

**Балансировка кремниевых датчиков
угловой скорости в процессе изготовления**

*С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, О.М. Бритков,
С.А. Анчутин, А.С. Тимошенко*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

**Balancing of Silicon Speed Sensors
during Manufacturing Process**

*S.P. Timoshenkov, B.M. Simonov, O.M. Britcov,
S.A. Anchutin, A.S. Timoshenkov*

National Research University of Electronic Technology

Исследованы возможности корректировки параметров микроэлектромеханических кольцевых датчиков угловой скорости с помощью балансировки, осуществляемой изменением массы отдельных сегментов кольца, и оптимизации внутрикорпусного давления в процессе изготовления таких приборов. Получены положительные результаты для опытных образцов. Предложен алгоритм реализации балансировки посредством изменения массы сегментов кольца, позволяющий уменьшить разность резонансных частот колебаний кольца в различных направлениях.

Ключевые слова: датчик угловой скорости; кольцевой микрогироскоп; балансировка; демпфирование; чувствительный элемент.

The possibilities of adjusting the parameters of the MEMS angular rate ring sensors using the balancing, effected by changing the mass of individual segments of the ring and the optimization of in-situ pressure in the manufacturing process of these devices, have been investigated. The positive results for the test samples have been obtained. An algorithm for performing the balancing by changing the mass of the ring segments, permitting to reduce the difference between the resonance frequency of the ring in different directions, has been proposed.

Keywords: Sensor Angular rate, ring gyroscope, balancing, damping, sensitive element (SE)

Датчики угловой скорости (ДУС) относятся к наиболее востребованным микро-электромеханическим системам (МЭМС) [1,2] и широко применяются, например, в автомобильной промышленности, робототехнике, системах управления и системах стабилизации различных объектов (беспилотных летательных аппаратах, устройствах стабилизации, линии визирования и т.п.). Подобные приборы, помимо функциональной востребованности, имеют малые габариты, высокую надежность и низкую стоимость. Механическая часть таких приборов практически полностью совместима с устройствами сервисной электроники [3]. Все это достигается благодаря использованию технологий микросистемной техники, адаптированных к их изготовлению.

ДУС (микрогироскоп) состоит из двух функциональных частей с различными принципами функционирования: электромеханическая (чувствительный элемент) и электронная (схема формирования и измерения полезного сигнала). Интеграция функциональных частей микрогироскопа может быть реализована по-разному. В зависимости от используемой технологии изготовления микромеханического датчика (микрогироскопа) входящие в его состав части могут изготавливаться в едином технологическом процессе или каждая по отдельности с использованием разных процессов и объединяться позже.

Преобразователи угловой скорости кольцевого типа. В настоящей работе исследуется возможность контроля и корректировки параметров ДУС в процессе их изготовления и показана необходимость введения балансировки перед герметизацией чувствительного элемента ДУС.

Как правило, современные микрогироскопы представляют собой приборы, в которых используется энергия вынужденных (первичных) колебаний инерционной массы, являющейся резонатором при наличии переменной угловой скорости. Это преобразование осуществляется вследствие влияния на резонатор сил или моментов инерции Кориолиса. Амплитуда первичных и тем более вторичных колебаний инерционных масс очень мала, поэтому требуется резонансная настройка, при которой частоты первичных и вторичных колебаний и собственная частота резонатора близки по значению [1, 3, 4].

Преобразователь угловой скорости кольцевого типа представляет собой систему, в основе которой находится кольцеобразное тело (кольцо, цилиндр, конус, тор и т.п.). Некоторые формы основных для выделения информационного сигнала колебаний представлены на рис.1 [4].

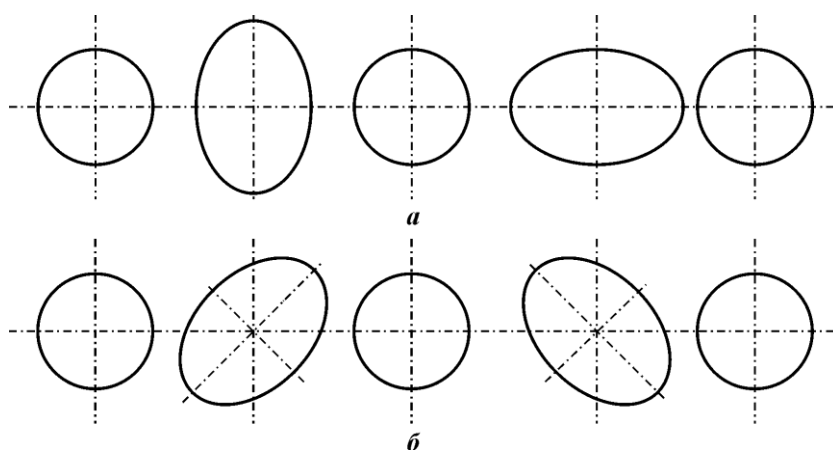


Рис.1. Упрощенная схема форм колебаний (мод) кольцевого микрогироскопа: *a* – при отсутствии вращения вокруг оси чувствительности; *б* – при вращении вокруг оси чувствительности

Разработаны и широко используются такие методы возбуждения колебаний кольцевого резонатора, как электростатические, магнитоэлектрические, пьезоэлектрические. Преимуществом электростатического метода возбуждения колебаний является его высокая эффективность при малых зазорах между электродами, возможность обеспечения малых размеров электронных узлов и высокой плотности интеграции элементов микромеханики и электронных схем в составе измерительного устройства. Данный метод предполагает использование электродов на подвижных и неподвижных частях чувствительного элемента. Магнитоэлектрическая схема позволяет возбуждать колебания с большой амплитудой. Здесь применяются постоянный магнит и контур электронной цепи, проходящий через кольцевой резонатор.

Контроль и корректировка параметров ДУС кольцевого типа. Для корректировки параметров ДУС кольцевого типа – кольцевых микрогироскопов (КМГ), электростатического карданного типа и других МЭМС используется балансировка. Функциональная схема индукционной системы съема сигнала с кольцевого микрогироскопа в двух положениях чувствительного элемента (ЧЭ), отличающихся углом поворота относительно платы измерительного устройства, представлена на рис.2 [5].

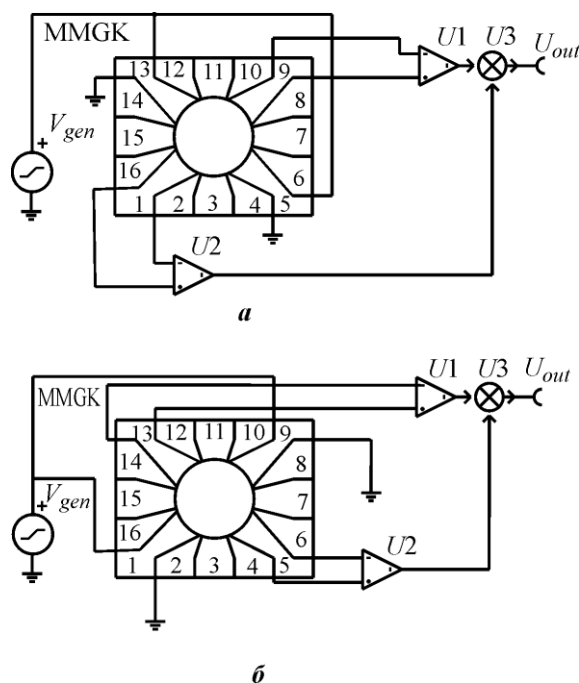


Рис.2. Схема съема сигнала с кольцевого микрогироскопа в двух положениях чувствительного элемента: а – без поворота; б – после поворота на 90° (1–16 – электроды)

Генератор V_{gen} возбуждает первичные колебания кольцевого резонатора на собственной частоте (через электроды 4, 5 и 12, 13). При протекании переменного тока по электродам системы возбуждения колебаний, которые находятся в однородном магнитном поле, возникает сила Лоренца, действующая на кольцевой резонатор. Размещение электродов таково, что действие этих сил приводит к колебаниям кольца на основной моде (рис.1,а). При наличии угловой скорости вращения объекта с установленным на нем микрогироскопом вокруг оси чувствительности датчика во вторичном контуре появляются колебания, вызванные силами Кориолиса.

Результирующая картина колебаний при воздействии на микрогироскоп угловой скорости показана на рис.1,б. При движении электродов системы съема сигнала в однородном магнитном поле на них наводится электродвижущая сила (ЭДС), амплитуда

которой прямо пропорциональна амплитуде колебаний резонатора. Наведенная ЭДС усиливается с помощью усилителей $U1$ и $U2$ (см. рис.2), и формируется разность этих ЭДС. Выходной сигнал представляет собой переменное напряжение на собственной частоте, точнее на частоте генератора V_{gen} . Амплитуда этого напряжения пропорциональна угловой скорости вращения. После синхронного детектирования получаем квазипостоянное напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения.

Колебания электродов системы съема сигнала за счет движения резонатора в простейшем виде могут быть описаны выражениями:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t), \\ r_2 &= -r_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $r_{1,2}$ – соответственно радиальные координаты электродов 8, 9 и 1, 16 (см. рис.2,а) или электродов 4, 5 и 12, 13 (см. рис.2,б); $r_0 = K_1\Omega$ – амплитуда колебаний, прямо пропорциональная угловой скорости вращения Ω ; f_0 – собственная (резонансная) частота рабочих колебаний кольцевого резонатора.

Наводимая на электродах 8, 9 и 1, 16 (см. рис.2,а) или на электродах 4, 5 и 12, 13 (см. рис.2,б) ЭДС:

$$\begin{aligned} E_1 &= K_0 \frac{dr_1}{dt} = K_0 r_0 2\pi f_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t), \\ E_2 &= K_0 \frac{dr_2}{dt} = -K_0 r_0 2\pi f_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t). \end{aligned} \quad (2)$$

Напряжение на входе синхронного детектора равно:

$$U_{out} = E_1 - E_2 = 2K_0 r_0 2\pi f_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t). \quad (3)$$

После прохождения синхронного детектора выходное напряжение имеет вид

$$U_{вых} = U_{out} \frac{dV_{gen}}{dt} \cdot \frac{1}{|V_{gen}|} = K_0 r_0 2\pi f_0 = K_0 K_1 2\pi f_0 \Omega. \quad (4)$$

Отметим, что существуют различные схемы возбуждения колебаний кольцевого резонатора и выделения полезного сигнала. Подробный анализ существующих схем, а также адаптация и оптимизация имеющихся схемных решений в данной работе не рассматриваются.

На рис.3 представлена фотография ЧЭ КМГ. Резонатор 2 представляет собой кремниевое кольцо диаметром 6 мм, которое поддерживается восемью радиально упругими подвесами в виде ромбов 3. Подвесы непосредственно связаны и фиксируются основанием 1. Все элементы конструкции ЧЭ имеют вертикальные боковые стенки.

Токопроводящий слой из пленки алюминия толщиной 0,5 мкм сформирован на верхней поверхности всего чипа. Внешние контактные площадки 4 для проводного соединения секторов с электрической схемой расположены на основании чипа. Между проводниками от соседних сегментов кольца (всего восемь сегментов) имеется экранирующий проводник, разделяющий эти проводники.

На поверхности чипа сформированы восемь идентичных токопроводящих петель, изолированных от подложки, каждая из которых в виде токопроводящей шины начинается от контактной площадки, далее следует вдоль поверхности подвеса, затем вокруг

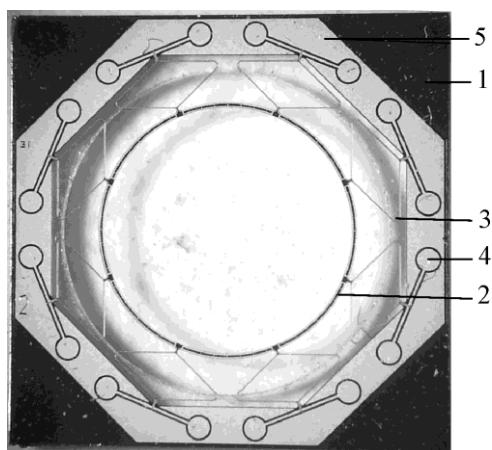


Рис.3. Фотография ЧЭ КМГ: 1 – основание; 2 – резонатор (кольцо); 3 – подвесы в виде ромбов; 4 – контактные площадки токопроводящих шин; 5 – экран

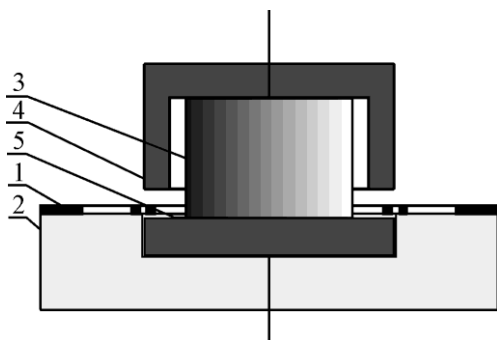


Рис.4. Структура чипа КМГ в собранном виде: 1 – ЧЭ; 2 – основание; 3 – магнит; 4 – верхний полюс магнита; 5 – нижний полюс магнита

1/8 сегмента кольца, вдоль поверхности следующего подвеса и заканчивается на другой контактной площадке. Каждый подвес содержит два проводника, между которыми располагается третий проводник, соединенный с контактной площадкой, образующей электрическое соединение с металлизацией основания (землей). Назначение третьего проводника – минимизировать емкостную связь между двумя проводниками смежных петель. Кремниевая подложка также заземлена для уменьшения емкостной связи. Контроль качества и работоспособности ЧЭ, проводимый до герметизации, включает измерение электрического сопротивления токопроводящих шин. Измерение осуществляется на зондовом устройстве с использованием мультиметра UNI-T UT-60G.

Для изготовления ЧЭ использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ 4,5. Форма чипа ЧЭ квадратная, габаритные размеры чипа $10,0 \times 10,0 \times 0,1$ мм. На рис.4 приведена структура чипа КМГ в собранном виде. ЧЭ 1 соединен со стеклянным основанием 2 методом анодного сращивания. Состав стекла основания выбран таким образом, чтобы коэффициенты термического расширения стекла и кремния практически совпадали. Резонатор ЧЭ остается в подвешенном состоянии в магнитном поле, образованном магнитом 3, с верхним 4 и нижним 5 полюсами, изготовленными из магнитомягкого

материала. Для изготовления магнитопровода, состоящего из крышки и подставки, использован магнитомягкий материал (исходным материалом является сталь-10). Магнитная цепь разработана так, чтобы на поверхности резонатора образовалось максимальное магнитное поле в зоне расположения резонатора, а следовательно, и проводников.

Для контроля параметров микрогироскопов в процессе их корректировки применялось следующее оборудование: блок контроля параметров (измерительное устройство, цифровой 16-канальный осциллограф, генератор), соединенный с компьютером; измерительное устройство, которое реализует схему измерений (см. рис.2), принимает, усиливает и передает сигнал от КМГ на осциллограф. Цифровой сигнал с осциллографа передается в компьютер для обработки.

Необходимость балансировки и ее реализация. Балансировка образцов микрогироскопов может быть осуществлена посредством удаления массы в отдельных сегментах кольца или карданного элемента, или инерционной массы камертона, или другого элемента конструкции в зависимости от используемого принципа действия микрогироскопа и, соответственно, состава конструктивов прибора. Балансировку элементов МЭМС можно проводить с использованием прецизионных методов, таких как лазерная обработка, локальное химическое травление, локальное ионно-плазменное травление, локальное удаление или осаждение массы.

Для удаления массы из сегментов кремниевого кольца при балансировке применялась лазерная установка и специально разработанная оснастка для размещения при балансировке ЧЭ КМГ, а также для снятия и установки магнитопровода. Балансировка КМГ и работа с измерительным устройством осуществляются следующим образом.

1. Измерение частот рабочих сигналов КМГ $F_1 = f_0$ (см. формулы (1)–(4) и рис.2,а) и $F_2 = f_0$ (см. формулы (1)–(4) и рис.2,б).
2. Определение разности частот ΔF .
3. Формирование отверстий в ЧЭ КМГ с помощью лазера.
4. Измерение параметров после первого цикла формирования отверстий, оценка результатов измерений.
5. Выполнение второго цикла пробивки отверстий.
6. Измерение параметров после второго цикла формирования отверстий, оценка результатов измерений.
7. Повторение пунктов 5, 6 при необходимости до достижения разности частот меньше 0,2 Гц.

Перед проведением балансировки верхний магнитопровод снимали с чувствительного элемента (перед каждым циклом пробивки отверстий лазером), а после окончания пробивки магнитопровод устанавливали на место, после чего измеряли частоты F_1 и F_2 . В табл.1 представлены результаты выполнения работ по балансировке для одного из образцов КМГ.

Таблица 1

Результаты балансировки образца КМГ

Номер пробивки	Номер сегмента								F_1 , Гц	F_2 , Гц	ΔF , Гц
	1	2	3	4	5	6	7	8			
	Количество отверстий										
1	2	–	2	–	2	–	2	–	14380,36	14378,52	1,84
2	1	–	1	–	1	–	1	–	14380,64	14382,37	–1,73
3	–	1	–	1	–	1	–	1	14381,88	14382,89	–1,0
4	1	–	1	–	1	–	1	–	14383,44	14383,26	0,18
5	–	1	–	1	–	1	–	1	14383,64	14383,66	–0,02

При разности частот менее 0,05 Гц (в табл.1 – 0,02 Гц) ЧЭ микрогироскопа может быть признан пригодным к эксплуатации.

Упрощенная схема процесса балансировки КМГ представлена на рис.5.

На рис.6 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образцов КМГ до и после выполнения балансировки. На рис.6 кривые 1 и 2 – АЧХ, снятые от обмоток, расположенных под углом 90° по отношению друг к другу (электроды 10 и 11 или 2 и 3 и перпендикулярно им расположенные электроды 6 и 7, 14 и 15, см. рис.2), кривая 3 – АЧХ сигнала от внешнего генератора. Период колебаний у кривых 1–3 одинаковый и соответствует частоте примерно 14 кГц. Для неотбалансированного образца максимумы кривой 3 несколько сдвинуты относительно точек пересечения кривых 1 и 2 (см. рис 6,а). После проведения балансировки с учетом погрешностей максимумы кривой 3 и точки пересечения кривых 1 и 2 практически должны совпадать (рис.6,б). Сдвиг фаз кривых 1 и 2 по отношению к кривой 3 для неотбалансированного образца связан с неравенством масс отдельных сегментов кольца, что вызвано погрешностями изготовления кольца, в частности погрешностями плазмо-химического травления, использованного для его получения. В результате балансировки происходит выравнивание масс отдельных сегментов кольца. Приведенные АЧХ используются для контроля качества балансировки в процессе проведения и по ее окончании.

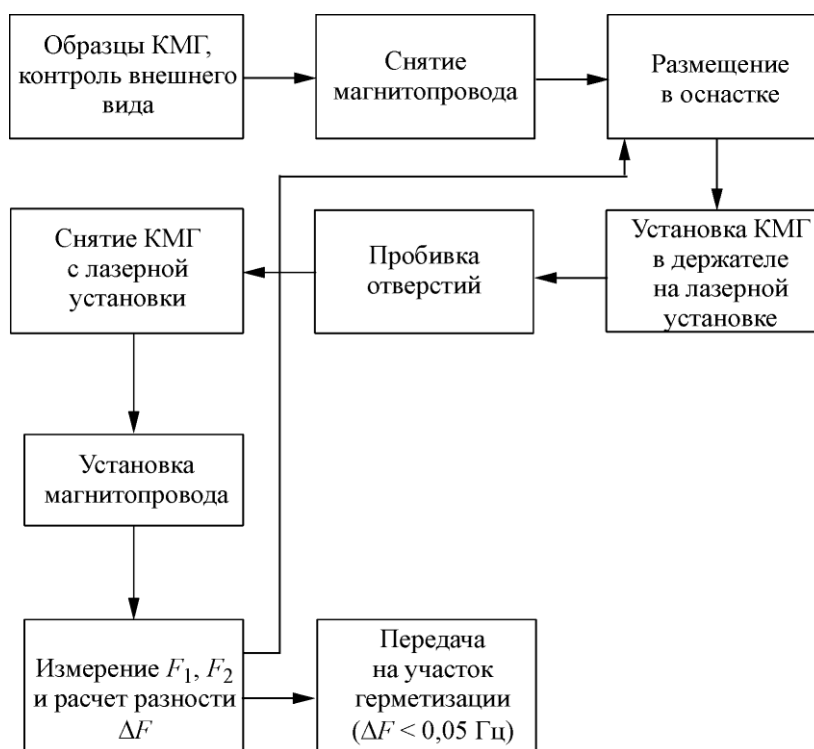


Рис.5. Алгоритм процесса балансировки образцов КМГ

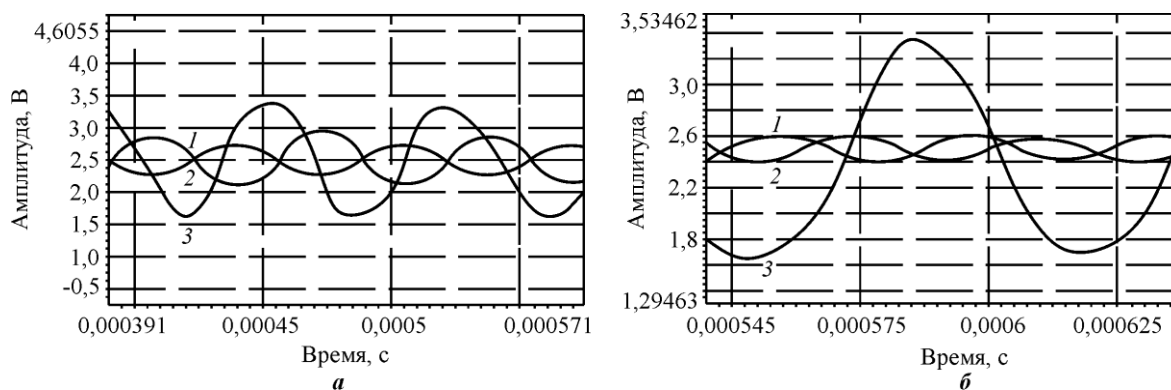


Рис.6. Амплитудно-частотная характеристика КМГ в нормальном положении адаптера: а – до балансировки; б – после балансировки (1 и 2 – АЧХ от обмоток, расположенных под углом 90° по отношению друг к другу, 3 – АЧХ от внешнего генератора)

Результаты экспериментов и их обсуждение. Проведен эксперимент по определению влияния кристаллографической ориентации плоскости поверхности кольца на собственную частоту колебаний кольца. При смещении выводов сегментов кольца относительно исходного положения на угол 45° для исследованных образцов изменение собственной частоты колебаний оказалось незначительным, много меньше установленной погрешности при балансировке.

Для исследования влияния внутрикорпусного давления на параметры КМГ получены экспериментальные образцы КМГ, загерметизированные при разном контролируемом давлении. Герметизация осуществлялась лазерной сваркой по периметру металло-стеклянного корпуса в условиях вакуума. Перед герметизацией проводилась термотренировка при температуре 85°C в течение 5 ч. Полученные результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

**Параметры экспериментальных образцов КМГ
при разном давлении внутрикорпусной среды**

Давление P , мм рт. ст	Резонансная частота $f_{рез}$, Гц	Амплитуда колеба- ний A , В	Добротность Q , отн. ед.
762	14023,9	0,21	2062
$4 \cdot 10^{-1}$	14026,3	0,63	5300
$1,5 \cdot 10^{-1}$	14027,9	1,09	8767
$1 \cdot 10^{-2}$	14030,0	1,11	10791
$1 \cdot 10^{-5}$	14033,7	1,42	14536

Из полученных данных видно, что резонансная частота образцов КМГ меняется весьма незначительно при изменении давления. Амплитуда колебаний и добротность существенно меняются. Эти параметры с уменьшением давления увеличиваются примерно в 7 раз, что может быть объяснено влиянием газового демпфирования на колебательный процесс [6–8].

Для получения достаточно низкого демпфирования необходимо создание глубокого вакуума (на уровне 10^{-3} мм рт.ст. и ниже) [8]. Обеспечение такого уровня вакуума требует обезгаживания всех конструктивных элементов, находящихся в герметизируемом объеме, для уменьшения влияния газовыделения в течение всего срока эксплуатации и хранения приборов. Однако это имеет негативные последствия – увеличиваются габаритные размеры и повышается стоимость приборов.

Экспериментальная зависимость выходного сигнала КМГ от угловой скорости представлена на рис.7. Выходная характеристика обладает хорошей линейностью (не хуже 0,2%), с ее помощью можно с высокой точностью определять угловую скорость объектов, на которых устанавливаются образцы микрогироскопов.

Вопрос о точности выполняемых с помощью микрогироскопов измерений относится к наиважнейшим. При его рассмотрении следует учесть следующие соображения.

КМГ – это преобразователь информации, который в общем смысле преобразует угловую скорость в электрическое напряжение. Аналогичным образом АЦП или ЦАП преобразует напряжение в код или обратно. Однако это слишком общие формулировки. По своей сути КМГ более сложное устройство, состоящее из нескольких преобразователей. Если разобрать принцип работы КМГ более подробно, то угловая скорость как входное воздействие пропорциональна электрическому току, затрачиваемому на уравновешивание кольцевого резонатора, т.е. минимизацию разности фаз двух колебательных контуров. В каждом из колебательных контуров есть электромагнитная возбуждающая часть и магнитоэлектрическая часть, формирующая обратную связь. Для реализации этой сложной схемы преобразования механических колебаний требуется последовательно несколько раз конвертировать аналоговую информацию в различные формы (при помощи фильтров модуляторов, демодуляторов, усилителей и т.д.).

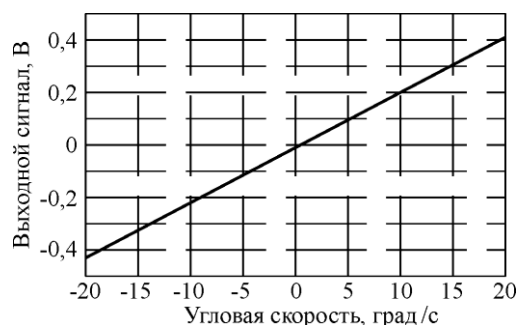


Рис.7. Экспериментальная зависимость выходного сигнала КМГ от угловой скорости

Одним из важнейших факторов, влияющих на нелинейность передаточной характеристики КМГ, является симметричность и сбалансированность кольцевого резонатора, которые и достигаются с помощью балансировки. Но, кроме этого, на нелинейность прибора влияют нелинейности передаточной характеристики операционных усилителей, искажение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик многочисленных фильтров, входящих в состав тракта обработки сигнала, и многое другое. Если проводить аналогию с цифровым преобразованием, то эта схема прибора эквивалентна сложной системе из нескольких каскадов: АЦП – вычислитель – ЦАП. Очевидно, что нелинейность передаточной характеристики у такой системы будет много хуже, чем нелинейность только одного АЦП. Типичная нелинейность одного из лучших в мире КМГ cm100 составляет 0,6 % [9]. Поэтому нелинейность КМГ 0,2 % действительно позволяет измерять угловую скорость с высокой точностью.

Кроме того, искажения передаточной характеристики, которые проявляются на краях диапазона измерения, имеют некоторую закономерность и их удается линеаризовать программным путем (если добавить к одному или нескольким КМГ вычислитель). В МИЭТ на кафедре микроэлектроники удалось получить нелинейность передаточной характеристики 0,0019 % после программной линеаризации.

Таким образом, результаты исследования показали необходимость выполнения балансировки образцов КМГ в процессе их изготовления. Разработанный и экспериментально апробированный алгоритм проведения балансировки позволил изготовить ДУС (КМГ) с заданными параметрами и высокой точностью измерений.

По результатам исследования может быть рекомендовано оптимальное значение остаточного давления в корпусе КМГ (не хуже $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.), добиваться которого необходимо при герметизации, обеспечивающее высокую добротность микрогироскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 14.575.21.0069). Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0069.

Литература

1. Микросистемная техника. Моделирование, технология, контроль: сб. науч. тр. / *Под ред. С.П. Тимошенкова*. – М.: МИЭТ, 2007. – 208 с.
2. *Комченков В.И., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И.* Методика построения роботизированных безэкипажных объектов наземного базирования // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140).
3. Исследование влияния эксплуатационных факторов на функциональные параметры и характеристики микроэлектромеханических устройств / *С.П. Тимошенков, В.Ф. Шилов, А.Н. Бойко и др.* // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2006. – № 2. – С. 7–12.
4. *Егармин Н.Е.* Свободные и вынужденные колебания вращающегося вязкоупругого кольца // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1986. – № 2. – С. 150–154.
5. *Липатников В.И., Матвеев В.А.* Система съема информации твердотельного волнового гироскопа // Вестник МГТУ им. Н.Баумана. – 1997. – № 1. – С. 109–113.
6. *Тимошенков С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М.* Методика оценки параметров чувствительных элементов микроакселерометров и микрозеркал // Изв. вузов. Электроника. – 2007. – № 5. – С. 23–29.
7. *Тимошенков С., Бойко А., Симонов Б.* Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – №1. – С. 80–82.
8. *Распопов В.Я.* Гироприборы и системы управления ракет ближней тактической зоны. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – 248 с.
9. http://c1170156.r56.cf3.rackcdn.com/UK_SSI_CRM100_1DS.pdf (дата обращения: 15.01.2014)

Статья поступила
22 января 2014 г.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники (МЭ) МИЭТ. *Область научных интересов:* изделия микросистемной техники, микроэлектромеханические приборы и системы, разработка конструкций и технологий изготовления микро- и наноэлектронной аппаратуры.

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* изделия микросистемной техники, микроэлектромеханические приборы и системы, разработка конструкций и технологий изготовления микро- и наноэлектронной аппаратуры. **E-mail: serborsel@mail.ru**

Бритков Олег Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* микросистемная техника, микроэлектромеханические приборы и системы, микро- и наноэлектронная аппаратура.

Анчутин Степан Александрович – ведущий инженер кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* микросхемотехника, конструирование изделий микросистемной техники.

Тимошенко Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, инженер кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* микромеханические датчики, изделия микросистемной техники, микроэлектромеханические системы, системы ориентации.

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал

RUSSIAN MICROELECTRONICS

English translation of selected articles from

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika. –

Vol. 43, No. 7, 2014. - ISSN: 1063-7397



<http://www.maik.ru>

<http://www.springerlink.com>