

УДК 531.383-11:531.714.7

В. Г. ПЕШЕХОНОВ, Я. А. НЕКРАСОВ, П. ПФЛЮГЕР, Ц. КЕРГЕРИС, Х. ХАДДАРА,
А. ЭЛЬСАЙЕД

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСТАНОВОЧНОЙ ПАРТИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ RR-ТИПА

Представлены результаты разработки компенсационного микромеханического гироскопа RR-типа, состоящего из бескорпусного чувствительного элемента и специализированной интегральной микросхемы. Испытания партии из 50 гироскопов показали, что плотность шума гироскопа при диапазоне измерения $100^\circ/\text{с}$ не превышает $0,01^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$, а для диапазона $400^\circ/\text{с}$ не выше $0,015^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$. Некоторые гироскопы имели плотность шума ниже $0,003^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ при нестабильности нуля $1-2^\circ/\text{ч}$.

Введение

ЦНИИ «Электроприбор» совместно с Tronic's Microsystems (Франция) ведет разработку микромеханического гироскопа (ММГ) с инерционной массой в форме диска с 2001 г. К 2004 г. была разработана конструкция микромеханического чувствительного элемента (МЧЭ), ориентированного на технологию «кремний на изоляторе» (КНИ), создана устойчивая технология изготовления МЧЭ, вакуумируемого в керамическом корпусе, и макетная аналоговая электроника, позволившая экспериментально подтвердить работоспособность ММГ [1].

К 2008 г. были внесены изменения в конструкцию МЧЭ, созданы две модификации ММГ (ММГ-1 и ММГ-2), отличающиеся по конструкции и составу электронной части, разработаны и экспериментально проверены инерциальный измерительный модуль с ММГ-2 и интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации на основе ИИМ, созданы первые образцы бескорпусных МЧЭ с вакуумированием на уровне кристалла [2, 3].

С конца 2008 г. ЦНИИ «Электроприбор» и Tronic's Microsystems приступили к созданию промышленных образцов ММГ на основе бескорпусных МЧЭ и заказной интегральной микросхемы, к разработке которой была при-

Пешехонов Владимир Григорьевич. Доктор технических наук, профессор, академик РАН, генеральный директор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Президент Академии навигации и управления движением.

Некрасов Яков Анатольевич. Кандидат технических наук, начальник сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Пфлюгер П. Доктор технических наук, директор Tronics Microsystems, Франция.

Кергерис Ц. Доктор технических наук, ведущий инженер Tronics Microsystems.

Хаддара Х. Доктор технических наук, директор Si-Ware Systems, Египет.

Эльсайед А. Доктор технических наук, менеджер по разработке интегральных схем Si-Ware Systems.

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

влечена фирма Si-Ware Systems (Египет). В этот период были разработаны и экспериментально проверены для этих МЧЭ алгоритмы компенсации квадратурной помехи, автоматической подстройки разности резонансных частот контуров первичных и вторичных колебаний, компенсационный режим работы ММГ и режим работы с совмещенными резонансными частотами. Tronic's Microsystems и Si-Ware Systems разработали на ПЛИС ф. Xilinx прототип специализированной интегральной схемы и саму схему, были так же проработаны вопросы размещения в одном корпусе МЧЭ и специализированной интегральной схемы.

В начале 2010 г. была изготовлена экспериментальная партия гироскопов с разной величиной зазора между электродами и подвижной массой.

Размер зазора между подвижной массой и электродами канала вторичных колебаний существенно влияет на характеристики ММГ. Уменьшение зазора позволяет увеличить чувствительность ЧЭ, но при этом возрастает влияние на стабильность характеристик ММГ разных факторов, таких как температура, вибрация и т.п., которые могут приводить к изменению зазора. По результатам испытания этой партии была определена оптимальная величина зазора, при которой была получена величина плотности шума гироскопа на уровне $0,01 \text{ } ^\circ\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$.

С оптимальной величиной зазора были изготовлены установочная партия ММГ, из которой были отобраны и испытаны 50 экземпляров с наименьшими значениями плотности шума. Из-за наличия в выходном сигнале ММГ нестационарных шумов, белого и $1/f$ шума для обработки данных использовалась вариация Аллана [4]. Результаты испытаний ММГ представлены в данной статье.

Микромеханический чувствительный элемент ММГ

Подвижная масса МЧЭ с элементами подвеса и гребенчатой электродной структуры показана на рис. 1. Для изготовления МЧЭ используются две пластины кремния (из которых формируются основание и крышка) и одна КНИ-пластина, из которой путем глубокого реактивного ионного травления изготавливаются подвижная масса, представляющая собой диск толщиной 60 мкм и диаметром 1,5 мм, гребенчатая электродная структура и торсионы [1]. Упрощенный вид поперечного сечения МЧЭ приведен на рис. 2. Во внутренней полости МЧЭ находится геттер (см. рис. 2).

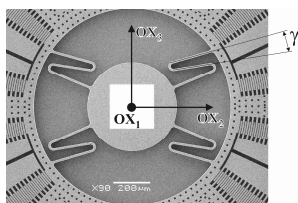


Рис. 1. Упругий подвес подвижной массы МЧЭ

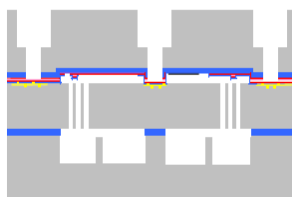


Рис. 2. Поперечное сечение МЧЭ

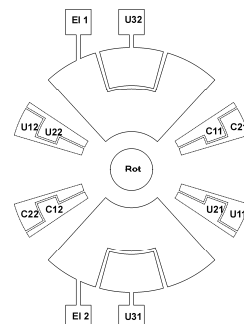


Рис. 3. Электродная структура канала вторичных колебаний МЧЭ

Электродная структура в канале вторичных колебаний (рис. 3) содержит две пары электродов, одна из которых предназначена для измерения перемещений подвижной массы, а вторая – для формирования момента, компенсирующего кориолисово ускорение. Толщина изоляционного слоя между проводящим слоем кремния крышки и этими электродами была увеличена с первоначальных 0,25 до 2 мкм для уменьшения паразитных емкостей между электродами.

Типовые значения добротности подвесов подвижной массы МЧЭ составляют более 10^5 по оси первичных колебаний (Q_1) и 10^4 по оси вторичных колебаний (Q_2). Резонансная частота подвеса в канале первичных колебаний составляет 3,2 кГц, в канале вторичных колебаний выше на 5-6%. За счет изменения разности напряжений между подвижной массой и электродами в канале вторичных колебаний величина указанной разности может быть сведена к нулю.

Для формирования канала первичных колебаний используются электроды с гребенчатой структурой ($C_{11} - C_{22}$ для измерения перемещения подвижной массы вокруг оси Z, и $U_{11} - U_{22}$ для формирования управляющих напряжений). Предельный угол поворота подвижной массы в этом МЧЭ ограничен стопорами на уровне 1,4 – 1,5°; амплитуда первичных колебаний устанавливается на уровне 1°.

Специализированная интегральная схема для ММГ

Специализированная интегральная микросхема (ИС) выполнена по технологии КМОП (0,13 мкм) в кристалле 5×5,6 мм.

Функционально ИС может быть разделена на 8 блоков:

- интерфейс для связи с МЧЭ, который обеспечивает возбуждение емкостных датчиков перемещения ПМ, формирование управляющих напряжений на электродах каналов первичных и вторичных колебаний и преобразование изменений емкостей в напряжение;
- цифровое процессорное ядро, в котором осуществляется управление интерфейсом, компенсация температурных погрешностей в выходном сигнале ММГ, децимация и фильтрация сигналов дельта–сигма модуляторов, реализация регулятора канала первичных колебаний и демодуляция выходного сигнала в канале вторичных колебаний;
- температурный датчик с цифровым выходом;
- сигма–дельта модулятор канала первичных колебаний для преобразования аналог–код выходного сигнала преобразователя емкость–напряжение;
- сигма–дельта модулятор канала вторичных колебаний для формирования силового сигнала обратной связи в этом канале;
- ФАПЧ для формирования задающего тактового генератора;
- цепи формирования источников тока для всех каскадов, малошумящих опорных источников напряжений;
- блок управления мощностью, формирующий необходимые напряжения питания.

Канал вторичных колебаний построен с использованием электромеханического сигма-дельта модулятора 4-го порядка (в дополнение к механическому резонатору введен электронный фильтр второго порядка). Блок-схема канала приведена на рис. 4. Такая структура была предложена и подробно описана в работе [6]. В этом канале введена глубокая обратная связь по углу α , которая практически исключает угловые колебания подвижной массы вокруг оси ($\alpha \approx 0$). Для формирования момента, компенсирующего воздействие ускорения на подвижную массу, в ИС формируются напряжения, которые поступают к электродам U31, U32. Благодаря этой связи ММГ работает в компенсационном режиме.

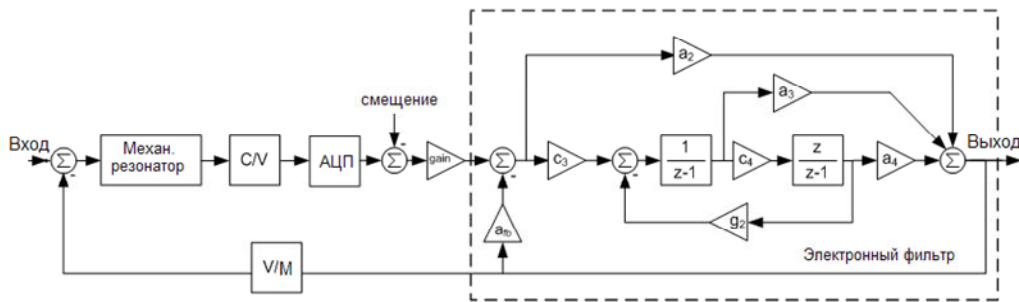


Рис. 4. Блок-схема канала вторичных колебаний

Структура канала первичных колебаний, схема каскадов преобразования емкость-напряжение приведены в работе [7].

Мощность, потребляемая ИС и ММГ, не превышает 0,5 Вт.

Микромеханический гироскоп

ММГ выполнен в виде сборки из МЧЭ и интегральных схем, расположенных в корпусе ЛСС36. Эта сборка представлена на рис. 5.

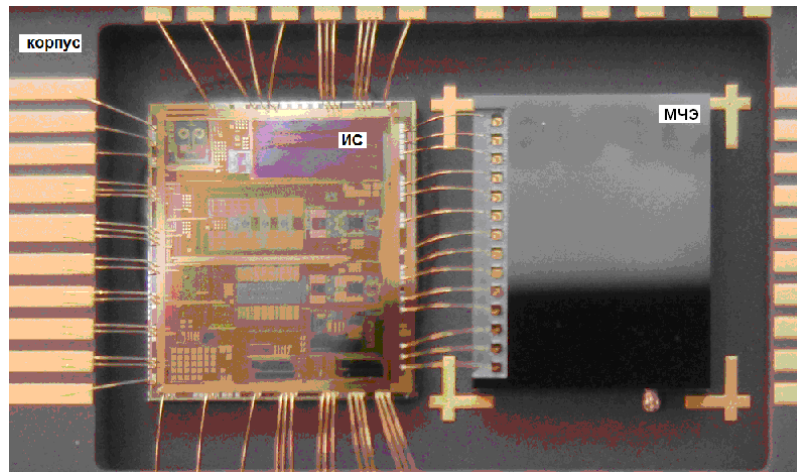


Рис. 5. Фотография ММГ в корпусе

Для уменьшения длины проводников между ИС и МЧЭ контактные площадки в элементе выполнены с одной стороны, ближней к ИС.

Настройка ММГ выполняется в автоматическом режиме с помощью специализированной программы, выполненной в виде виртуального инструмента с использованием программы LabView. Передняя панель инструмента приведена на рис. 6.

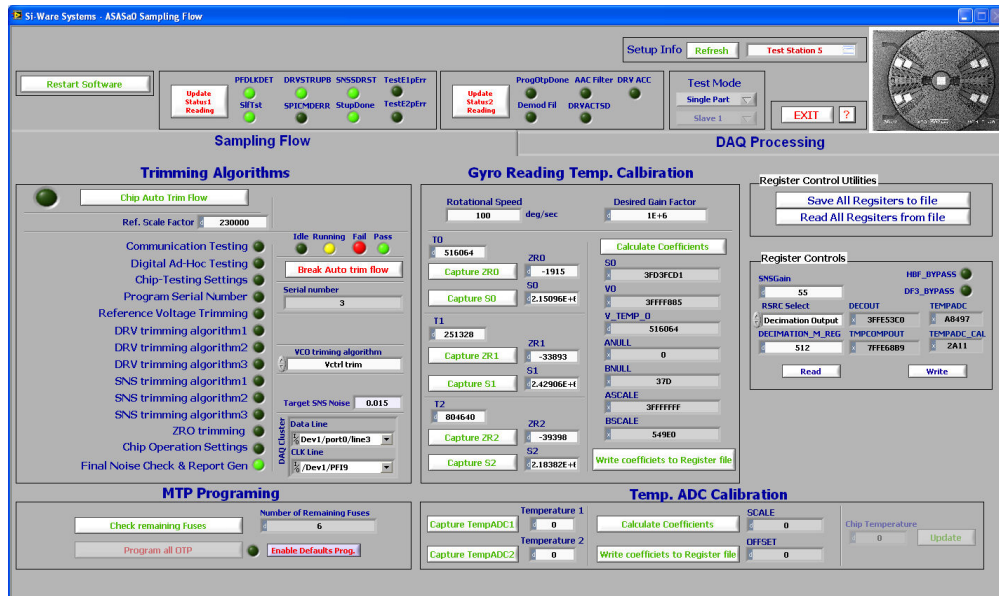


Рис. 6. Панель виртуального инструмента для настройки и калибровки ММГ

Настройка включает в себя следующие процедуры:

- тестирование МЧЭ;
- выбор оптимального коэффициента усиления корректирующего звена в канале первичных колебаний;
- подстройка резонансной частоты подвеса подвижной массы по оси вторичных колебаний, параметров фильтров в канале вторичных колебаний;
- подстройка смещения нуля и масштабного коэффициента ММГ;
- генерация загружаемого в память ИС кода, соответствующего настроенным параметрам ММГ;
- температурная калибровка ММГ и генерация загружаемого в память ИС кода.

В ММГ для коррекции смещения нуля и масштабного коэффициента используются полиномы 2-го порядка. Эти коэффициенты определяются при помощи упомянутого виртуального инструмента при установке ММГ на стенде вращения с термокамерой.

Для повышения стабильности характеристик изготовленные ММГ подвергались многократному термоциклированию.

Результаты испытаний

Типичный вид вариации Аллана [8] для испытуемых ММГ приведен на рис. 7, а. Он соответствует образцам с диапазоном измерения $100^\circ/\text{с}$. По графику можно определить, что плотность шума такого ММГ находится на уровне $0,01^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$, нестабильность нуля в пуске не превосходит $10^\circ/\text{ч}$. Отдельные образцы имели уровень шума $0,002-0,003^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$, нестабильность нуля $1-2^\circ/\text{ч}$ (рис. 7, б).

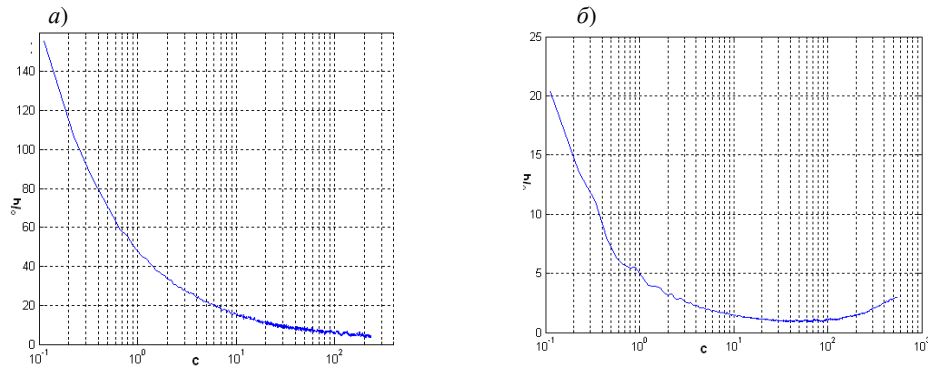


Рис. 7. Вариации Аллана (типичный вид) (а), для малошумящих образцов ММГ (б)

Испытания показали, что повышение температуры окружающей среды до 85°C не приводит к существенному ухудшению вида кривой вариации Аллана, а для отдельных образцов эта кривая при той же температуре оказывалась ниже, чем при 20°C (рис. 8).

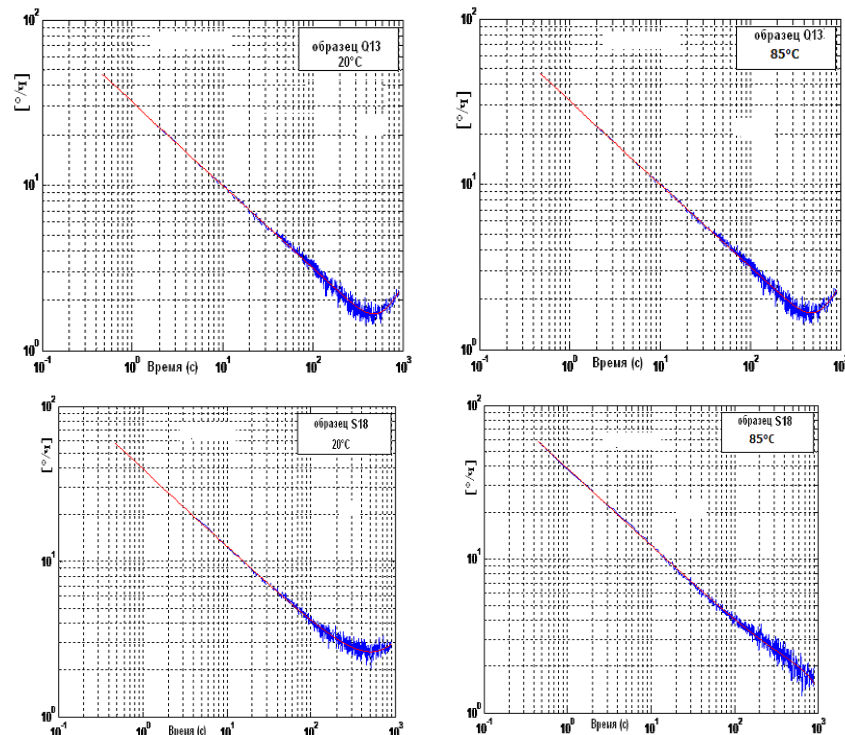


Рис. 8. Вариация Аллана при температуре 20°C и 85°C для двух образцов ММГ

Для проверки возможности увеличения диапазона измерения ММГ три образца были запрограммированы на диапазон $400^\circ/\text{с}$. Плотность шума оказалась ниже $0,015^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Испытания этих образцов на стенде вращения при задании колебательно-го режима с частотой 3 Гц и амплитудой угловой скорости $400^\circ/\text{с}$ показали, что форма и величина выходного сигнала ММГ (рис. 9) соответствуют задаваемой угловой скорости.

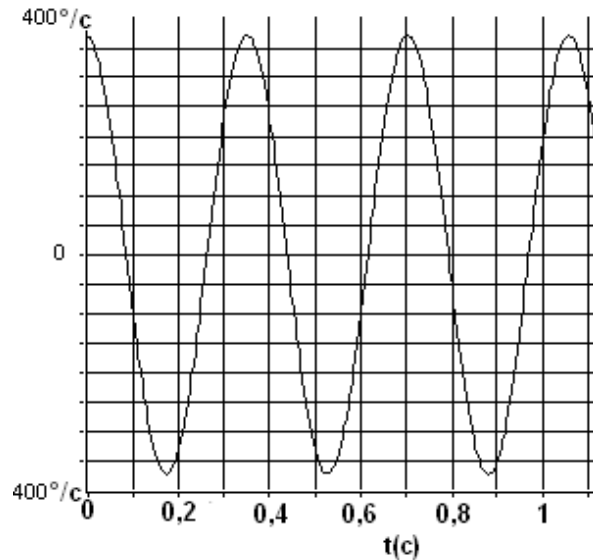


Рис. 9. Форма выходного сигнала ММГ при с максимальной угловой скорости $400^\circ/\text{с}$

Средняя величина плотности шума по 50 образцам оказалась равной $0,009^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ при стандартном отклонении от нее $0,003^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Оценка нестабильности нуля ММГ от включения к включению была проведена по шести образцам, три из которых имели шум на уровне $0,006^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ и ниже, а другие три на уровне $0,013^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Нестабильность нуля ММГ от пуска к пуску была ниже $100^\circ/\text{ч}$ для образцов с уровнем шума ниже $0,006^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ и около $200^\circ/\text{ч}$ для трех других образцов. Выходные сигналы для шести образцов ММГ (три с низким уровнем шума и три с высоким) при включении и выключении через 30 мин приведены на рис. 10.

Таким образом, можно полагать, что образцы с меньшим уровнем шума будут иметь меньшую величину нестабильности нуля.

Эта тенденция видна и для величины смещения нуля в рабочем диапазоне температур, средняя величина которого составила $0,4^\circ/\text{с}$ при стандартном отклонении $0,19^\circ/\text{с}$. У 50% образцов с шумом $0,006^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ и ниже смещение нуля в рабочем диапазоне температур было ниже $0,2^\circ/\text{с}$, и ее минимальное значение $0,07^\circ/\text{с}$ оказалось у образца из этой группы. Для нелинейности масштабного коэффициента были получены следующие значения: средняя величина $0,14\%$ при стандартном отклонении $0,076\%$.

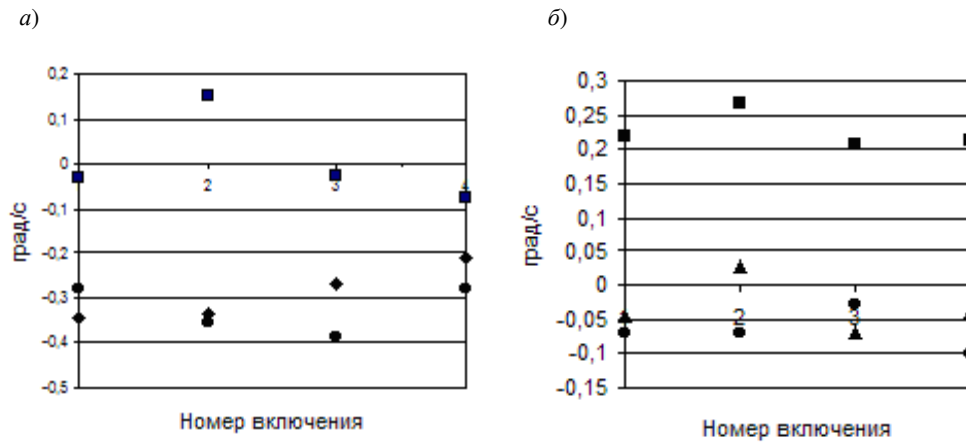


Рис. 10. Изменения нулевого сигнала ММГ от пуска к пуску: для образцов с пониженным уровнем шума (а); для образцов с повышенным уровнем шума (б)

Изменение масштабного коэффициента ММГ в рабочем диапазоне температур составило 1,2% при стандартном отклонении 0,44% (табл. 1).

Таблица 1

	Нелинейность масштабного коэффициента, %	Смещение нуля в рабочем диапазоне температур, °/с	Изменения масштабного коэффициента в рабочем диапазоне температур, %	Плотность шума, °/с/√Гц
Средняя величина (по 50 образцам)	0,14	0,4	0,52	0,011
Стандартное отклонение от средней величины	0,076%	0,19°/с	1,2%	0,004

На рис. 11 приведены вариации Аллана для двух исследуемых ММГ, один из которых имеет типичные для данной партии гироскопов характеристики, а второй – лучший из партии по уровню шума. Здесь же даны графики вариации Аллана для ММГ ADIS1630 (фирма Analog Devices) и STIM202 (норвежская фирма Sensorog) [9, 10].

Как видно из рисунка, характеристики разработанных ММГ близки к шумовым характеристикам наиболее точного ММГ ф. Analog Devices. А образец ММГ (N18) из изготовленной партии оказался лучше, чем STIM202 в диапазоне времени от 0,1 до 100 с (кривая вариации Аллана в этом диапазоне находится ниже). Можно отметить, что STIM202 является одним из самых точных ММГ, представленных на российском рынке.

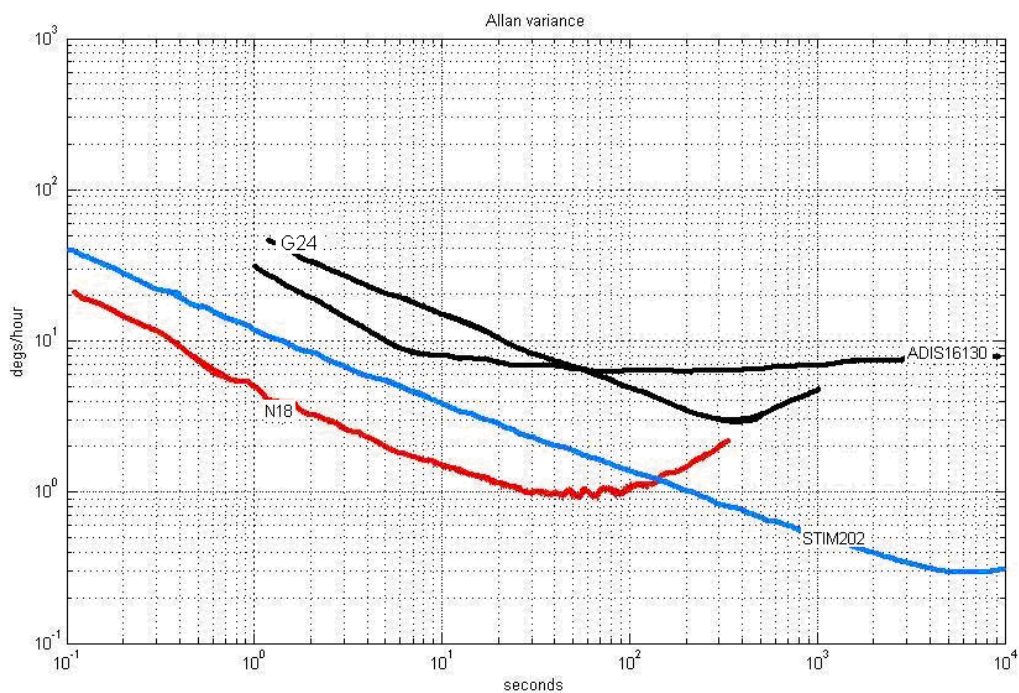


Рис. 11. Графики вариации Аллана для ММГ фирм Analog Devices (ADIS1630), Sensoror (STIM202) и двух ММГ (№ G24 и N18) из изготовленной партии

В табл. 2 приведены характеристики ММГ, полученные при испытаниях, а также ожидаемые к концу 2011 г.

Таблица 2

Параметр	Значения	
	Полученные при испытании образцов ММГ	Ожидаемые к концу 2011 г.
Диапазон измерений, °/с	± 100 (± 400 для 3 образцов)	± 400
Полоса пропускания, Гц	0-40	0-200
Плотность шума, °/с/√Гц	0,01	0,01
Нестабильность смещения нуля (по вариациям Аллана) при комнатной температуре в отсутствие вибраций, °/ч	10	10
Рабочая температура, °С	-40 ... +85	-40 ... +85
Рабочее напряжение, В	5	5
Потребляемая мощность, Вт	0,5	0,5
Форма выходного сигнала	Цифровая с протоколом SPI	

Повышение точности ММГ RR-типа

В создаваемых в последнее время ММГ для повышения точности используются различные средства. Одним из них является введение глубокой обратной связи в канале вторичных колебаний, обеспечивающей компенсационный режим работы ММГ. Для этого используют дополнительные фильтры, настроенные на частоту первичных колебаний, дельта-сигма модуляторы для формирования сигнала обратной связи [4]. Эти решения уже использованы в описанном ММГ.

Дополнительно формируются каналы подавления или компенсации квадратурной помехи, автоматической подстройки резонансной частоты подвеса подвижной массы по оси вторичных колебаний [9, 10].

Использование этих мер позволило фирмам Thales и LITEF создать экспериментальные образцы многомассовых ММГ LL-типа, обладающих уникальными характеристиками (соответственно 0,01 и $0,2^\circ/\sqrt{\text{ч}}$) для случайного блуждания по углу и нестабильности нулевого сигнала в пуске $<0,1$ и $<1^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

На рис. 12 приведены графики вариаций Аллана для экспериментального ММГ фирмы Thales и ММГ для прототипа инерциального измерительного модуля на микромеханических датчиках [11, 12].

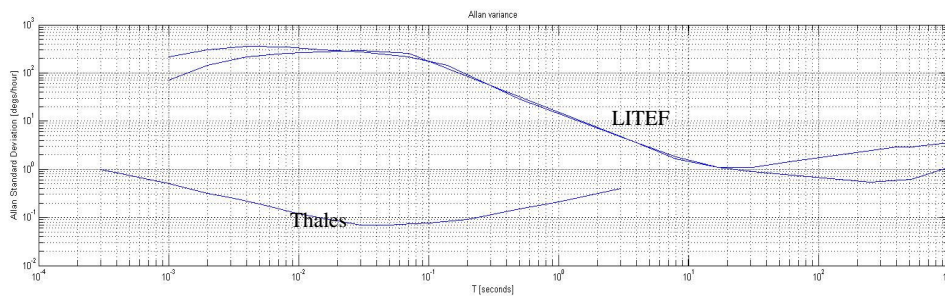


Рис. 12. Вариации Аллана для экспериментальных ММГ фирм Thales и LITEF

Исследованы следующие возможности повышения точности ММГ RR-типа:

- формирование напряжений на электродах для создания моментов, компенсирующих квадратурную помеху [13];

- увеличение амплитуды первичных колебаний [14];

- автоматическая подстройка резонансной частоты контура вторичных колебаний на частоту первичных колебаний [15].

В настоящее время Tronic's Microsystems проводит работы по совершенствованию технологии изготовления ЧЭ и корпусирования. Эти работы направлены на увеличение выхода годных ЧЭ с пластины, снижения уровня квадратурной помехи, уменьшения температурных зависимостей параметров ММГ.

Наибольший выигрыш следует ожидать от подавления квадратурной помехи, типовое значение которой для данной партии ЧЭ находится на уровне $700\text{--}1000^\circ/\text{с}$, т. е. на порядок выше диапазона измерения ММГ.

На рис. 13, а приведена электродная структура с четырьмя электродами канала вторичных колебаний, частично расположенными над зубцовой зоной ротора [14]. В этом случае за счет выбора постоянного напряжения на одной из этих пар электродов, расположенных слева или справа от оси чувствительности ММГ (ось OX_2 на рис. 1) можно добиться компенсации квадратурной помехи. На рис. 13, б показано изменение нулевого сигнала ММГ при изменении напряжения на указанных электродах. Из графика видно, что напряжение на электродах, при котором достигается компенсация квадратурной помехи, практически не зависит от амплитуды первичных колебаний.

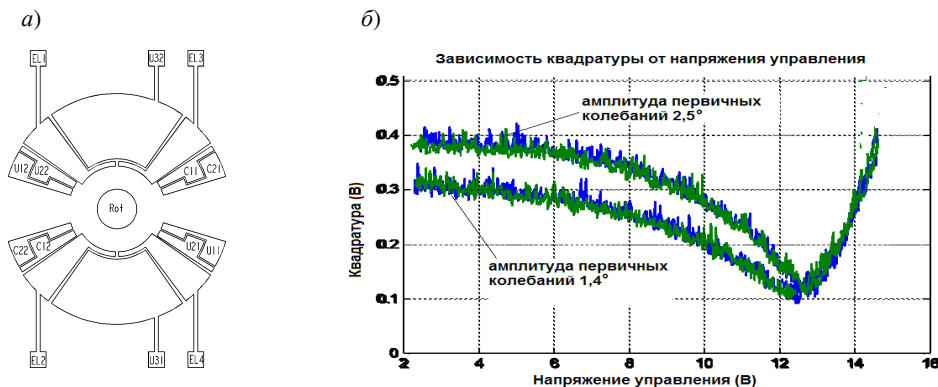


Рис. 13. Электродная структура: 6-электродная структура (а), зависимость нулевого сигнала от напряжения на паре боковых электродов при амплитуде первичных колебаний 1,5 и 2,4° (б)

Для торсионов (см. рис. 1) была проверена возможность работы при больших амплитудах первичных колебаний. Эксперименты на десяти образцах ЧЭ показали возможность увеличения амплитуды первичных колебаний более чем в 2 раза. Поскольку кориолисово ускорение пропорционально амплитуде первичных колебаний, увеличение последней повышает масштабный коэффициент ЧЭ и соответственно снижает шум, вносимый входными каскадами электроники вторичного канала. Правда при этом возрастает квадратурная помеха, шум от которой может превалировать, что снижает эффект от повышения амплитуды первичных колебаний.

Однако при компенсации квадратурной помехи с помощью дополнительных электродов отрицательные факторы будут проявляться в меньшей степени. Можно ожидать, что положительные эффекты от повышения амплитуды первичных колебаний и подавления квадратурной помехи в совокупности позволят снизить шумы ММГ данного типа в несколько раз. В этом случае типовые характеристики ММГ окажутся на уровне характеристик STIM202.

Если разность резонансных частот подвесов не зависит от температуры, то автоматическая подстройка резонансной частоты может не вводиться. В этом случае целесообразно ограничиться подстройкой частоты только при регулировке и настройке ММГ в заводских условиях. Тем не менее система автоматической подстройки частоты на основе тестового квадратурного сигнала была предложена и апробирована с 6-электродным вариантом ЧЭ [14]. Аналогичная по принципу действия система была разработана и испытана с ММГ LL-типа [16]. Таким образом, конструкция с подвижной массой

в виде диска имеет определенные возможности для повышения точности ММГ.

Заключение

ЦНИИ «Электроприбор» совместно с французской фирмой Tronic's Microsystems разработал микромеханический гироскоп класса точности $0,01^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$ на основе бескорпусного микромеханического чувствительного элемента RR-типа. К созданию специализированной интегральной микросхемы для этого гироскопа был привлечен египетский дизайн-центр (фирма Si-Ware Systems).

В настоящее время изготовлена установочная партия гироскопов и проведены их испытания. Результаты испытаний и ожидаемые к концу 2011 г. характеристики датчиков приведены в таблицах.

Сравнение исследованных микромеханических гироскопов с зарубежными датчиками повышенной точности фирм Analog Devices и Sensoror, проведенное по вариациям Аллана, показало возможность появления на российском рынке конкурентоспособных микромеханических гироскопов отечественной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Peshekhonov V. G., Nesenyuk L. P. [et al].** The Development and Test Results of a Micromechanical Disc-Shape Gyroscope. Symposium Gyro Technology 2005, Stuttgart, Germany.
2. **V.G Peshekhonov L.P., Nesenyuk [et al].** Inertial Units on Micromechanical Sensors. Development and Test Results Symposium Gyro Technology 2008, Karlsruhe, Germany.
3. **A. Filipe, J. Collet, J. Bon, S. Nicolas, C. Pisella.** Reliable Vacuum Packaging and Technologies for High Performance Custom-MEMS Gyros Symposium Gyro Technology 2008, Karlsruhe.
4. **Сирая Т.Н..** Вариация Аллана как оценка погрешности измерения //Гироскопия и навигация, №2(69).- 2010. С. 29-35.
5. **Распопов В.Я..** Микромеханические приборы, М, Машиностроение, 2007.- 400 с.
6. **Petkov V..** High-Order $\Sigma\Delta$ Interface for Micromachined Inertial Sensors. A dissertation University of California, Berkeley, Spring 2004, 103 pp.
7. **Kergueris C., Elsayed A. [et al].** High Performance Electronic Drive and Sense System for MEMS Gyros, Sensors Expo, Illinois, June 8-10, 2009.
8. **IEEE** standard specification format guide and test procedure for coriolis vibratory gyros, IEEE, Jan. 2004.
9. **ADIS16130.pdf**
10. **download-9862;2.pdf** STIM202 Multi-Axis Gyro Module DATASHEET.
11. **Zimmerman S. [et al].** Prototype of MEMS IMU for AHRS Applications, Symposium Gyro Technology 2008, Karlsruhe.
12. **Chaumet B. [et al].** A New Silicon Tuning Fork Gyroscope for Aerospace Applications, Symposium Gyro Technology 2009, Karlsruhe.
13. **Беляева Т.А.** Методы компенсации квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR-типа / Дисс. на соискание ученой степени канд. технич. н.- 2009.- 125 с.
14. **Беляев Я.В.** Методы снижения порога чувствительности микромеханического гироскопа RR-типа / Дисс. на соискание ученой степени канд. технич. н.- 2010.- 130 с.
15. **Некрасов Я.А.** Патент РФ № 2347190. Микромеханический гироскоп (варианты) и способы его настройки, основанные на использовании амплитудно-модулированного квадратурного тестового воздействия.
16. **Henry Wu.** System Architecture for Mode-Matching a MEMS Gyroscope Massachusetts Institute of Technology.

Abstract. A MEMS RR-type gyro consisting of uncased micromechanical sensors and ASIC for the gyro are presented. The results of the pilot batch tests are submitted.