

# Инерциальные датчики и модули на основе МЭМС

Дмитрий Данильцев, Андрей Михеев, Олег Греков (г. Москва)

В статье представлен обзор гироскопических датчиков на основе МЭМС зеленоградской компании ООО «Лаборатория Микроприборов». Приведена история создания чувствительных элементов в МИЭТ, описаны исполнения датчиков, их основные характеристики и разрабатываемые на их основе продукты.

Инерциальные датчики на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) уже довольно давно пользуются большой популярностью и используются во множестве как специальных устройств, так и для более широкого применения. Точностные характеристики микромеханических датчиков постоянно улучшаются. Всё чаще датчики угловой скорости (ДУС) на основе МЭМС находят применение там, где раньше использовались волоконно-оптические гироскопы, значительно превышающие микромеханические

ДУС по массогабаритным характеристикам и стоимости. В качестве примеров можно привести гиросtabilизированные оптические приборы, антенны, платформы, системы умерения качки скоростных судов, гироскопы и системы ориентации малых спутников.

С конца 1990-х годов в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» под руководством профессора С.П. Тимошенко активно велись работы по созданию кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ) гироскопов

и акселерометров (см. рис. 1) и систем на основе МЭМС.

Базируясь на научных изысканиях МИЭТ, зеленоградская компания «Лаборатория Микроприборов» начала разработку и производство инерциальных приборов. Первым продуктом стал одноосный микромеханический датчик угловой скорости (ДУС) серии ММГК (см. рис. 2) с ЧЭ, разработанным и изготовленным в МИЭТ. Этот ЧЭ имеет сложную структуру с распределённой инерциальной массой, что позволяет обеспечить большую виброустойчивость по сравнению с массовыми датчиками западных производителей. Используемая технология корпусирования ЧЭ позволила обеспечить высокую добротность, что в первую очередь отразилось на точностных характеристиках. Преимуществом ДУС ММГК является возможность настройки диапазона измерения под задачи заказчика и возможность поставки в нескольких типах корпуса. Информация выдается датчиком в аналоговом (напряжение) представлении. ММГК работает в промышленном диапазоне температур, имеет выход датчика температуры и функцию *Selftest* для определения работоспособности микромеханической части и электроники. Основные характеристики ДУС ММГК представлены в таблице 1.

Полоса пропускания и влияние вибрации на ДУС ММГК с диапазоном измерения  $\pm 100^\circ/\text{с}$  представлено на рисунках 3, 4, 5 и 6.

При синусоидальной вибрации амплитудой 10g с частотой 20...2000 Гц фиксировались следующие значения:

- увеличение шума в 4 раза – с  $0,02(^\circ/\text{с})/\sqrt{\text{Гц}}$  до  $0,08(^\circ/\text{с})/\sqrt{\text{Гц}}$ ;
- смещение нуля на  $0,05^\circ/\text{с}$ ;
- шум, зависящий от вибрации –  $0,008(^\circ/\text{с})/\sqrt{\text{Гц}}/\text{g}$ ;
- нулевой сигнал, зависящий от вибрации –  $0,005(^\circ/\text{с})/\text{g}$ .

Зависимость выходного сигнала от линейного ускорения (в диапазоне 0...200g):

- коэффициент зависимости выходного сигнала от ускорения по оси X –  $K_{ax} = 0,01(^\circ/\text{с})/\text{g}$ ;

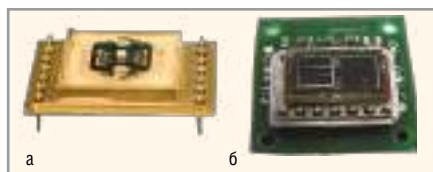


Рис. 1. Внешний вид ЧЭ гироскопа (а) и акселерометра (б)



Рис. 2. ММГК в бескорпусном исполнении

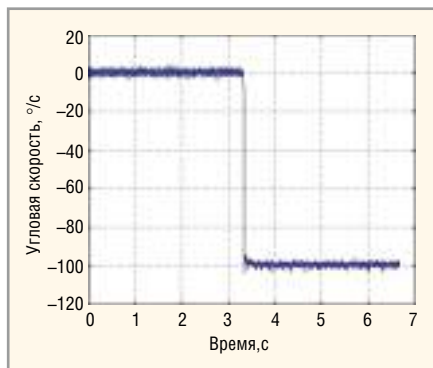


Рис. 3. Реакция датчика на ступенчатое воздействие

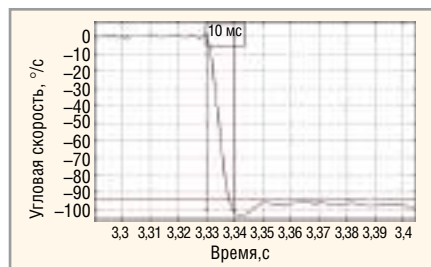


Рис. 4. Переходная характеристика датчика

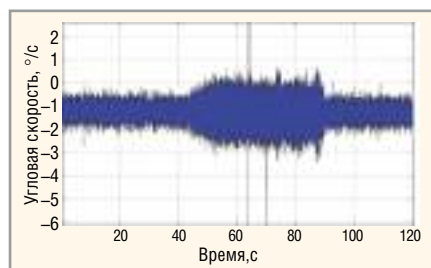


Рис. 5. Реакция на синусоидальную вибрацию в полосе 100 Гц

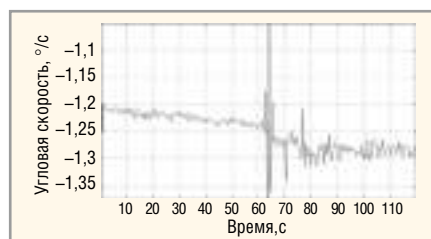


Рис. 6. Реакция на синусоидальную вибрацию в полосе 1 Гц

- коэффициент зависимости выходного сигнала от ускорения по оси Y –  $K_{ay} = 0,08$  (°/с)/g.

Плотное сотрудничество с МИЭТ и использование испытательной базы института (см. рис. 7) позволяет быстро изготавливать прототипы датчиков, настраивать и калибровать их. В то же время разработанные программы и методики калибровки позволяют автоматизировать процесс испытания серийных датчиков и инерциальных систем. Стандартная процедура калибровки для серий ТГ75 и ММГК занимает 7 ч, в результате чего определяются его шумовые характеристики, нестабильность дрейфа нулевого сигнала (см. рис. 8), масштабный коэффициент.

Совершенствование конструкции ЧЭ и схем обработки позволили ко второй половине 2013 года создать новый трёхосный гироскопический модуль ТГ-75С с диапазоном измерения 75°/с. Новый датчик (см. рис. 9), помимо трёх измерительных осей (для заказа доступны и одно-, и двухосевые исполнения), получил цифровой выход сигнала (RS-232), пыленепроницаемый влагозащищённый корпус, сертифицированный по IP65, и вписался практически в такие же габариты, как и ММГК. Была снижена фазовая задержка и увеличена полоса пропускания датчика.

ТГ-75С обеспечивает выдачу информации по 4 аналоговым каналам одновременно. Из них три канала предназначены для измерения угловых скоростей и один канал – для температуры внутри корпуса датчика. Параметры аналоговых каналов приведены в таблице 2.

Модуль ТГ-75С рассчитан на использование в системах стабилизации, ориентации, инерциальной навигации в судостроении, авиации и наземной технике и для своего класса приборов отличается привлекательной ценой.

В планах компании к лету 2014 года вывести на рынок инерциальный модуль (см. рис. 10), содержащий в себе гироскопы и акселерометры, разработанные и произведённые в МИЭТ и магнитометры. Помимо выходных данных самих датчиков, в инерциальном модуле будут реализованы алгоритмы гировертикали и гирокурсовертикали, представляющие на выходе данные об углах крена, тангажа и рысканья как для статических, так и для динамических объектов.

Совместно с МИЭТ ведётся инициативная работа над созданием бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС).



Рис. 7. Поворотный стол с термокамерой



Рис. 9. ДУС ТГ-75С

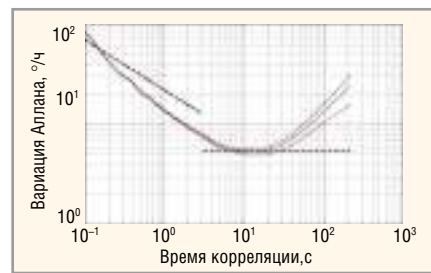


Рис. 8. Диаграмма Аллана ДУС ММГК с диапазоном измерения 200°/с



Рис. 10. Прототип гировертикали

Таблица 1. Параметры аналогового канала угловой скорости ДУС ММГК с диапазоном измерения 100°/с

| Параметр   | Значение    |            |              |
|--|-------------|------------|--------------|
|  | минимальное | нормальное | максимальное |
| Диапазон выходных напряжений, В                                  | 0           |            | 5            |
| Ток нагрузки, мА   |             | 30         | 40           |
| Время готовности после включения питания, с                      |             |            | 1            |
| Нулевые сигналы угловой скорости (относительно 2,5 В), °/с       |             | 2,4        |              |
| Полоса пропускания <sup>1</sup> , Гц                             |             | 50         |              |
| Масштабные коэффициенты угловой скорости <sup>2</sup> , мВ/(°/с) | 22          |            | 25           |
| Нелинейность передаточных функций по всем осям, %                |             | 0,03       |              |
| Случайное угловое блуждание, °/√ч                                |             |            | 0,4          |
| Спектральная плотность шума, (°/с)/√Гц                           |             |            | 0,02         |
| Случайная составляющая нулевого сигнала, °/ч                     |             |            | 100          |
| Нестабильность нуля по Аллану, °/ч                               |             |            | 10           |
| Тренд нулевого сигнала <sup>2</sup> , (°/ч)/ч                    |             |            | 15           |
| Чувствительность к ускорению, (°/с)/g                            |             |            | 0,01         |
| Неортогональность оси относительно основания датчика, °          |             |            | 2            |

<sup>1</sup> По уровню АЧХ –3 дБ.

<sup>2</sup> Максимальное значение тренда нулевого сигнала и пределы масштабных коэффициентов указаны по модулю.

Таблица 2. Параметры аналоговых каналов угловых скоростей ДУС ТГ-75С

| Параметр  | Значение    |            |              |
|---|-------------|------------|--------------|
|   | минимальное | нормальное | максимальное |
| Диапазон выходных напряжений, В   | 0           |            | 3,3          |
| Ток нагрузки, мА  |             |            | 30           |
| Время готовности после включения питания, с                                   |             |            | 1            |
| Нулевые сигналы угловой скорости (ВОХ, ВОУ, ВОZ, относительно 1,65 В), °/с    | -5          |            | 5            |
| Полоса пропускания <sup>1</sup> , Гц  | 90          | 100        | 150          |
| Масштабные коэффициенты угловой скорости (КХ, КУ, КZ) <sup>2</sup> , мВ/(°/с) | 21          |            | 22           |
| Нелинейность передаточных функций по всем осям, %                             |             | 0,1        | 0,2          |
| Случайное угловое блуждание, °/√ч   |             |            | 0,25         |
| Спектральная плотность шума, (°/с)/√Гц  |             |            | 0,004        |
| Случайная составляющая нулевого сигнала, °/ч                                  |             |            | 32           |
| Нестабильность нуля по Аллану, °/ч  |             | 5          | 8            |
| Тренд нулевого сигнала <sup>2</sup> , (°/ч)/ч                                 |             |            | 25           |
| Чувствительность к ускорению, (°/с)/g   |             |            | 0,077        |
| Неортогональность осей <sup>3</sup> , °                                       |             |            | 1            |

<sup>1</sup> По уровню АЧХ –3 дБ.

<sup>2</sup> Максимальное значение тренда нулевого сигнала и пределы масштабных коэффициентов указаны по модулю.

<sup>3</sup> По дополнительному требованию заказчика возможно значительное снижение неортогональности измерительных осей за счёт калибровки на двухосном поворотном столе и программной компенсации.