

УДК 681.586.2(045)

О. А. Сущенко, канд. техн. наук,  
С. В. Карасёв

## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: iacs@nau.edu.ua

*Выполнен обзор состояния разработки микроэлектромеханических датчиков угловой скорости. На основании анализа характеристик датчиков представлены рекомендации по использованию датчиков исследуемого типа в системах управления подвижными объектами широкого класса и системах стабилизации измерительных устройств. Приведены тенденции развития современных микроэлектромеханических датчиков угловой скорости.*

**Ключевые слова:** микроэлектромеханический датчик угловой скорости, гироскоп, состояние разработки, тенденции развития.

**Введение.** Разработка микроэлектромеханических датчиков является одним из основных направлений современного приборостроения. Такие датчики имеют широкую область применения, например, автомобильный транспорт, стабилизацию платформ с установленными на них измерительными устройствами, системы управления подвижными объектами разного класса, измерительные блоки для инерциальной навигации. Процесс развития датчиков исследуемого типа не является завершённым. Он характеризуется повышением точностных характеристик, улучшением эксплуатационных свойств, уменьшением стоимости и усовершенствованием технологии датчиков. В то же время простота эксплуатации и невысокая стоимость делают датчики такого типа привлекательными для разработчиков сложных систем. В этой связи представляется актуальным анализ состояния и тенденции последующего развития датчиков, которые являются основными измерительными устройствами для сложных систем управления и стабилизации широкого класса. Следует отметить, что наибольшие достижения отмечаются в области создания акселерометров, возможно в связи с высокими потребностями в них автомобильной промышленности. Что касается датчиков угловой скорости, то тут каждые два года наблюдается улучшение характеристик на порядок без уменьшения стоимости [1].

**Постановка задачи.** Целью статьи является обзор существующего состояния разработки микроэлектромеханических датчиков на основе анализа информации о существующих измерителях, а также выявление основных тенденций их развития. Проведенное исследование поможет в выборе измерителей для перспективных систем управления и стабилизации широкого класса.

**Обзор состояния производства микроэлектромеханических датчиков угловой скорости.** К основным микроэлектромеханическим измерителям, разрабатываемым по кремниевой технологии, относятся такие инерциальные измерители, как гироскопические датчики угловой скорости и акселерометры. В современной технической документации гироскопические датчики угловой скорости производители обычно называют гироскопами.

Принцип действия большинства микроэлектромеханических гироскопов основан на способности вибрационного механического элемента воспринимать вращение. Такие датчики не имеют вращающихся частей и не требуют применения подшипников, что облегчает их миниатюризацию и изготовление. Вибрационные гироскопы впервые были продемонстрированы в начале 80-х. Вначале это были кварцевые измерители угловой скорости, которые отличались высокими точностными характеристиками, но их производство было сложным. После успешной демонстрации кремниевых акселерометров усилия разработчиков были сосредоточены на создании кремниевых гироскопических датчиков. В 1991 г. был продемонстрирован первый кремниевый гироскопический

измеритель угловой скорости производства Charles Stark Draper Laboratory, изготовленный по технологии серийного производства.

В зависимости от характеристик микроэлектромеханические гироскопы разделяются на три категории: инерциальные, тактические и скоростные [1], характеристики которых приведены в табл. 1. В течение последних 10 лет наиболее значительные усилия разработчиков были сосредоточены на развитии последней группы, в основном, вследствие их применения в автомобильной промышленности.

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик гироскопов разных категорий

| Параметр                                        | Скоростные гироскопы | Тактические гироскопы | Инерциальные гироскопы |
|-------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Случайная погрешность по углу, град/ $\sqrt{ч}$ | Больше 0,5           | 0,5 – 0,05            | Меньше 0,001           |
| Дрейф ухода, град/ч                             | 10 – 1000            | 0,1 – 10              | Меньше 0,01            |
| Точность масштабного коэффициента, %            | 0,1 – 1              | 0,01 – 0,1            | Меньше 0,001           |
| Полный диапазон, град/с                         | 50 – 1000            | Больше 500            | Больше 400             |
| Максимальный удар, g                            | $10^3$               | $10^3 - 10^4$         | $10^3$                 |
| Полоса пропускания, Гц                          | Больше 70            | 100                   | 100                    |

По особенностям конструктивного исполнения вибрационные гироскопы разделяют [2] на датчики вращения по оси Z (вертикальной оси) и по осям X/Y (осям в горизонтальной плоскости); датчики с использованием вибрационной массы и вибрационного кольца; датчики для измерения линейной и вращательной вибрации; датчики с использованием одного или двухмассового камертона. Технологией изготовления таких датчиков являются на монокристаллических, поликристаллических и смешанного типа. Механизмы приведения в действие бывают электростатическими, электрическими, пьезоэлектрическими. Кориолисовы датчики – электростатические, электромагнитные и пьезоэлектрические.

В состав микроэлектромеханического датчика входят самонастраиваемый резонатор, устанавливаемый по чувствительной оси, и микродатчик, устанавливаемый по измерительной оси. Следует отметить, что на характеристики гироскопов большое влияние оказывают возможные отклонения в процессе компоновки и изготовления, а также такие внешние воздействия как линейное ускорение и температура. Следует отметить, что до сих пор проектировщики микроэлектромеханических гироскопов уделяли особое внимание созданию чувствительных элементов и демонстрации их свойств на стенде. Удешевление датчиков наряду с сохранением их характеристик требует усилий специалистов по компоновке.

Ниже приводятся характеристики гироскопов, производимых четырьмя основными производителями мирового уровня, на долю которых приходится производство более 95% производства датчиков этого класса.

Компания **Robert Bosch** является лидером в проектировании и изготовлении кремниевых вибрационных гироскопов. Эта компания охватывает более 50 % автомобильного рынка и сопутствующих приложений. Она разрабатывает как Z, так и X/Y датчики угловой скорости [3].

Компания **BEI Systron Donner** является основным производителем датчиков для автомобильного транспорта. Гироскопы производства этой компании основаны на использовании цельного кварцевого инерциального датчика. Эти микроэлектромеханические инерциальные датчики предназначены для измерения угловой скорости, они основаны на использовании вибрационных камертонов и пьезоэлектрических принципах приведения в действие и преобразования информации [4].

Компания **Analog Devices** работает в области микроэлектромеханических гироскопов много лет и имеет патенты на многие концепции модифицированных камертонов [5]. Компания внедрила серию интегрированных датчиков угловой скорости ADXRS, в которых масса привязана к поликремниевой рамке, что позволяет ей резонировать только в одном направлении. Емкостные кремниевые чувствительные элементы, прикрепленные к подложке платы, измеряют смещение резонирующей массы вследствие кориолисова ускорения.

Компания **Silicon Sensing Systems** [6] разрабатывает микроэлектромеханические гироскопы с электромагнитным принципом приведения в действие и съема информации, которые дополняются постоянным магнитом, расположенным над датчиком. Ток, проходящий через разъемы, создает силу, которая заставляет резонировать кольцо. Кориолисово движение кольца улавливается индуцированными напряжениями, поскольку магнитное поле отсекается разъемами.

Характеристики датчиков разработки перечисленных выше компаний представлены в табл. 2 [1].

Таблица 2

**Сравнительный анализ особенностей основных компаний-производителей**

| Компания        | Ось | MEMS технология | Управление движением | Съем информации    | Тип корпуса   | Тип изоляции |
|-----------------|-----|-----------------|----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Bosch           | Z   | Наполнения      | Электромагнитное     | Емкостное          | Металлический | Атмосферный  |
| Bosch           | X/Y | Поликремниевая  | Электростатическое   | Емкостное          | Металлический | Вакуумный    |
| BEI             | Z   | Кварцевая       | Пьезоэлектрическое   | Пьезоэлектрическое | Металлический | Атмосферный  |
| Silicon Sensing | Z   | Наполнения      | Электромагнитное     | Электромагнитное   | Металлический | Вакуумный    |
| ADI             | Z   | Поликремниевая  | Электростатическое   | Емкостное          | Керамический  | Атмосферный  |

Что касается России, то разработка микромеханического гироскопа класса 0,1–0,01 град/с началась в 2001 г. в ЦНИИ «Электроприбор». В основу разработки положен гироскоп дискового типа. Управление движением и съем информации об углах осуществляются емкостными датчиками. Конструкция микромеханического вакуумного кремниевого модуля разработана ЦНИИ «Электроприбор», а изготовление осуществляется фирмой Tronics, имеющий опыт производства микромеханических акселерометров. Сравнительные испытания разрабатываемого гироскопа и гироскопа ADXRS150 фирмы Analog devices показали схожесть характеристик за исключением шумов электроники, которые оказались в 4 раза большими, чем у гироскопа ADXRS150.

Следует отметить, что наиболее широко на открытом рынке Украины представлены микромеханические датчики угловой скорости фирмы Analog devices ADXRS150 и ADXRS300, различающиеся диапазоном измерений.

Одним из актуальных практических применений датчиков исследуемого типа является их использование в системах управления подвижными объектами и стабилизации измерительных устройств, эксплуатируемых на этих объектах. В этом случае поиск микроэлектромеханических гироскопов следует проводить по таким основным критериям как диапазон измерения, порог чувствительности и устойчивость к внешним воздействиям, в том числе к ударам.

Среди измерителей угловой скорости производства фирмы Analog devices можно выделить программируемый с низким энергопотреблением датчик угловой скорости ADIS16251 [5]. Этот датчик имеет цифровой выход, что облегчает его использование в цифровых системах. В состав гироскопического измерителя входят температурный датчик, гироскопический датчик, блок преобразования, блок калибровки и цифровой обработки,

устройство ввода-вывода, блок самоконтроля и блок цифрового контроля. К сожалению, предъявленные к чувствительности требования выполняются в основном для измерителей угловой скорости с недостаточным диапазоном измерения угловой скорости. Так, для диапазонов измерения  $\pm 80$ ,  $\pm 40$ ,  $\pm 20$  град/с характерны чувствительности 0,01832, 0,00916 и соответственно 0,00458 град/с/ на единицу младшего разряда.

Для упомянутой области применения заслуживают внимания датчики угловой скорости разработки фирмы Systron Donner. Так, датчик QDARS представляет собой малогабаритный двухосный микроэлектромеханический гироскоп на основе двух датчиков угловой скорости GyroChip. Среди остальных измерителей угловой скорости производства этой фирмы следует выделить датчик QRS11, одноосный датчик SDG1000, кварцевый камертонный датчик GYROCHIP /QRS14, одноосный датчик LCG50 конструктивно оформленный в виде отдельного устройства. Параметры упомянутых датчиков представлены в табл. 3 [4].

Таблица 3

**Характеристики датчиков производства фирмы Systron Donner**

| Параметр                                        | QRS11-000100-101  | SDG1000           | QRS14-00100-103 | LCG50-00100-100   | QRS28-00100-100 |
|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Напряжение, В                                   | $\pm 5В \pm 3 \%$ | $\pm 10 - 16$     | $\pm 9 - 18$    | +5                | 4,75 – 5,35     |
| Диапазон измерения, град/с                      | $\pm 100$         | $\pm 200$         | $\pm 100$       | $\pm 100$         | 100             |
| Диапазон выходных сигналов, В                   | $\pm 2$           | $\pm 5$           | $\pm 5$         | -                 | $\pm 3,5$       |
| Коэффициент передачи, В/(град/с)                | -                 | $0,025 \pm 0,004$ | -               | $0,0064 \pm 15\%$ | 0,035           |
| Погрешность калибровки коэффициента передачи, % | $\leq 1$          | $\leq 2$          | $\pm 2$         | -                 | $\pm 2$         |
| Чувствительность к ускорению, (град/с)/g        | $\leq 0,02$       | $< 72$            | $\leq 0,06$     | $< 0,05$          | $< 0,02$        |
| Время готовности, с                             | $< 1$             | $\leq 1$          | $< 2$           | $< 2$             | $< 1с$          |
| Полоса пропускания, Гц                          | $> 60$            | $> 100$           | $> 50$          | $> 50$            | 110             |
| Нелинейность, %                                 | $\leq 0,05$       | $\leq 0,03$       | $\leq 0,05$     | $< 0,05$          | -               |
| Порог чувствительности, град/с                  | $\leq 0,004$      | $\leq 0,0025$     | $\leq 0,004$    | -                 | -               |
| Случайный шум, (град/с)/ $\sqrt{Гц}$            | $\leq 0,01$       | $< 0,0017$        | $\leq 0,02$     | $< 0,006$         | $< 0,005$       |
| Масса, г                                        | $\leq 60$         | $\leq 60$         | $\leq 50$       | $< 12$            | 20              |
| Рабочая температура, °С                         | -40 +80           | -40 +85           | -40 +85         | -40 +85           | -55 +85         |
| Температура хранения, °С                        | -55 +100          | -55 +95           | -55 +100        | -55 +100          | -55 +105        |
| Вибрация, g                                     | 10                | 20                | 10              | 10                | -               |
| Максимальный удар, g                            | 200               | 200               | 200             | 500               | 300             |

Датчики типа QRS11-000100-101 могут иметь и другие диапазоны, расширенную полосу пропускания, расширенный температурный диапазон. В состав датчика LCG50-00100-100 входит встроенный температурный датчик.

С точки зрения упомянутых приложений представляет интерес двухосный микроэлектромеханический гироскопический измеритель угловой скорости GG5200 разработки фирмы Honeywell [7]. Представленный датчик осуществляет измерения угловой скорости в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Фирма Gladiator Technologies выпускает малогабаритные микромеханические кремниевые двuosные гироскопы G20 [8] с низким электропотреблением и большим ресурсом эксплуатации. Встроенная система виброзащиты позволяет противостоять внешней вибрации и ударам. Следует отметить, что гироскопы этого типа выпускаются в нескольких стандартных измерительных диапазонах:  $\pm 75$ ,  $\pm 150$ ,  $\pm 300$  град/с, при этом существуют модификации, отличные от стандартов. Существенным недостатком гироскопов этого типа

является погрешность выставки  $\pm 1^\circ$ . Этого недостатка лишен одноосный гироскопический датчик G50Z [8] разработки той же фирмы, к возможным применениям которого относятся стабилизация платформ. Характеристики упомянутых датчиков (табл. 4), представляются весьма подходящими для применения в системах стабилизации измерительных устройств, предназначенных для эксплуатации на подвижных объектах широкого класса.

Таблица 4

**Характеристики датчиков, пригодных для эксплуатации в системах стабилизации**

| Параметр                                   | GG5200       | G20-075-100 | G50Z-100-100 (200)  |
|--------------------------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Масса, г                                   | 60           | 30          | < 30                |
| Время готовности, с                        | < 1          | -           | < 0,05              |
| Устойчивость к ударам, g                   | 40           | 500         | 500                 |
| Температурный диапазон, °C                 | -45 +85      | -40 +85     | -55 +100            |
| Питание                                    | 5В, < 200 мА | -           | 5В $\pm$ 5 %, 35 мА |
| Разрешающая способность, град/с            | 0.0027       | -           | $\leq$ 0,005        |
| Случайный шум, град /с/ $\sqrt{\text{Гц}}$ | -            | 0,05        | 0,014               |
| Коэффициент передачи, мВ/(град/с)          | 25           | 15          | 20                  |
| Точность выставки, мрад                    | $\pm 17$     | $\pm 17,5$  | < 4                 |
| Полоса пропускания, Гц                     | 100          | 100         | 50                  |
| Диапазон измеряемых скоростей, град/с      | $\pm 360$    | $\pm 75$    | $\pm 100$           |

**Тенденции развития микроэлектромеханических датчиков угловой скорости.**

Современный этап развития микроэлектромеханических датчиков характеризуют следующие основные направления: создание многоосных измерительных блоков, комбинирование с акселерометрами, наличие цифрового интерфейса, использование встроенных средств тестирования, калибровки, использование встроенных температурных датчиков.

Появление двухосных датчиков угловых скоростей положительно влияет на габариты инерциальных измерительных блоков, создаваемых на их основе. Такие датчики включают сервисную электронику, что придает им функциональную законченность и улучшает эксплуатационные характеристики.

Сейчас приобретают популярность датчики, которые выполняют функции измерения как угловой скорости, так и ускорения. Во многих источниках они называются гироскоп-акселерометрами. Такие датчики обладают повышенной информативностью, а кроме того, позволяют улучшить точностные характеристики гироскопа за счет коррекции от сигнала акселерометра, которая осуществляется внутри датчика. Такой принцип заложен в основу одноосного измерительного блока VRS-E132-1AD [9], состоящего из вибрационного гироскопа и твердотельного акселерометра. Для реализации коррекции выходной сигнал гироскопа интегрируется и сравнивается с выходным сигналом акселерометра. Полученный сигнал погрешности пропускается через фильтр с большой постоянной времени и используется для охвата гироскопа обратной связью. Фильтр позволяет минимизировать кратковременные погрешности акселерометра. Кроме того, полученный сигнал погрешности используется для демпфирования гироскопа. Такие датчики особенно эффективны при использовании в системах, предназначенных для эксплуатации на подвижных объектах.

Характеристики датчиков имеют некоторый статистический разброс в силу погрешностей производства. Кроме того, процессы старения в разных датчиках происходят с разной скоростью. Сигналы микроэлектромеханических гироскопов нуждаются в компенсации дрейфа нуля. Поэтому для достижения высоких характеристик систем необходимо использовать корректирующие устройства. При этом используются устройства разной сложности, начиная от фильтров и заканчивая PID-регуляторами и робастными регуляторами. Многие датчики имеют и встроенные средства улучшения характеристик датчиков. Так, широко распространенным является использование встроенных систем термокомпенсации.

**Выводы.** Проанализировано состояние разработки современных микроэлектромеханических измерителей угловой скорости. Охарактеризованы основные особенности их принципа действия, конструкции и изготовления. Определены датчики, пригодные для эксплуатации в системах управления подвижными объектами и стабилизации измерительных устройств. Представлены основные тенденции развития датчиков исследуемого типа.

#### Список литературы

1. *Nasiri S.* A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. <http://www.invensense.com/shared/pdf/MemsGyroComp.pdf>
2. *Yazdi N.* Micromachined Inertial Sensors / N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi. – Proc IEEE. – 1998. – Vol. 86. – No. 8. – P. 1640 – 1659.
3. *Bosch* gyroscope sensors in automotive applications. <http://www.boschsensortec.com/3488.htm>.
4. *Сысоева С.* Автомобильные гироскопы / С. Сысоева. // «Компоненты и технологии». – 2007. – No. 1. – С. 58 – 66. [http://kit-e.ru/articles/sensor/2007\\_1\\_40.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2007_1_40.php)
5. *Власенко А.* Микромеханические датчики Analog devices iMems / А. Власенко // «Компоненты и технологии». – 2005. – No. 6. [http://www.kit-e.ru/articles /sensor /2005\\_6\\_50.php](http://www.kit-e.ru/articles /sensor /2005_6_50.php)
6. *Горнев Е. С.* Обзор микрогироскопов сформированных по технологии поверхностной или объемной микромеханики / Е. С. Горнев, Н. А. Зайцев, М. Ф. Равилов, И. М. Романов, С. О. Ран чин // «Нано- и микросистемная техника». – 2005. – № 4. <http://www.microsystems.ru/files/publ/461.htm>.
7. *New two axis MEMS rate gyro package for pointing and stabilization, and flight control applications.* – N61-6576-000. – 2010. [http://www51.honeywell.com/aero/ GG5200\\_Two\\_Axis\\_MEMS\\_Rate\\_Gyro.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/ GG5200_Two_Axis_MEMS_Rate_Gyro.pdf)
8. *G20 two axis MEMS gyro.* <http://www.gladiatortechnologies.com>
9. *Single axis vertical reference system VRS-E132-1AD.* [http://www.watson-gyro.com/files/vertical\\_gyro\\_VRS-E132-1AD\\_manual.pdf](http://www.watson-gyro.com/files/vertical_gyro_VRS-E132-1AD_manual.pdf)

О. А. Сущенко, С. В. Карасьов

#### Огляд сучасного стану мікроелектромеханічних датчиків кутової швидкості та тенденції їх розвитку

Виконано огляд стану розроблення мікроелектромеханічних датчиків кутової швидкості. На підставі аналізу характеристик датчиків подано рекомендації щодо використання датчиків досліджуваного типу в системах керування рухомими об'єктами широкого класу і системах стабілізації вимірювальних пристроїв. Наведено тенденції розвитку сучасних мікроелектромеханічних датчиків кутової швидкості.

О. А. Sushchenko, S. V. Karasyov

#### Review of the Modern Status of the Micro-Electro-Mechanical Angular Rate Sensors and Trends of their Development

In the paper the review of the micro-electro-mechanical angular rate sensors development status is carried out. Based on the sensors characteristics analysis the recommendations by usage of the sensors to be studied in the systems of control by the wide class vehicles and stabilization of the measuring devices were given. Trends of the modern micro-electro-mechanical angular rate sensors development are represented.