

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 – $K_{ax} = 0,01(^\circ/\text{с})/\text{g}$;

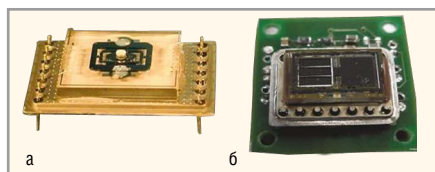


Рис. 1. Внешний вид ЧЭ гироскопа (а) и акселерометра (б)

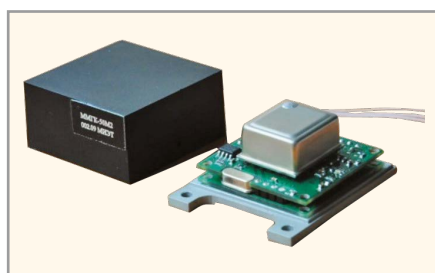


Рис. 2. ММГК в бескорпусном исполнении

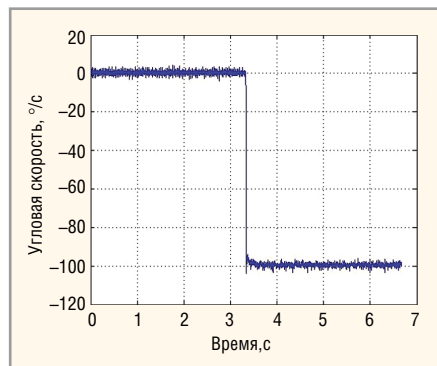


Рис. 3. Реакция датчика на ступенчатое воздействие

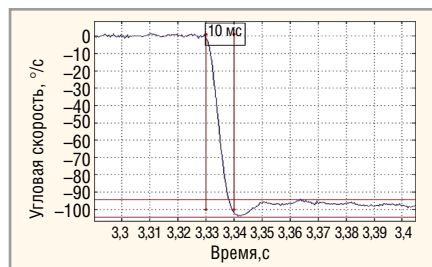


Рис. 4. Переходная характеристика датчика

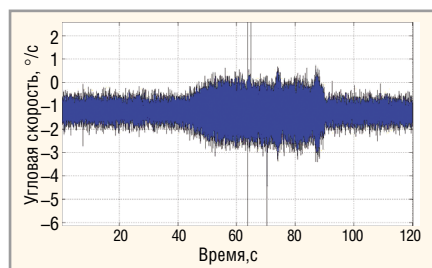


Рис. 5. Реакция на синусоидальную вибрацию в полосе 100 Гц

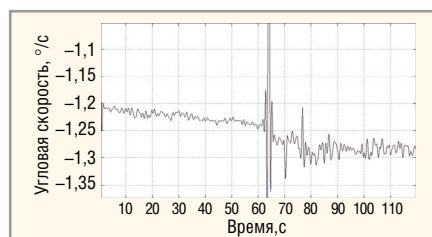


Рис. 6. Реакция на синусоидальную вибрацию в полосе 1 Гц

- 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

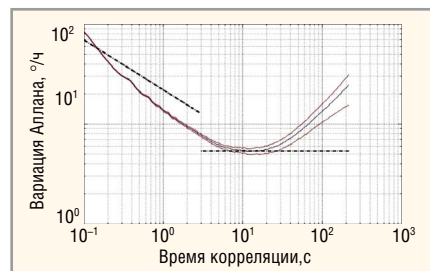


Рис. 8. Диаграмма Аллана ДУС ММГК с диапазоном измерения 200°/с



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 ¹ , Гц		50	
Масштабные коэффициенты угловой скорости ² , 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 ² , (°/ч)/ч			15
Чувствительность к ускорению, (°/с)/g			0,01
Неортогональность оси относительно основания датчика, °			2

¹ По уровню АЧХ –3 дБ.

² 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 ¹ , Гц	90	100	150
Масштабные коэффициенты угловой скорости (КХ, КУ, КZ) ² , 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 ² , (°/ч)/ч			25
Чувствительность к ускорению, (°/с)/g			0,077
Неортогональность осей ³ , °			1

¹ По уровню АЧХ –3 дБ.

² Максимальное значение тренда нулевого сигнала и пределы масштабных коэффициентов указаны по модулю.

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