

# ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ MEMS-ТЕХНОЛОГИИ

## ЧАСТЬ 1. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ СРЕДНЕЙ ТОЧНОСТИ

А.Тузов sensor@ranet.ru

Активно развивающиеся технологии микроэлектромеханических систем (MEMS) сделали доступными для применения в недорогих массовых устройствах датчики и системы измерения параметров, которые ранее использовались лишь в дорогой авиационной, космической и военной технике. Особенно это относится к датчикам для измерения параметров движения – инерциальным датчикам (гироскопам, акселерометрам), датчикам вибрации, давления, наклона и т.д. Рассмотрим датчики и инерциальные измерительные модули, уже доступные российским разработчикам. Причем основное внимание уделим моделям с высокими точностными характеристиками и хорошей стабильностью показаний.

**М**ы не рассматриваем дешевые модели гироскопов и акселерометров производства таких компаний, как Analog Devices и ST Microelectronics и аналогичные им, ориентированные в первую очередь на массовый рынок бытовых устройств, таких как игровые приставки, персональные навигаторы, мобильные телефоны и т. д. Многие отечественные разработчики хорошо знакомы с этой продукцией и успели убедиться, что основное преимущество этих продуктов – низкая цена (при больших объемах закупок), при этом точностные характеристики приборов довольно скромные, чего собственно и достаточно для бытовых приложений.

Для более ответственных приложений, в которых не требуются точности лазерных или волоконно-оптических гироскопов, интересны модели следующих производителей:

- Silicon Sensing Systems (Англия) – одноосевые гироскопы и трехосевые инерциальные измерительные модули;
- Sensoror Technologies AS (Норвегия) – одноосевые гироскопы;
- Colibrus (Швейцария) – одноосевые акселерометры;

- Silicon Designs (США) – одноосевые и трехосевые акселерометры.

### Продукция Silicon Sensing Systems

Гироскопы компании Silicon Sensing в качестве чувствительного элемента используют вибрирующее кремниевое кольцо. Одноосевой гироскоп CRG20 выполнен в виде микросхемы в корпусе LCC с 36 выводами (рис.1). Гироскоп имеет как аналоговый (рatiометрический), так и цифровой (SPI) выходы для измеренной угловой скорости и выпускается в модификациях с различными пределами измерения угловой скорости (табл.1).

Для удобства и ускорения разработки датчик CRG20 поставляется небольшими партиями, уже смонтированным на миниатюрную плату со всеми

Таблица 1. Пределы измерения и ширина полосы пропускания модификаций CRG20.

|          | Предел измерения (аналоговый выход), %/с | Ширина полосы пропускания, Гц | Предел измерения (цифровой выход), %/с |
|----------|--|-------------------------------|--|
| CRG20-01 | ±75                                      | >40                           | 300                                    |
| CRG20-02 | ±300                                     | >75                           | 300                                    |
| CRG20-22 | ±300                                     | >100                          | 300                                    |



Рис.1. Гироскоп CRG20P

необходимыми элементами «обвязки» (емкостями и резисторами) и миниатюрными разъемами (рис.2).

Основные характеристики CRG20 приведены в табл.2. Цифровой выходной сигнал датчика

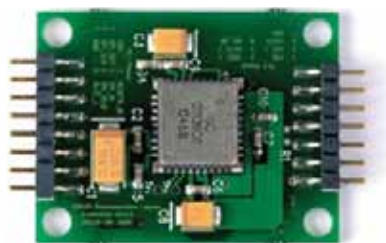


Рис.2. CRG20 на мини-плате

Таблица 2. Основные технические характеристики датчика угловой скорости CRG20

| Линейность шкалы                                   |           |
|--|-----------|
| Установочный допуск (25°C), %                      | < ±0,5    |
| Изменение в пределах температурного диапазона, %   | < ±1,2    |
| Нелинейность, %                                    | < ±0,1    |
| Смещение   |           |
| Установочный допуск, %                             | < ±0,5    |
| Изменение в пределах температурного диапазона, °/с | < ±0,2    |
| Случайный угловой уход, °/ч <sup>1/2</sup>         | 0,3       |
| Нестабильность, °/ч                                | 4,7       |
| Рабочая температура, °С                            | -40...105 |
| Линейное ускорение, g                              | < 100     |
| Удар, g  | 95        |
| Вибрация, g  | 9         |
| Межосевая чувствительность, %                      | < ±2      |
| Напряжение питания, В                              | 4,75–5,25 |
| Ток потребления, мА                                | 60        |
| Время запуска, с                                   | < 0,4     |

**Таблица 3.** Основные технические характеристики модуля DMU02

|  |                        |
|--|------------------------|
| Напряжение питания, В                                | 5                      |
| Диапазон рабочих температур, °С                      | -40...+85              |
| Время запуска, с                                     | < 1                    |
| <b>Измерение угловой скорости</b>                    |                        |
| Предел измерения, °/с                                | ±300 (0,03125 °/с/бит) |
| Ошибка разрешения во всем температурном диапазоне    | < ±1,5                 |
| Температурная вариация bias, °/с                     | < ±0,5                 |
| Нестабильность bias (распределение Аллана), °/ч      | < 10                   |
| Случайный угловой уход, °/ч <sup>1/2</sup>           | < 0,5                  |
| Полоса пропускания (-3 дБ), Гц                       | > 45                   |
| <b>Измерение линейного ускорения</b>                 |                        |
| Предел измерения линейного ускорения, g              | ±6 (3,66 мг/бит)       |
| Ошибка разрешения во всем температурном диапазоне, % | < 2                    |
| Линейность шкалы, %                                  | 0,10                   |
| Ошибка bias во всем температурном диапазоне, мг/°С   | < 2,0                  |
| Полоса пропускания (-3 дБ), Гц                       | > 350                  |

имеет 14 разрядов и, соответственно точность младшего бита равна 0,03125 °/с.

Еще один интересный и эффективный по стоимости прибор этой компании – шестикомпонент-

**Рис.3.** Инерциальный измерительный модуль DMU02

ный инерциальный измерительный модуль DMU02 (рис.3). В его компактном корпусе (25×25×25 мм) содержатся три датчика угловой скорости и три акселерометра, позволяющие измерять все составляющие инерциального движения по трем взаимно ортогональным осям. Легкий пластиковый корпус прибора оснащен крепежными отверстиями под винты и направляющими. Интерфейс прибора - SPI. При таких малых размерах модуль DMU02 обладает неплохими характеристиками (табл.3), что уже привлекло к нему внимание ряда российских разработчиков.

В середине 2010 года компания Silicon Sensing Systems начала производство новой модели гироскопов, ориентированных на массовый рынок, предлагая, с одной стороны, не-

**Таблица 4.** Основные технические характеристики CRM100 и CRM200

|  |   |
|--|---|
| Напряжение питания, В  | 2,7–3,6   |
| Потребляемый ток, мА   | 5   |
| Изменение масштабного коэффициента во всем диапазоне температур, % | < 3   |
| Нестабильность bias, °/ч   | < 40  |
| Максимальная ширина полосы, Гц                                     | 150   |
| Спектральная плотность шума, °/с/Гц <sup>1/2</sup>                 | 0,025   |
| Случайный угловой уход, °/ч <sup>1/2</sup>                         | 0,28  |
| Рабочая температура, °С  | -40...85 (до 105 при ограниченной работоспособности)  |
| Удар   | 3500 g 500 мкс – выключенный<br>500 g 1 мс (1 полуволна)<br>– включенный<br>100 g 6 мс – включенный |
| Вибрация   | 3,5g, от 10 Гц до 5 кГц   |
| Время запуска, с   | 0,5   |
| Масса, г   | 0,08 (CRM100)<br>0,12 (CRM200)  |

дорогое устройство, а с другой, – достаточно стабильный в реальных условиях эксплуатации гироскоп.

Этот прибор PinPoint производится в двух модификациях – CRM100 и CRM200 – с абсолютно одинаковыми характеристиками (табл.4), но разными способами монтажа на печатную плату (рис.4). Корпус модели CRM100 предназначен для пайки параллельно плоскости печатной платы, а модель CRM200 паяется перпендикулярно плоскости платы. Это сделано для того, чтобы комбинируя гироскопы CRM100 и CRM200 на одной печатной плате, можно было разрабатывать двух- и трехосевые гироскопические измерительные модули с очень малыми габаритами. У гироскопов PinPoint можно использовать либо аналоговый выход, либо цифровой (задается программно). Также сам пользователь может устанавливать предел измерения угло-

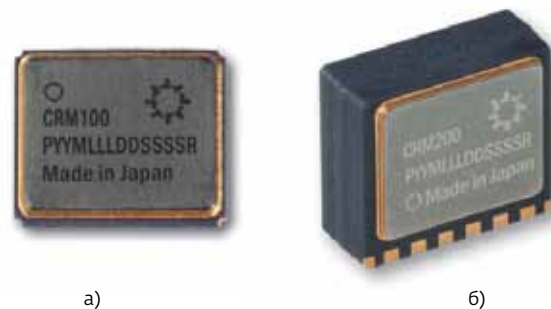
**Рис.4.** Гироскоп PinPoint: а – модификация CRM100, б – модификация CRM200

Таблица 5. Основные технические характеристики SAR100 и SAR150

|  | SAR100 | SAR150          |
|--|--------|-----------------|
| Масса, г   |        | 1,5             |
| Предел измерения, %/с                                |        | ± 400, 250, 100 |
| Рабочая температура, °С                              |        | -40...+90       |
| Напряжение питания                                   |        | 4,45–5,5        |
| Потребляемый ток, мА                                 |        | 17              |
| Время запуска, мс                                    |        | 90              |
| Максимальная скорость опроса, выборки/с              |        | 2000            |
| Максимальное превышение угловой скорости, %/с        |        | 5000            |
| Максимальный удар, g                                 |        | 5000            |
| Цена младшего бита, %/с                              |        |                 |
| 400 %/с  |        | 0,25            |
| 250 %/с  |        | 0,25            |
| 100 %/с  |        | 0,10            |
| Температурное отклонение масштабного коэффициента, % |        | ±0,5            |
| Температурное отклонение bias, %                     |        | ±0,5            |
| Ширина полосы пропускания, Гц                        |        | 50              |
| Временная стабильность bias, %/с                     | 0,02 с | 0,01            |
| Чувствительность к линейному ускорению, %/с/g        | 0,03   | 0,01            |
| Плотность шума, %/Гц <sup>1/2</sup>                  |        |                 |
| 400 %/с  | 0,03   | -               |
| 250 %/с  | 0,03   | -               |
| 100 %/с  | 0,02   | -               |
| Случайный угловой уход, °/ч <sup>1/2</sup>           |        |                 |
| 250 %/с  |        | 0,8             |
| 100 %/с  |        | 0,65            |

вой скорости и ширину полосы пропускания. Доступные пределы измерения: ±75 , ±150, ±300 и ±900 %/с.

Компания Silicon Sensing Systems производит малыми партиями ознакомительные платы с установленными гироскопами CRM100 и CRM200 и всеми необходимыми для их работы дополнительными компонентами как в одноосевом, так и в трехосевом исполнении (рис.5). Чертежи этих печатных плат и примеры программ обращения к гироскопам подробно представлены на сайте поддержки фирмы-производителя, что являются хорошим подспорьем разработчикам. По отзывам тех, кто уже протестировал образцы CRM100 и CRM200, у этих приборов чувствительность лучше, чем у CRG20, но несколько больший временной уход.

### Гироскопы Sensor Technologies AS

В основе чувствительных элементов гироскопов компании Sensor Technologies AS лежит измерение параметров движения асимметричной



Рис.5. Ознакомительная плата с тремя гироскопами PinPoint

инерциальной массы (двух миниатюрных кремниевых пластин по форме похожих на кремниевых пластин-крылья бабочки), на которой принудительно поддерживается вибрация.

Весьма интересны для отечественных разработчиков две новые модели гироскопов производства норвежской компании Sensor Technologies AS — SAR100 и SAR150 (табл.5). Различные по точностным характеристикам и по цене, эти модели выполнены в одинаковых герметичных керамических корпусах оригинальной конструкции (рис.6). Корпус этих датчиков может паяться на плату как параллельно ее плоскости, так и перпендикулярно, что позволяет на миниатюрной печатной плате собрать двух- и трехосевую гироскопические системы. Выход микросхем SAR100 и SAR150 — SPI, 12 разрядов.

### Акселерометры Colibrys

Швейцарская компания Colibrys — известный в мире производитель высокоточных MEMS-акселерометров для применения в сейсмических измерениях, для измерения параметров буровых скважин в нефтегазовой промышленности, для авиационных, космических и военных изделий. Компания производит как акселерометры общего назначения, так и модели, устойчивые к сильным ударам (серия HS) (табл.6). Кроме акселерометров для измерения линейного ускорения Colibrys изготавливает на их



Рис.6. Гироскопы SAR100 и SAR150

Таблица 6. Основные технические характеристики инерциальных акселерометров Colibrys

| Серия       | Диапазон измерения, g        | Рабочая температура, °C | Максимальный удар, g | Время восстановления, мс | Вибрация            | Напряжение питания, В | Масса, г | Габариты, мм  |
|-------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|----------|---------------|
| MS8000      | 2; 10; 30; 100               |                         | 6000                 |                          |                     |                       | 1,64     | 14,2×14,2×3,3 |
| MS9000      | 2; 5; 10; 30; 50; 100; 200 g | -55...125               | 6000                 | < 1                      | 20 g,<br>20–2000 Гц | 2,5–5,5               | 1,5      | 8,9×8,9×3,23  |
| HS8000      | 2; 30; 100                   |                         | 20 000               |                          |                     |                       | 1,64     | 14,2×14,2×3,3 |
| IRIS-RS9010 | 10                           | -55...95                | 1000                 |                          |                     |                       | 0,6      | 8,9×8,9×3,70  |

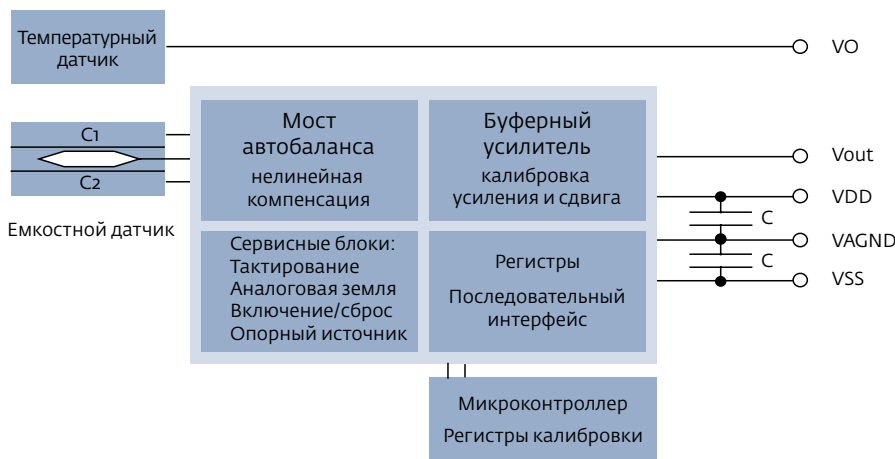


Рис.7. Структурная схема акселерометров Colibrys

основе датчики вибрации, наклона и сейсмические акселерометры.

Все приборы Colibrys представляют собой законченное устройство с емкостным чувствительным элементом (две емкости, включенные по полумостовой схеме с общей средней обкладкой). При возникновении ускорения вдоль оси, перпендикулярной обкладкам, средняя обкладка отклоняется в сторону, противоположную движению, в результате чего емкость одного из конденсаторов системы увеличивается, а другого – уменьшается (рис.7). В конструкцию датчика, кроме первичного чувствительного элемента, входит также чип для сигнальной обработки и датчик темпе-



Рис.8. Датчик наклона MS9001. D

ратуры для внешней температурной стабилизации. Все приборы Colibrys имеют аналоговый выход (напряжение выходного сигнала линейно зависит от величины ускорения).

На основе той же технологии Colibrys производит датчики наклона (рис.8), которые с высокой точностью измеряют в статике угол наклона относительно местной вертикали. Это модели MS9001 D (диапазон измерения  $\pm 1g$ , угол  $\pm 30^\circ$  с точностью

$0,003^\circ$ ) и MS900.5.D (диапазон  $0,5g$ , угол измерения  $\pm 15^\circ$  с точностью  $0,0015^\circ$ ).

### Акселерометры Silicon Designs

Американская компания Silicon Designs производит датчики линейного ускорения, по характеристикам близкие к продукции Colibrys. У них общий принцип действия – емкостной полумостовой чувствительный элемент со встроенной схемой обработки сигнала. Отличие состоит в том, что у Silicon Designs есть модели не только с аналоговым ратиометрическим выходом, но и с цифровым ШИМ-сигналом, длительность заполнения которого линейно зависит от величины ускорения.

Кроме того, компания Silicon Designs производит на базе своих акселерометров трехосевые модули. Корпус модулей залит компаундом, в корпус вмонтирована кабель для подключения датчика к плате обработки (рис.9).

### Навигационные системы на основе датчиков средней точности

Описанные датчики средней степени точности широко используются во всем мире. Надежность этих приборов и стабильная работа в реальных условиях позволяют их применять в жизненно важ-

Таблица 7. Основные технические характеристики интегрированной навигационной системы "Компанав-3"

|  | Коррекция от спутниковой навигационной системы |                               |
|--|--|-------------------------------|
|  | С коррекцией                                   | Без коррекции                 |
| Точность определения параметров полета |  |                               |
| Крен, тангаж                           |  |                               |
| Прямолинейное движение, °              | 0,1–0,2  | 0,3–0,4°                      |
| Маневрирование, °                      | 0,3–0,5  | 0,7°                          |
| Курс (путевой угол)                    | 0,4  | 1–2**                         |
| Путевая скорость, м/с                  | 0,2  | 5 (прямолинейное движение)*   |
| Координаты, м                          | 6  | 500 (прямолинейное движение)* |
| Технические характеристики             |  |                               |
| Габариты, мм                           | 65×67×50                                       |                               |
| Масса, г                               | 300  |                               |
| Напряжение питания, В                  | 10–30  |                               |
| Потребляемая мощность, Вт              | 2  |                               |

\* 5 мин пропадания сигнала спутниковой навигационной системы.

ных узлах автомобилей, отвечающих за безопасность или жизнь людей. В авиационных моделях инерциальные датчики позволяют сглаживать ошибки пилотов и сохраняют модели стоимостью в несколько тысяч евро.

Основные потребители описанных инерциальных датчиков:

- производители автоэлектроники: в системах активной подвески автомобиля, в системах предотвращения заноса;



Рис.9. Трехосевой акселерометр 2430 — один из линейки трехосевых приборов Silicon Designs

- производители систем радиуправления моделями вертолетов и самолетов. Известная японская фирма Futaba уже много лет применяет датчики угловых скоростей компании Silicon Sensing Systems в своих гироскопах для стабилизации полетов моделей вертолетов;
- производители компактных навигационных систем;
- производители спутниковых антенн, устанавливаемых на подвижных объектах (катерах, яхтах и т. д.);
- разработчики робототехнических устройств. В России среди разработчиков систем управления беспилотных устройств также растет ин-



Рис.10. Внешний вид системы "Компанав-3"

терес к данной продукции. Устав от отказов систем, построенных на основе дешевых бытовых гироскопов и акселерометров, многие компании с интересом тестируют и уже начинают применять описанную выше продукцию в своих новых разработках.

Так, новая ультракомпактная интегрированная навигационная система "Компанав-3" (рис.10) российской компании "ТеКнол" разработана на основе модуля DMU02 компании Silicon Sensing Systems. По отзывам разработчиков "ТеКнол", этот модуль позволяет в разы улучшить параметры нового устройства (табл.7) и сократить как время на разработку, так и габариты конечного устройства. Предыдущая версия интегри-

рованной навигационной системы "Компанав-2" была основана на датчиках Analog Devices.

Голландская компания Xsens производит компактные измерительные приборы и наборы для их объединения в сеть. Базовая модель МТИ (рис.11) представляет собой бесплатформенную инерциальную навигационную систему среднего класса точности. Она содержит три гирос-



Рис.11. Конструкция навигационного прибора МТИ компании Xsens

копа, три акселерометра и три магнитометра. В состав прибора также входит микроконтроллер, способный решать задачи ориентации, навигации или стабилизации положения. Прибор настраивается, программируется и управляется через интерфейс RS-232.

В базовой модификации установлены акселерометры с диапазоном измерения 5g и датчики угловой скорости с диапазоном измерения 300°/с. В заказных вариантах возможно расширение этих диапазонов до 18g и от 150 до 1200°/с.

Прибор выпускается в ряде модификаций, в том числе производится бескорпусная OEM-версия прибора МТИ-OEM для интеграции в изделия сторонних разработчиков в виде дочерней платы навигационного модуля, а также версия МТИ-G - вариант прибора, комплексированного с приемником системы спутниковой навигации GPS.

В набор разработчика входит множество заготовок программ управления для разных условий применения (навигация, стабилизация, ориентация объектов).

Приборы Xsens активно применяются в системах биомеханических измерений, в беспилотных летательных аппаратах, в робототехнике, на малых судах и в других областях.

\*\*\*

В следующей публикации мы рассмотрим наиболее точные на сегодня MEMS-гироскопы и инерциальные измерительные модули, применяемые в авиакосмической и военной технике.

*Продолжение следует*