

# МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРЫ КОМПАНИИ COLIBRYS – ПРОРЫВ В ОБЛАСТЬ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Д.Балман<sup>1</sup>, Ю.Пономарёв<sup>2</sup>, К.Т.Н.

УДК 681.586  
ВАК 05.27.00

Компании энергетического сектора по всему миру все чаще применяют датчики на основе МЭМС-технологий (акселерометры, инклинометры, датчики давления) вместо традиционных для этого сегмента кварцевых и пьезоэлектрических устройств. МЭМС-датчики имеют ряд преимуществ: более высокая стойкость к ударам и вибрации, меньшее энергопотребление, большее среднее время наработки на отказ и меньшая цена – все это без потери точностных характеристик. Благодаря последним достижениям в области микромеханики у МЭМС-датчиков появилось еще одно преимущество – возможность функционировать при температурах до 175°C. О высокотемпературных МЭМС-датчиках компании Colibrys (Швейцария) рассказывается в статье.

**К**омпания Colibrys на протяжении последних десяти лет занимает лидирующие позиции в области разработки и производства инерциальных МЭМС-датчиков, в основном для авиационной отрасли и промышленного сектора. Пока большинство компаний – производителей МЭМС-датчиков – были сосредоточены на создании дешевых решений низкой точности для автомобильной промышленности, смартфонов и других потребительских устройств, компания Colibrys сделала ставку на разработку высокоточных и высоконадежных МЭМС-датчиков средней стоимости для жестких условий эксплуатации.

Недавно компания стала первопроходцем в области высокотемпературных МЭМС-решений. Это открывает новые горизонты для МЭМС-датчиков (рис.1) и позволяет

предложить запатентованный высокотемпературный МЭМС-акселерометр российским компаниям энергетического сектора, занятым разработкой и изготовлением инструментов для измерения в процессе бурения (Measurement While Drilling, MWD), каротажа, каротажа во время бурения (Logging While Drilling, LWD) (рис.2) и геофизическими исследованиями.

Рассмотрим МЭМС-акселерометр TS1000T, предназначенный для измерений во время бурения. Это высокоточный датчик угла наклона, способный работать при температурах до 175°C и выдерживать высокий уровень ударов и вибраций, возникающих в процессе бурения.

МЭМС-акселерометры компании Colibrys состоят из чувствительного элемента и миниатюрной интегральной схемы, установленных в герметичном керамическом корпусе. Они измеряют ускорения посредством преобразования малейших изменений емкостей в датчике угла, возникающих вследствие отклонения подвижной массы от нейтрального положения, в высокоточный аналоговый выходной сигнал (рис.3).

<sup>1</sup> Компания Colibrys, директор по развитию линейки продукции, david.balmain@colibrys.com.

<sup>2</sup> Компания "Радиант-Элком", руководитель отдела датчиков, ponomarev@ranet.ru.



Рис.1. Морская буровая платформа

Каковы ключевые особенности этих акселерометров, применение которых позволяет получать точные результаты при высокой температуре?

1. Использование емкостной технологии и чувствительного элемента, целиком состоящего из монокристаллического кремния, обеспечивает отличную долговременную стабильность во всем диапазоне температур. Чувствительный элемент имеет структуру типа "сэндвич"; подвижная масса на упругой перемычке, расположенная между ответными частями, образует дифференциальный емкостный датчик угла. Такая конструкция отличается лучшим соотношением сигнал-шум по сравнению с другими вариантами конструкции МЭМС-акселерометров. Кроме того, при изготовлении чувствительного элемента используется запатентованная технология соединения слоев кремния, которая обеспечивает высокий уровень герметичности (рис.4).

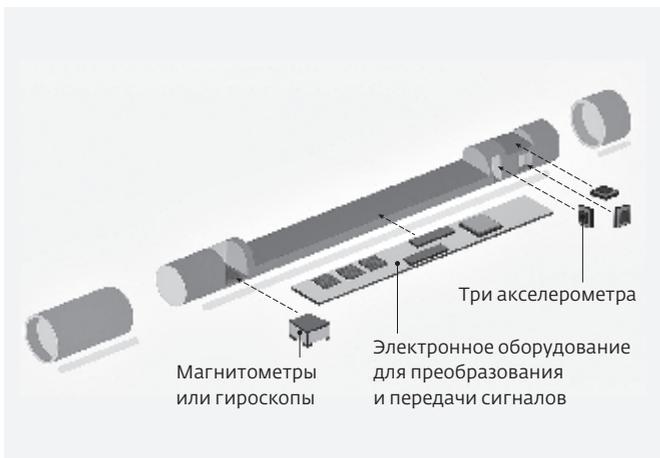


Рис.2. Классическая компоновка системы ориентации внутрискважинной системы

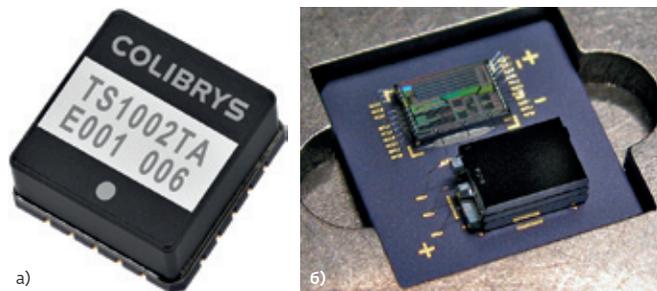


Рис.3. МЭМС-акселерометр серии TS1000T: а) в собранном виде, б) без верхней крышки, с чувствительным элементом и электроникой, прикрепленными к керамической подложке

Выбор такой технологии для создания чувствительного элемента, рассчитанного на работу при высоких температурах, обусловлен двумя факторами:

- обеспечением исключительной стабильности паразитных емкостей, что достигается за счет релаксации напряжений при высокой температуре и отсутствия каких-либо материалов в местах спая слоев, кроме кремния и его оксида, и низкого уровня влажности благодаря запатентованной технологии соединения пластин;
- использованием жидкостного анизотропного травления при создании чувствительного элемента – надежной и отлаженной технологии, которая придает конструкции высокую стойкость к ударам и малую перекрестную чувствительность.

Чувствительный элемент "настраивается" под конкретные нужды с целью улучшения, например, таких параметров, как нелинейность четного порядка, полоса пропускания или броуновский шум, путем изменения коэффициента газового демпфирования. Для измерений

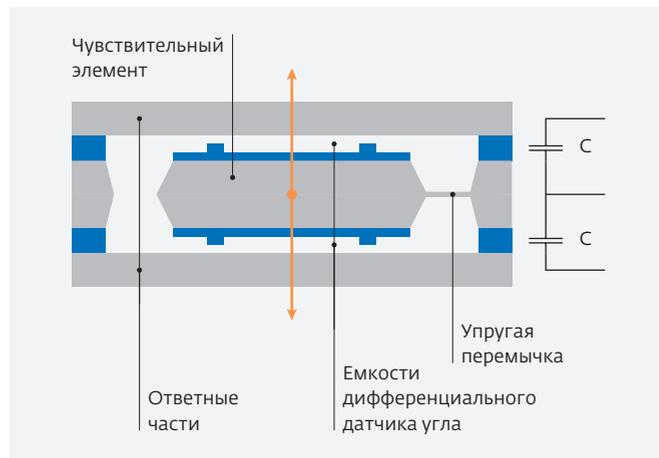


Рис.4. Конструкция чувствительного элемента МЭМС-акселерометра

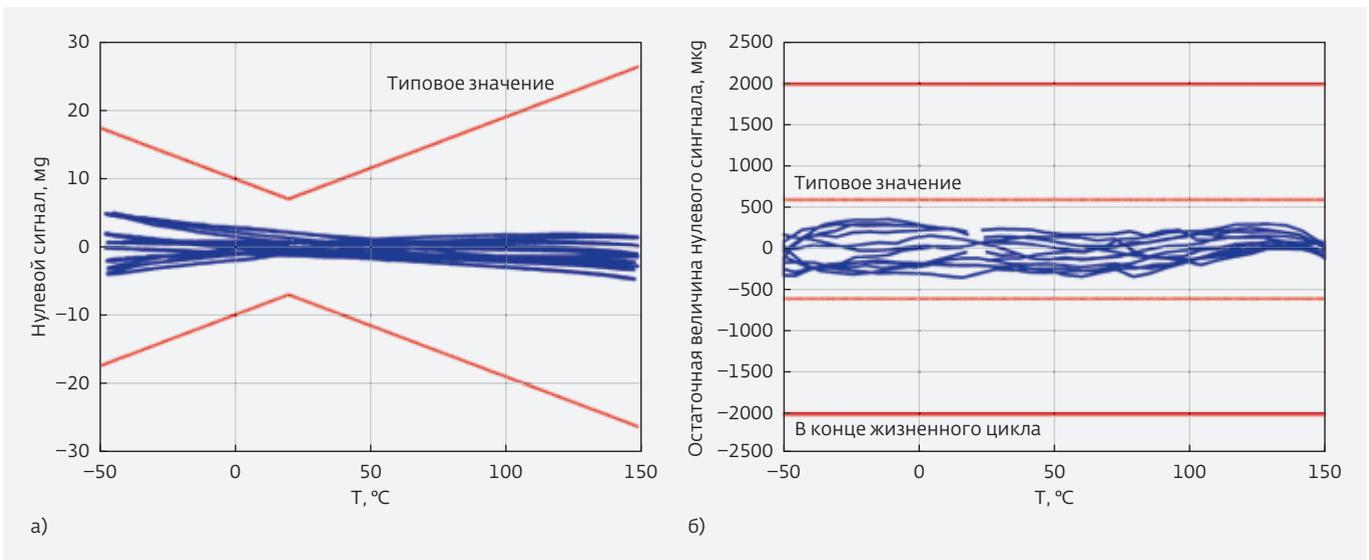


Рис.5. Зависимость нулевого сигнала от температуры: а) без компенсации, б) с алгоритмической компенсацией

во время бурения критична нелинейность четного порядка, которая должна быть минимальна, так как является причиной смещения нуля (описываемого коэффициентом вибрационной ошибки) в условиях высокого уровня вибраций. Для уменьшения этой нелинейности необходимо, чтобы реальное поведение механической системы было максимально приближено к математической модели грузика на пружинке с демпфером. Однако из-за малых зазоров между подвижным маятником и неподвижными ответными частями сила демпфирования нелинейно зависит от скорости. Для уменьшения этого эффекта принимаются дополнительные меры по отводу газа из зазоров.

2. Новая патентованная высокотемпературная технология приклеивания чувствительного элемента к керамической подложке позволяет максимально уменьшить механические напряжения в нем при деформациях керамического основания.

3. Герметичный керамический корпус LLC20 обеспечивает надежную защиту компонентов прибора от внешних воздействий и уменьшение зависимости характеристик от температуры.

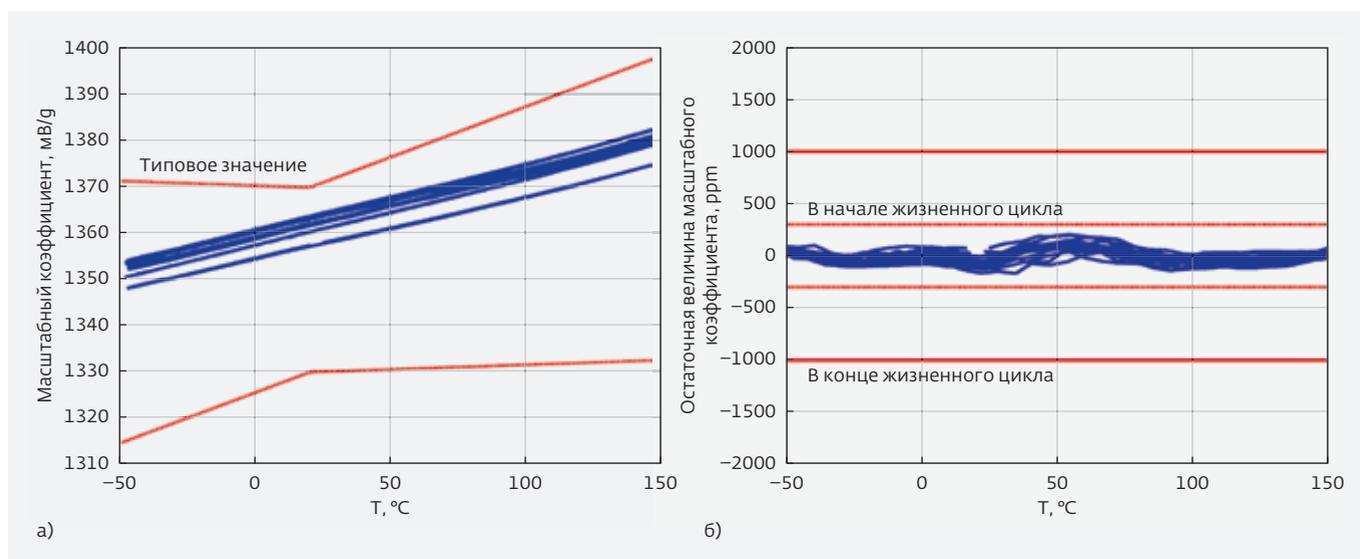
4. Специализированная интегральная схема обеспечивает высокую точность прибора на всем диапазоне температур, вплоть до 175°C. Электроника включает

три функциональных блока обработки сигнала: дифференциальную схему преобразования заряда датчика угла в напряжение, программируемый усилитель и низкочастотный фильтр, устраняющий высокочастотные помехи в выходном сигнале. Использование дифференциального выхода позволяет устранить синфазные помехи выходного сигнала и увеличить его крутизну вдвое. Кроме того, новая электроника предусматривает функции индикации при ускорениях выше диапазона измерений, восстановления после ударов и само тестирования как механического, так и электрического

Основные характеристики акселерометра TS1002T с диапазоном ±2g

Параметр	Значение (тип.)
Диапазон измерений, g	2
Шум, мкг/√Гц	7
Остаточная величина нулевого сигнала после термокомпенсации (СКЗ), мкг	300
Долговременная стабильность нулевого сигнала*, мкг	1 800
Остаточная величина масштабного коэффициента после термокомпенсации (СКЗ), ppm	300
Несоосность, мрад	< 1
Нелинейность, % от полного диапазона	0,3

\* Долговременная стабильность представляет собой остаточную ошибку, полученную после ряда внешних воздействий: тест на живучесть при включенном питании в течение 500 ч при 150°C, 60-кратное термоциклирование в диапазоне от -40°C до 150°C, случайная вибрация при 150°C (20g СКЗ / 10–2000 Гц), удары при 150°C (100g / 2 мс / 12 тыс. ударов).



**Рис.6.** Зависимость масштабного коэффициента от температуры: а) без компенсации, б) с алгоритмической компенсацией

модуля посредством приложения электростатической силы к маятнику.

Несмотря на все нововведения в акселерометрах серии TS1000T, при их производстве применяется большая доля технологий, используемых в компании для

производства серийных линеек акселерометров, что позволяет снизить стоимость конечной продукции.

Рассмотрим некоторые ключевые характеристики, которые удалось улучшить в новых МЭМС-акселерометрах серии TS1000T.

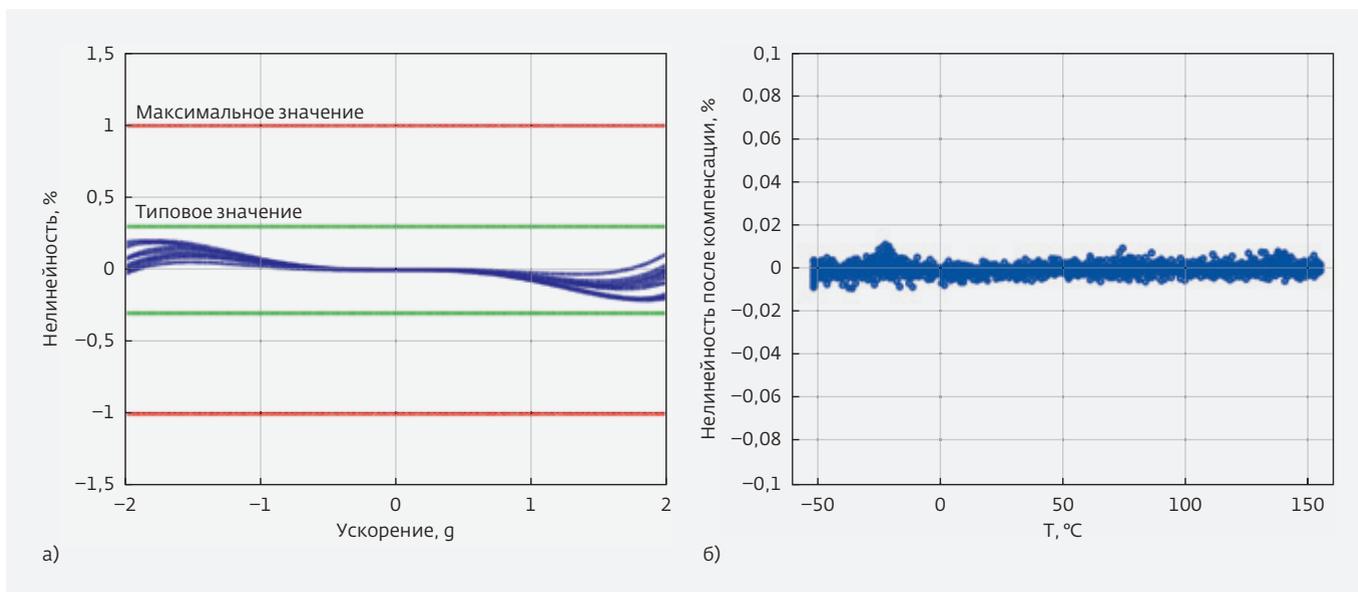


Рис.7. Графики нелинейности: а) в диапазоне  $\pm 2g$ , б) с алгоритмической компенсацией

В линейку входят акселерометры с тремя диапазонами измерений:  $\pm 2g$ ,  $\pm 5g$ ,  $\pm 10g$ . Ниже речь пойдет об акселерометре с диапазоном  $\pm 2g$  (см. таблицу). Величина температурного коэффициента изменения нулевого сигнала в таком акселерометре составляет менее  $100 \text{ мкг}/^\circ\text{C}$ , а остаточная величина нулевого сигнала после простейшей алгоритмической компенсации полиномом третьей степени не выходит за пределы  $\pm 600 \text{ мкг}$  (или  $300 \text{ ppm}$  от диапазона измерения) в диапазоне температур от  $-40$  до  $150^\circ\text{C}$  (рис.5).

Температурный коэффициент изменения масштабного коэффициента для того же акселерометра составляет менее  $120 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , а после алгоритмической компенсации полиномом третьей степени масштабный коэффициент меняется не более чем на  $300 \text{ ppm}$  в диапазоне температур от  $-40$  до  $150^\circ\text{C}$  (рис.6).

Типовое значение нелинейности составляет  $\pm 0,3\%$ , а после компенсации –  $0,02\%$ , если рассматривать наиболее используемый диапазон  $\pm 1g$  (рис.7).

Необходимо также отметить, что акселерометры серии TS1000T проходят испытания на удары величиной  $1500g$  и продолжительностью  $0,2 \text{ мс}$  ( $500$  ударов), при этом их характеристики не ухудшаются.

Таким образом, Colibrys предлагает компаниям, занимающимся разработкой оборудования для измерений во время бурения, каротажа и каротажа во время бурения, новые высокотемпературные МЭМС-акселерометры, которые могут быть использованы как альтернатива кварцевым или в качестве резервной триады акселерометров. Серия TS1000T знаменует собой прорыв в области высокотемпературных акселерометров, предназначенных для

применения в условиях бурения. Они обладают высокой надежностью и прочностью, повышенной стойкостью к ударам и вибрации, долговременной стабильностью нулевого сигнала во всем диапазоне рабочих температур вплоть до  $175^\circ\text{C}$ , а также малыми нелинейностью и уровнем шума.

Ввиду большей стойкости МЭМС-акселерометров серии TS1000T к ударам и вибрации по сравнению с кварцевыми акселерометрами, а соответственно и более высокой надежности, их использование во время бурения в качестве основной или резервной системы существенно повышает надежность системы ориентации в целом. Это, в свою очередь, позволяет снизить риски появления задержек при бурении в случае выхода из строя кварцевых акселерометров и уменьшить дополнительные затраты.

Акселерометры TS1000T соответствуют высоким требованиям, предъявляемым к оборудованию для нефтегазовой отрасли, в том числе по работе при температуре до  $175^\circ\text{C}$ , что необходимо для бурения на глубинах до  $6 \text{ км}$ . Это касается как высокоточного оборудования для измерений во время бурения (точность измерения угла у акселерометра с диапазоном  $\pm 2g$  составляет  $\pm 0,1^\circ$ ), так и менее требовательного оборудования для каротажа и геофизических исследований.

Выпуск нового высокотемпературного акселерометра TS1000T демонстрирует приверженность компании Colibrys к постоянному развитию линейки высокоточных датчиков, которые предназначены для применения там, где требуется обеспечить высокую надежность в жестких условиях эксплуатации. ●