

# Акселерометр-сейсмодатчик СД-1Э и его особенности

В. Зинченко<sup>1</sup>, Н. Каширин<sup>1</sup>, В. Шелехов<sup>1</sup>, А. Дайнеко<sup>1</sup>, А. Мыльников<sup>1</sup>

УДК 531.768 | ВАК 05.27.00

В АО «НИИ «Элпа» разработан трехкоординатный акселерометр-сейсмодатчик СД-1Э с чувствительным элементом на основе пьезокерамики. Устройство, утвержденное как тип средств измерений, функционирует в диапазоне частот от 0,1 до 40 Гц, точность измерений составляет  $\pm 5\%$ , допускает однополярное (бортовое) питание в диапазоне 7–24 В. По желанию заказчика есть возможность несложной доработки для изменения характеристик.

**А**кселерометры-измерители ускорений, работающие на основе прямого пьезоэффекта [1], нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1–3], в частности:

- в качестве первичных преобразователей в сейсмо- и виброизмерительных системах и комплексах;
- системах мониторинга зданий, метро и др.;
- системах охраны периметров, окружающих объекты, от несанкционированного проникновения (АЭС, теплотрассы, газопроводы, ЛЭП и др.);
- навигационных системах позиционирования (необитаемые подводные аппараты, беспилотные летательные объекты и др.).

Акселерометры-измерители ускорений отличаются разнообразием конструкций в зависимости от их назначения – сейсмодатчики, вибродатчики, датчики удара и др. Основным принцип работы устройств – преобразование механического воздействия (или ускорения) в электрический сигнал.

В АО «НИИ «Элпа» разработан и запущен в производство акселерометр-сейсмодатчик СД-1Э, размещенный в корпусе из алюминиевого сплава (рис. 1), его характеристики приведены в табл. 1. По желанию заказчика большую часть характеристик можно изменить.

Остановимся на конструкции СД-1Э подробнее. Основа датчика – чувствительный элемент (ЧЭ), в котором механическое воздействие преобразуется в электрический сигнал, удобный для обработки и анализа. В нашем случае таковым является ЧЭ, в конструкции которого предусмотрена поляризованная пьезокерамика ЦТС-19. Наиболее широкое распространение получили два основных вида конструкции таких ЧЭ:

- **осевая конструкция** [3] (она же компрессионная [1]) на основе пьезокерамического элемента (п/э), работающего по принципу деформации

растяжение-сжатие. Такие ЧЭ отличаются высокой механической прочностью, как правило, избыточной для сейсмодатчиков, но малой чувствительностью к воздействию на ЧЭ ускорению;

- **изгибная конструкция** на основе биморфного п/э, работающего по принципу деформации изгиба [1, 3]. Наибольшее распространение получили два типа таких п/э – дисковый и стержневой (балочный), каждый может быть собран из двух обычных п/э путем их склеивания и электрического соединения электродов параллельно или последовательно [1, 3]. Изгибные ЧЭ от осевых отличаются более высокой чувствительностью к механическому воздействию и существенно меньшей механической прочностью (как правило, достаточной для сейсмодатчиков).

Следует отметить, что биморфные п/э обладают свойством существенно (по данным экспериментальных



Рис. 1. Акселерометр СД-1Э

<sup>1</sup> АО «НИИ «Элпа», г. Зеленоград, ddd@elpapiezo.ru.

Таблица 1. Основные технические характеристики

Характеристики	Значение
Число измерительных осей каналов	3
Диапазон рабочих частот, Гц	От 0,1 до 40
Номинальное значение коэффициента преобразования на частоте 20 Гц, В/g	10
Допускаемое отклонение коэффициента преобразования, В/g	±2,0
Относительная погрешность измерений виброускорения, %	±5
Напряжение питания однополярное, В	7–24
Ток потребления, мА, не более	50
Масса, г, не более	350
Габаритные размеры, мм, не более	80 × 75 × 52

исследований, на порядок и более) снижать влияние паразитного пирозффекта на результат измерения [4]. Было принято решение использовать в конструкции ЧЭ биморфные пьезокерамические элементы.

Кроме того, в ходе анализа и экспериментальных исследований было установлено, что при прочих равных условиях балочная конструкция биморфа отличается существенно меньшими габаритами по сравнению с дисковой, большими перспективами их миниатюризации и более проста в изготовлении. Это нашло отражение в дальнейших разработках с использованием в ЧЭ пьезокерамических элементов, изготовленных по технологии литья пьезокерамической пленки [4].

В то же время, помимо ряда положительных свойств (некоторые из них описаны выше), существуют недостатки, присущие прежде всего биморфам. Одним из недостатков является неуправляемое создание «паразитных ребер жесткости» в процессе изготовления.

Например, в ходе поляризации п/э, выполнения других технологических операций возникает изгиб плоскости, который превращает его форму в «своок» или мост, укрепленный ребрами жесткости, не позволяющими прогибаться. Такое неуправляемое и неучтенное «упрочнение» биморфа, а с ним и ЧЭ, приводит к неуправляемому уменьшению его деформации



**Рис. 2.** Серийно выпускаемые чувствительные элементы

в ходе работы и, как следствие, снижению уровня чувствительности. На практике этот эффект, как показали экспериментальные исследования, может снизить коэффициент преобразования на 10% и более. Это один из основных эффектов, приводящих к технологическому разбросу ряда параметров ЧЭ.

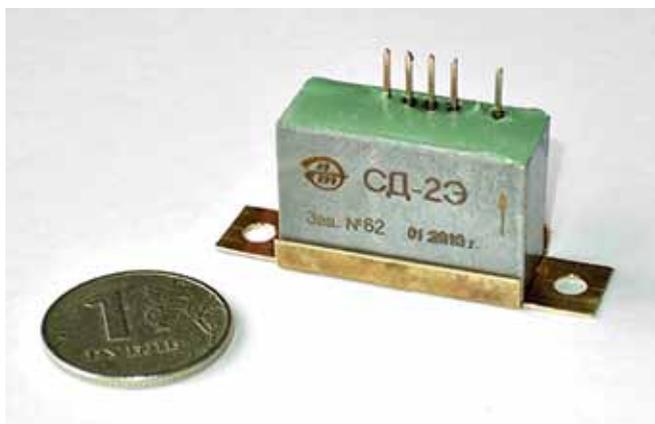
Такой эффект обусловлен деформацией ЧЭ при его «зажатии» в приспособлении на этапе измерения параметров, что и приводит к метрологическому разбросу. Измерительная оснастка была доработана, и метрологический разброс параметров ЧЭ, вызванный описанным эффектом, был уменьшен до величины в пределах погрешности измерений.

По результатам анализа принято решение использовать для сейсмодатчиков ЧЭ на основе балочных биморфов параллельного типа, выполненных в виде консоли.

Такие ЧЭ выпускаются в АО «НИИ «Элпа» и как самостоятельные изделия (рис. 2) [5].

Для сейсмодатчика, как и большинства других датчиков, помимо ЧЭ, характерен ряд дополнительных устройств и приспособлений, повышающих надежность конструкции и упрощающих процессы считывания и анализа информации с выхода ЧЭ. В нашем случае к ним относятся электронные блоки обработки сигналов (например, усилители, фильтры и т. д.), элементы крепежа и механической защиты от внешних воздействий (например, электрические разъемы, металлический герметичный корпус и т. д.).

Рассмотрим это более детально на примере канала, соответствующего одной из осей координат. Следует заметить, что введение понятия об осях координат для сейсмодатчика условно. Привязка его к системе координат осуществляется только в зависимости от принятой системы координат на объекте, на котором устанавливается сейсмодатчик. Учитывая техническую целесообразность, размещают его вертикально, горизонтально, слева, справа и т. д. Важно знать



**Рис. 3.** Акселерометр СД-2Э

направление осей максимальной чувствительности, условно обозначаемых XYZ (указывается на самом датчике), образующих прямоугольную систему координат, и их соответствие координатам выходного разъема. После установки сейсмодатчика на объекте эти оси могут быть приведены в соответствие с системой координат, принятой у потребителя.

Поскольку сигнал, несущий информацию, на выходе ЧЭ, как правило, небольшой, его следует усилить. Выходное (емкостное) сопротивление ЧЭ весьма велико и зависит от частоты, поэтому его необходимо согласовать с последующими электрическими цепями. Такие задачи решает низкочастотный малошумящий предварительный усилитель с большим входным и малым выходным сопротивлениями, собранный на печатной плате. Первое звено полосового фильтра образовано входными цепями усилителя и выходными цепями ЧЭ. В целом значение шума на входе усилителя достигало величин порядка  $10^{-5}g$ . Дальнейшая обработка сигнала осуществлялась в блоках выходного усилителя, коэффициент усиления которого, как и коэффициент усиления предварительного усилителя, устанавливался исходя из заданного коэффициента преобразования. Параметры выходного усилителя позволяют использовать в качестве нагрузки как обычный провод, так и витую пару. Выходной усилитель совместно с предварительным формирует заданную полосу рабочих частот. Минимальный наблюдаемый сигнал при использовании АЦП и ЭВМ мог достигать  $10^{-6}g$  и менее.

Как показала практика, основное требование заказчиков к вариантам внешнего питания электронных блоков сейсмодатчика – однополярное бортовое питание диапазона 6–24 В (выходной сигнал при этом должен быть двухполярным). Задача была решена путем создания вторичного двухполярного источника питания,

обеспечивающего на выходе стабилизированное напряжение  $\pm 5$  В при подаче на вход от однополярного бортового источника питания в пределах 6–24 В.

Оптимальная технология изготовления СД-1Э – комбинирование трех заготовок – практически полностью собранных однокоординатных датчиков СД-2Э, в конструкции которых решены основные задачи с использованием не только описанных, но и других технических решений. Однокоординатный сейсмодатчик СД-2Э (рис. 3), который выпускается АО «НИИ «Элпа» как самостоятельное изделие [6], разработанное в качестве составной части СД-1Э, представляет собой заготовку-конструкцию однокоординатного датчика с гибкими выводами (вместо жестких, выполненных на основе разъема PLS-2,54). Эти закрепленные внутри общего корпуса заготовки образуют осями чувствительности прямоугольную систему координат, а их гибкие выводы соединены с выходным разъемом РСГ 10АТВ. Подобный «блочный» подход к выбору конструкции СД-1Э оказался весьма эффективным с точки зрения повышения надежности и дальнейшего уменьшения его габаритов. Кроме того, отдельный блок-заготовка СД-2Э при несложной доработке представляет собой отдельное, самостоятельное изделие, получившее распространение.

Сейсмодатчик СД-1Э утвержден как тип средств измерений RU.С.28.409.А № 65377.

В ходе работы наряду с патентом РФ № 2621467 [4] были использованы патенты РФ АО «НИИ «Элпа» на другие технические решения: № 104779, № 127251, № 2540940, № 2553750, № 88476 (опубликовано ФИПС, реестр изобретений РФ) и др.

В настоящее время продолжается работа по совершенствованию СД-1Э, в частности, дополняется его конструкция цифровым выходом, для уменьшения габаритов используется технология литья пьезокерамической пленки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Янич В. В.** Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). – Р. на /Д.: Изд. ЮФУ, 2010. С. 24–304.
2. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в 3-х т. Т. 2. – М.: МПРЖ, 1999. 688 с.
3. Пьезоэлектрическая керамика, принципы и применение. – Мн.: ФУ-Аниформ, 2003. С. 33–112.
4. **Зинченко В. Н. и др.** Малогабаритный датчик удара. Патент РФ № 2621467. Бюл. изобретений. 2017. № 16.
5. [https://www.elapiezo.ru/sensor\\_element.html](https://www.elapiezo.ru/sensor_element.html).
6. <https://www.elapiezo.ru/seismo.html>.