

УДК 621

Ю.Г. Задорожный /к.т.н./  
 ООО "Пьезосенсор" (Чернигов, Украина)

## ПОГРЕШНОСТЬ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЕКТОРА ВИБРАЦИИ ПО ТРЕМ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОСЯМ

*Розглянуто особливості формування погрешності вектора вібрації при його вимірюванні акселерометрами по трьох взаємно перпендикулярних осях. Показано, що нульову погрешність вимірювання дає використання датчиків маючих "круглу" діаграму спрямованості. Для акселерометрів, використовуваних у стаціонарній апаратурі, важливою технічною характеристикою є величина відхилення від "круглої" діаграми спрямованості, що повинна даватися в паспорті на виріб поряд з іншими технічними характеристиками.*

*Рассмотрены особенности формирования погрешности вектора вибрации при его измерении акселерометрами по трем взаимно перпендикулярным осям. Показано, что нулевую погрешность измерения дает использование датчиков имеющих "круглую" диаграмму направленности. Для акселерометров, используемых в стационарной аппаратуре, важной технической характеристикой является величина отклонения от "круглой" диаграммы направленности, которая должна даваться в паспорте на изделие наряду с другими техническими характеристиками.*

Проведение оценки параметров вибрации оборудования становится обязательным технологическим процессом в промышленном производстве. Анализируя параметры вибрации промышленного оборудования можно дать рекомендации по его ремонту и обоснованно сделать прогноз ресурса его работы. Это позволяет перейти от планового ремонта оборудования или ремонта после разрушения к ремонту по фактическому техническому состоянию, что позволяет экономить финансовые средства предприятия. Точность и достоверность диагностики оборудо-

вания во многом определяется точностью оценки его параметров вибрации. В основе оценки параметров вибрации лежит определение вектора (направления и величины) абсолютной вибрации с помощью соответствующих первичных преобразователей – датчиков вибрации.

Определение вектора вибрации осуществляется путем измерения в контрольной точке оборудования вибрации по трем взаимно перпендикулярным измерительным осям соответственно тремя датчиками вибрации (либо одним трехкомпонентным датчиком). Путем суммирования

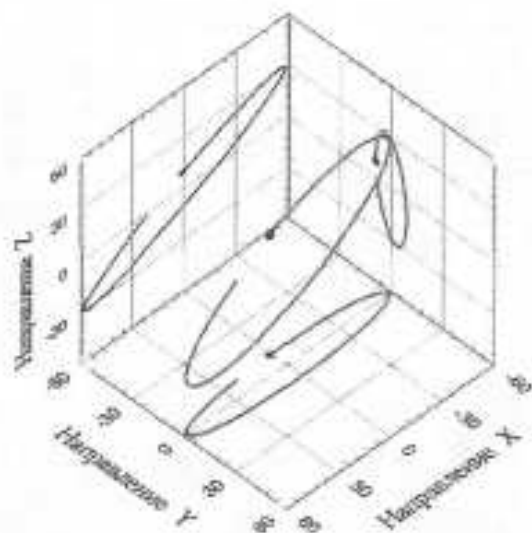


Рисунок 1 – Траектория движения вектора вибрации

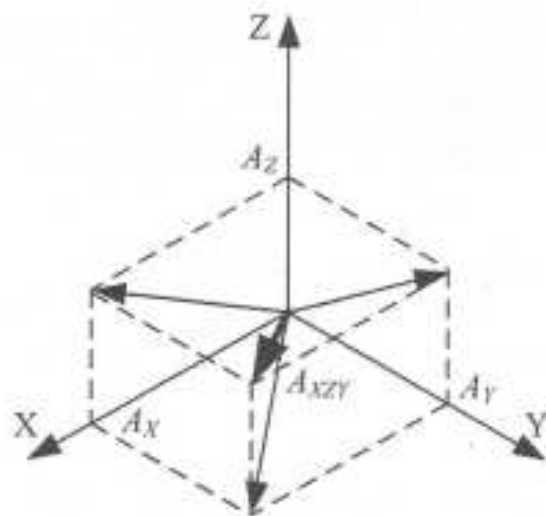


Рисунок 2 – Проекции вектора вибрации на измерительные оси

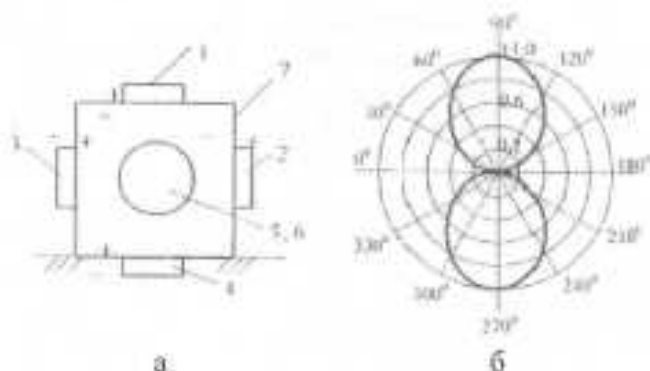


Рисунок 3 – Конструкция трехкомпонентного пьезоэлектрического акселерометра (а) и диаграмма направленности для одной пары его пьезоэлементов (б); 1...6 – пьезоэлементы; 7 – основание

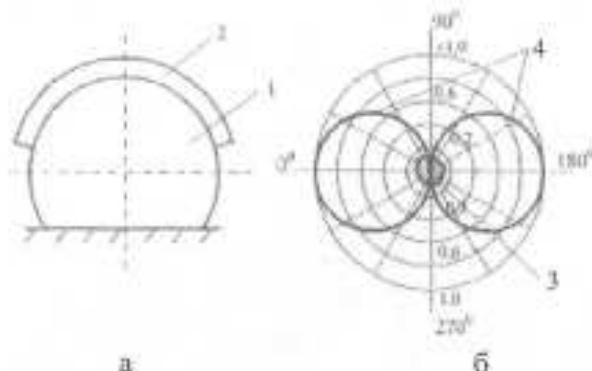


Рисунок 4 – Конструкция акселерометра с пьезоэлементом в виде сферического сегмента (а) и его диаграмма направленности поперечной чувствительности (б); 1 – основание в виде шара; 2 – пьезоэлемент; 3 – разработанный акселерометр в работе [1]; 4 – акселерометр "Delta Shear" ("Брюль и Кьер")

полученных результатов измерения по правилу сложения векторов определяется суммарный вектор вибрации в данной точке контроля. Полученный таким образом вектор вибрации не учитывает систематическую погрешность, вызванную влиянием диаграммы направленности акселерометров. Эта погрешность может достигать значительной величины соизмеримой с величиной вектора вибрации.

Целью настоящей работы является определение величины погрешности при измерении вектора вибрации акселерометрами по трем взаимно перпендикулярным измерительным осям.

Траектория движения вектора вибрации оборудования в контрольной точке может иметь сложную форму (рисунок 1). Она складывается из непрерывного ряда мгновенных значений вибрации. Мгновенное значение вектора вибрации  $A_{XYZ}$  описывается в виде суммы проекций мгновенных значений векторов по измерительным осям  $A_x, A_y$  и  $A_z$ . (рисунок 2):

$$A_{XYZ} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1)$$

Измерение вектора вибрации  $A_{XYZ}$  тремя датчиками вибрации производится по следующей технологии. Измерительные оси датчиков располагаются в направлении осей X, Y и Z. Датчики вибрации преобразуют механические колебания в электрический сигнал. Получаемые результаты измерения, воспринимаются как значения проекций векторов вибрации на соответствующие оси  $A_x, A_y$  и  $A_z$ . Затем эти значения суммируются по формуле (1). При этом не учитывается систематическая погрешность, связанная с особенностью диаграммы направленности дат-

чиков.

Ведущие фирмы производители виброизмерительной техники "Брюль и Кьер" (Дания), "Эндево" (США), "Вибро-Метер С.А." (Швейцария) и др. крайне редко приводят в своей технической документации диаграммы направленности. Приведенные в специализированной литературе диаграммы направленности датчиков вибрации имеют самые различные формы, от узконаправленных до близких к "круглым" (рисунок 3 и 4) [1].

Диаграмма направленности датчика вибрации строится в векторных координатах. Она отражает зависимость изменения коэффициента преобразования ( $K_{Pr}$ ) датчика при отклонении вектора вибрации от измерительной оси датчика. Диаграмма направленности измеряется на специальном приспособлении. Датчик подвергается вибрации и фиксируется изменение  $K_{Pr}$  при изменении угла вектора вибрации от измерительной оси датчика. Зависимость может иметь различный характер, и связана с особенностью конструкции чувствительного элемента датчика и особенностью его крепления на контролируемом объекте. Величина чувствительности датчика в направлении перпендикулярном его измерительной оси обычно регламентируется производителями в технической документации на датчики как боковая составляющая. Как правило, величина боковой составляющей не превышает 5...10%. Диаграмма направленности датчика в плоскости и в объеме показана на рисунке 5.

Измерение диаграмм направленности ряда датчиков показало, что они близки к "круглым" (таблица 1, рисунок 6). Максимальное отклонение от "круглой" диаграммы показал датчик "ДН-3-М1" – 12,1%.

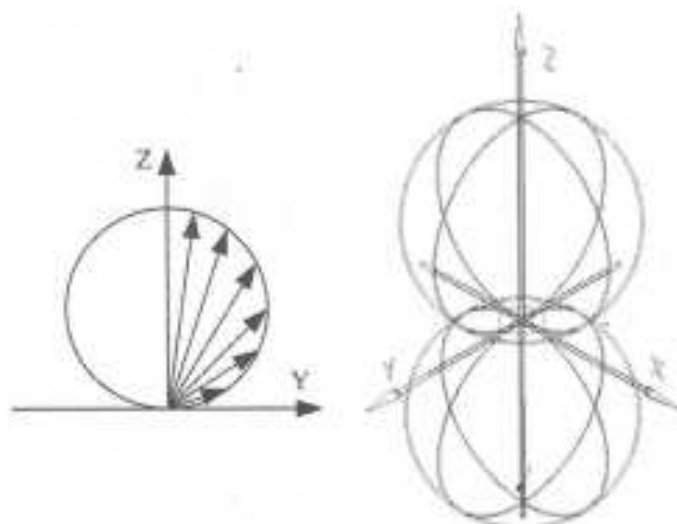


Рисунок 5 – "Круглая" диаграмма направленности датчика вибрации: сечение в плоскости XZ (слева) и изображение в объеме (справа)

Влияние диаграммы направленности датчика вибрации на результат измерения вектора вибрации при измерении тремя датчиками по трем взаимно перпендикулярным осям можно проиллюстрировать графически (рисунок 7). Например, для случая, когда  $A_T=0$  (вибрация в направлении одной оси отсутствует) суммирование производится в плоскости ZX. Результирующий вектор  $A_{ZX}$  является результатом суммирования векторов, полученных по измерительным осям Z и X.

Величина соответственно проекции вектора  $A_{ZX}$  на измерительные оси Z и X является следствием влияния угла наклона вектора вибрации к измерительной оси датчиков. Вектор  $A_{ZX}$  преобразуется в векторном виде на ось Z и X в виде соответственно  $A_Z$  и  $A_X$  и далее суммируется в как корень квадратный из суммы квадратов. При этом только "круглая" диаграмма направленности (имеющая форму круга) обеспечивает нулевую погрешность суммирования (рисунок 7). Отклонение от "круглой" диаграммы направленности датчика приводит к появлению погрешности суммирования. При измерении вектора вибрации по трем осям суммирование диаграмм направленности представлено на рисунке 7б.

Таким образом, если при измерении вектора вибрации не контролируется диаграмма направленности датчика вибрации, то измерение может сопровождаться значительной погрешностью. Расчет показывает, что для датчика "ДН-3-М1", имеющего 12,1 % отклонения от "круглой" диаграммы направленности, суммарная погрешность измерения вектора вибрации по трем измерительным осям может достигать до 21 %. Это для датчика вибрации, диаграмма направленности которого близка к "круглой". Для датчиков, имеющих узконаправленную диаграмму направленности, величина погрешности измерения может достигать значительной величины. Это ограничивает их применение при использовании в стационарных системах вибродиагностики и

Таблица 1 – Отклонения от "круглой" диаграммы направленности, %

Датчик	Угол наклона, град.								
	90	78,75	67,3	56,15	45	33,45	22,3	11,15	0
"Биморф"	0,5	-	-6,7	-	-4	-	-1,3	-	0,0
"ДН-3-М1"	5	12,1	-2,0	-8,1	-0,6	-2,3	-3,0	-2,3	0,0
"КД 41"	1,7	-0,4	1,5	-2,1	0,2	0,4	0,9	-1,0	0,0
"4367"	0,6	2,7	-0,1	-2,6	-3,5	-4,3	-2,0	-2,6	0,0

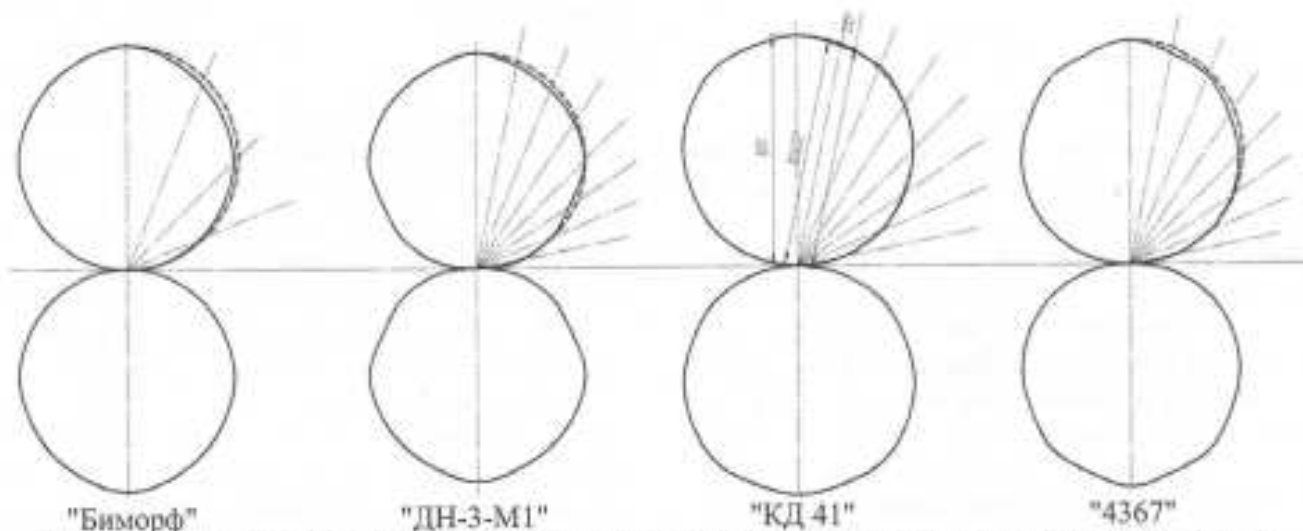


Рисунок 6 – Диаграммы направленности датчиков вибрации, полученные экспериментально

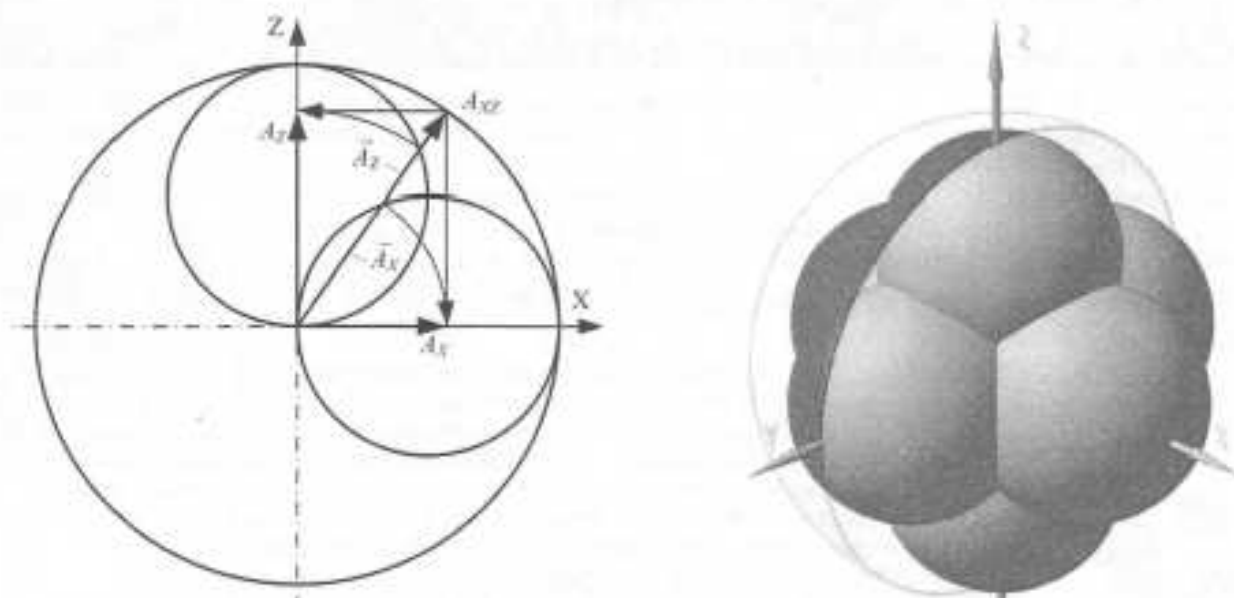


Рисунок 7 – Суммирование векторов  $A_x$  и  $A_z$  в плоскости ZX (зависимости даны для положительной части диаграмм) (слева) и суммирование диаграмм направленности в объеме XYZ (справа)

виброконтроля с измерением вектора вибрации по трем измерительным осям.

Из анализа полученных результатов следует, что величину отклонения от "круглой" диаграммы направленности необходимо контролировать на стадии изготовления датчика вибрации и регламентировать в его технической документации.

#### Выводы

1. Для обеспечения нулевой погрешности суммирования при измерении вектора вибрации тремя взаимно перпендикулярными акселерометрами они должны иметь "круглую" диаграмму направленности.

2. Отклонение от "круглой" диаграммы направленности акселерометра является система-

тической погрешностью измерения. При измерении вектора вибрации тремя взаимно перпендикулярными датчиками погрешность суммирования может для отдельных типов датчиков достигать до 21 %.

3. Величина отклонения от "круглой" диаграммы направленности является одной из определяющих характеристик при расчете погрешности измерения и должна приводиться производителями акселерометров в документации на изделие наряду с другими его характеристиками.

1. *Пьезоэлектрические преобразователи* / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко и др. Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: ЧГТОУ, 2004. – 435 с.

Статья поступила 24.06.2008 г.  
© Ю.Г. Задорожный, 2008

Редакция научно-технического и производственного журнала

### "ВИБРАЦИЯ МАШИН: ИЗМЕРЕНИЕ, СНИЖЕНИЕ, ЗАЩИТА"

приглашает к активному диалогу на страницах журнала авторов статей и специалистов, пишущих о современных проблемах использования вибраций в технике, борьбы с вибрацией и идентификации процессов протекающих в оборудовании и конструкциях по параметрам вибрации, разработки методов и средств измерения и анализа параметров вибрации



Телефон: +38 (062) 348-50-56  
Эл. почта: as@méch.dgtu.donetsk.ua, a.sotnikov@prostoev.net  
Интернет: vibro.donntu.edu.ua