векторов чувствительности ТКП через составляющие по измерительным осям

Векторы чувствительности $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$ могут быть представлены через свои составляющие: $\vec{S}_{ij} = S_{ij} \vec{n}_j$, где 'i' - номер вектора чувствительности, 'j' - номер измерительной оси, вдоль которой он направлен.

При измерении виброускорения:

$$\vec{a} = a_1\vec{n}_1 + a_2\vec{n}_2 + a_3\vec{n}_3,$$

каждой измерительной оси ТКП соответствует свой выходной сигнал ортогонализатора U_i , который является скалярным произведением векторов \vec{S}_i и \vec{a} :

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

Это может быть также представлено в матричном виде:

$$U = S a,$$

где U - вектор-столбец выходных сигналов, a – вектор- столбец виброускорения, S – матрица чувствительности;

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}.$$

Недиагональные элементы этой S -матрицы представляют собой паразитные чувствительности к поперечным направлениям. Диагональные элементы--- это ортогональные составляющие векторов чувствительности, направленные вдоль измерительных осей датчика. Таким образом, задача устранения поперечной чувствительности или, другими словами, задача ортогонализации векторов чувствительности, сводится к задаче диагонализации S - матрицы.

На практике возможны различные варианты её решения. Разработанный и представленный в данной статье ортогонализатор использует, возможно, наиболее простой метод преобразований, основанный на итерационном способе процедуры калибровки [3].

3. Ортогонализатор. По своей сути ортогонализатор представляет собой трёхканальный согласующий усилитель заряда с дифференциальными входами, подключёнными к симметричным выходам пьезопреобразователей ТКП [4] . Выходы усилителей заряда подключены к входам линейных сумматоров с перекрёстными связями [3]. Его выходные сигналы могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= \alpha_{11} U_1 + \alpha_{12} U_2 + \alpha_{13} U_3 \\ \tilde{U}_2 &= \alpha_{21} U_1 + \alpha_{22} U_2 + \alpha_{23} U_3 \\ \tilde{U}_3 &= \alpha_{31} U_1 + \alpha_{32} U_2 + \alpha_{33} U_3,\end{aligned} \tag{5}$$

где U_1, U_2, U_3 - выходные сигналы пьезопреобразователей, α_{ij} - элементы матрицы чувствительности, \tilde{U}_i - выходные сигналы ТКП.

Суммирующие каскады с математической точки зрения выполняют операцию диагонализации матрицы чувствительности на основе метода последовательных приближений.



Рис. 4. Внешний вид ТКП типа ТСПА5к и ортонормализатора УЗТ-ОН-2

Таблица 1. Основные характеристики ТКП типа ТСПА5к совместно с ортонормализатором УЗТ-ОН-2

Параметр	Ед. Измер.	Значение
1. Рабочий диапазон частот	Hz	0.1 - 2000
2. Чувствительность	$mV S^2 / m$	5
3. Поперечная чувствительность	%	< 0.1
4. Рабочий диапазон температур	$^{\circ}C$	-40.....+70
5. Подавление помех	dB	> 65
6. Вес датчика	g	58
7. Размеры датчика предусилителя	mm	35x30 45x55x120

4. Заключение. В данной статье представлен новый метод повышения точности измерения многомерной вибрации трёхкомпонентным пьезодатчиком с единой измерительной точкой на основе математического аппарата линейных преобразований в многоканальных системах. Использование этой технологии в многомерных измерительных системах с использованием датчиков вибрации, датчиков силы, микрофонов, датчиков давления и прочих первичных преобразователей многомерных физических величин позволяет создавать измерительные системы с точностью измерений, недостижимой в настоящее время.

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что применение рассмотренного метода ортогонализации векторов чувствительности ТКП обеспечивает следующие преимущества:

1. Повышение точности измерений, ограниченной лишь точностью калибровки.
2. Применение описанной технологии позволяет снизить требования к точности изготовления компонентов датчика при обеспечении заданных параметров точности.

3. В процессе эксплуатации ТКП появилась возможность производить регулярную поверку и калибровку датчиков, поддерживающую его характеристики точности на заданном уровне.
4. Описанный в данной статье принцип ортогонализации векторов чувствительности позволяет создавать двух- и трёхмерные системы измерения высокой точности, используя независимые однокомпонентные датчики, установленные на объекте под различными углами, формируя ортогональную (или любую другую заданную) измерительную систему электронным способом.

Литература

1. G.Raasmussen, P.Raasmussen. Intensity measurement on structures// Proceedings of 3rd International Congress on Intensity Techniques. Senlis, France, 1990.
2. R.J.Pinnington, W.Redman-White, K.T.Brown. Methods for structural power transmission measurement// Proceedings of 1st International Congress on Acoustic Intensity Measurement. Senlis, France, 1981.
3. Голубев В.С., Генкин М.Д. и др. Анализатор вибрации/ Патент СССР № 1257411
4. Голубев В.С. и др. Дифференциальный пьезоэлектрический преобразователь/ Патент СССР № 591725
5. Голубев В.С., Жданов А.С., Скворцов О.Б. Ортонормализатор для трехкомпонентных вибродатчиков// Виброметрия. Материалы конференции. М., Издание Московского дома научно-технической пропаганды (МДНТП), 1986 г.
6. Alexander Zhdanov, Konstantin Morozov. A new technology for improving vibration measurement accuracy with 3D piezoelectric transducers// Proceedings of the 10th International Congress on sound and vibration, 7- 10 July 2003, Stockholm, Sweden.

Поступила: 22.03.11.