

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, И. Б. ЧЕЛПАНОВ

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассмотрены вопросы обеспечения стойкости микро-механических гироскопов, функционирующих в условиях постоянных ускорений, линейной и угловой вибрации, ударных воздействий. Приведены сведения о новых разработках микромеханических гироскопов и проанализированы тенденции их развития. Отмечено, что важным направлением в конструировании микромеханических гироскопов является использование упругих систем с несколькими инерционными телами.

Введение

В настоящее время разработка микромеханических гироскопов (ММГ) низкой точности (0,01-0,5 °/с) практически завершена, сегодня ММГ выпускаются миллионами штук [1]. Основные направления деятельности различных компаний в этой области связаны со снижением массогабаритных характеристик приборов, их энергопотребления и стоимости. Компания InvenSense (США) представила малогабаритный трехосный гироскоп ITG-3200, имеющий размеры 4×4×0,9 мм, диапазон измерения до ± 2000 град/с, уровень шума 0,4 град/с и механическую прочность при ударах до 10000 g [2]. Стоимость такого гироскопа составляет 10 \$, объявленная цель – довести стоимость до 1 \$ за одну измерительную ось. Похожих результатов добились зарубежные фирмы (американские Analog Devices, Gladiator Technologies, европейские ST Microelectronics, Silicon Sensing Systems и др.), разработавшие целый ряд малогабаритных серийных ММГ для использования в различных областях [3–6]. Отечественные компании пока отстают в создании коммерчески конкурентных ММГ [7].

Повышение точности ММГ до тактического уровня (0,5-5 град/ч) связано с тщательным анализом составляющих инструментальных погрешностей прибора, в том числе с оценкой чувствительности к вибрационным и ударным воздействиям и выработкой мер по их снижению. При расширении возможностей использования ММГ на различных подвижных объектах, в том числе на высокодинамичных, рассмотрение вопросов обеспечения стойкости ММГ при механических воздействиях весьма актуально.

Особое внимание при анализе стойкости ММГ следует обращать на воздействие колебаний, так как по принципу действия конструкция практически любого подвеса основана на использовании свойств механической системы, частотные характеристики которой обладают резонансными свойствами с высокой добротностью порядка десятков тысяч или даже сотен тысяч. Это почти уни-

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Челпанов Игорь Борисович Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

кальная ситуация – из практических приложений столь высокая добротность использовалась только в генераторах с кварцевой стабилизацией частоты. Высокая добротность, достигаемая за счет выбора материала (монокристаллического кремния) и глубокого вакуумирования, используется в ММГ в контуре первичных колебаний, и только поэтому оказывается возможным применение электростатического двигателя, создающего очень малые моменты и потребляющего очень малые мощности. С другой стороны, высокая добротность контура вторичных колебаний дает возможность при совмещении частот получать достаточно низкие пороги чувствительности и высокие (правда, нестабильные) коэффициенты преобразования. Следует отметить, что высокая добротность является опасным фактором по отношению к разным источникам помех и, конечно, в первую очередь, опасны резонансы на собственных частотах.

Цель настоящей статьи – обзор актуальных разработок ММГ и анализ тенденций их развития в части обеспечения механической стойкости. Последовательно рассмотрены вопросы функционирования ММГ в условиях воздействия постоянных ускорений, линейной и угловой вибрации, ударов. В заключение рассмотрены особенности методов механических испытаний ММГ.

Постоянные воздействия

Постоянными воздействиями следует считать механические воздействия, не изменяющиеся (или почти не изменяющиеся) во времени. К таким воздействиям можно отнести постоянные по значению линейные ускорения, угловую скорость и угловое ускорение, для воспроизведения которых при испытаниях используются различные стенды.

Воздействие постоянного линейного ускорения приводит к деформациям элементов ММГ, в основном элементов упругого подвеса. Деформирование конструкции вызывает изменение зазоров в соответствующих емкостных датчиках и, как следствие, изменение характеристик ММГ – смещение нулевого сигнала и изменение коэффициента преобразования (масштабного коэффициента).

Для ММГ типа *R-R* относительное изменение масштабного коэффициента при действии постоянного ускорения W_A в направлении, перпендикулярном плоскости инерционного тела (ИТ) в виде дискового ротора, можно оценить по формуле [8]

$$\delta M/M_0 \approx 2 W_A (\omega_0^2 d_0)^{-1}, \quad (1)$$

где ω_0 – частота собственных поступательных колебаний ИТ по оси действия ускорения; d_0 – величина номинального зазора в датчике угла.

Оценка по формуле (1) не учитывает потерю плоской формы ротора, тем не менее дает удовлетворительные результаты, совпадающие с экспериментальными данными. Для прибора ММГ-2 относительное изменение масштабного коэффициента в соответствии с формулой (1) и по результатам эксперимента составляет 0,27 %/g и смещение нуля – 0,8 град/с/g по оси, перпендикулярной плоскости ротора, по двум другим ортогональным осям изменения указанных параметров на два порядка меньше [8]. Похожая ситуация наблюдается и в ММГ типа *L-L*. Так, для прибора ADXRS150 фирмы Analog Devices чувствительность к ускорению составляет 0,2 град/с/g по любой оси.

Для снижения чувствительности к постоянному линейному ускорению используют следующие основные способы:

- установка ММГ с такой угловой ориентацией, при которой направление наибольших перегрузок лежит в плоскости ИТ, а не перпендикулярно ему;
- попарная установка ММГ с параллельными измерительными осями, с тем чтобы влияние линейного ускорения было противоположным;
- комплексирование гироскопа и акселерометров в целях измерения ускорения и алгоритмической компенсации изменчивости параметров ММГ в реальном масштабе времени при предварительной калибровке коэффициентов чувствительности;
- разработка гироскопа-акселерометра для аналогичной компенсации [9];
- разработка гироскопа с компенсацией изменения зазора датчика перемещений при ускорениях основания [10];
- использование систем с несколькими ИТ (многомассовых систем) для взаимной компенсации перемещений подвижных ИТ в упругих подвесах.

В последнем случае использование двух, четырех и большего количества осцилляторов (ИТ на упругих подвесах) позволяет снизить чувствительность ММГ к постоянным ускорениям и вибрации. Конструкции таких ММГ имеют взаимосвязь между отдельными подвесами ИТ, выполненную либо механически с использованием упругих элементов, либо электрически с использованием обратных связей.

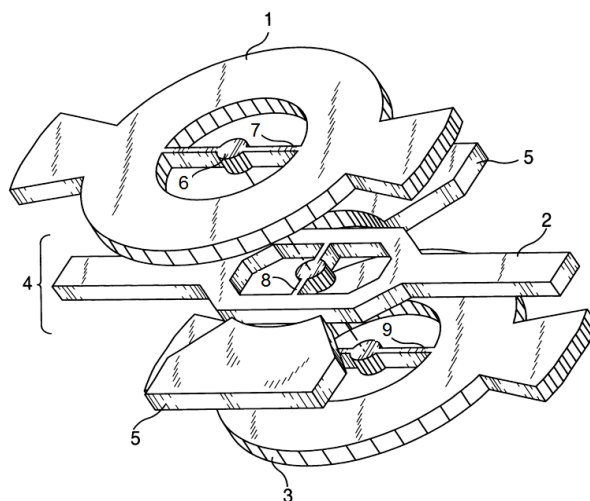


Рис. 1. Двухмассовый ММГ фирмы Bosch
(разнесенное положение)

Одна из конструкций ММГ типа R-R фирмы Robert Bosch GmbH [11] имеет два дисковых ИТ 1 и 3, которые посредством упругих подвесов 7 и 9 и центрального элемента 6 связаны с основанием 2 через упругие элементы 8 (рис. 1). На слое 4, в котором расположено основание 2, помещены электроды 5 для измерения перемещений ИТ. При действии ускорения в направлении, перпендикулярном плоскости ИТ, зазор между элементами 1 и 5 уменьшается, а между 3 и 5 увеличивается. Замыкая требуемым образом электрические цепи, можно добиться существенного снижения чувствительности ММГ к линейному ускорению.

Дисковые ИТ 1 и 3 совершают противофазные первичные угловые колебания в плоскости ИТ. При действии переносной угловой скорости Ω под дей-

нием сил Кориолиса возникают вторичные колебания ИТ, которые также являются противофазными. При этом под действием углового ускорения вторичные колебания ИТ будут синфазными. Это обстоятельство при определенном построении схемы измерения позволяет снизить чувствительность такого прибора к угловой вибрации.

Микромеханический гироскоп по принципу действия должен измерять угловую скорость при любых законах ее изменения, но реально это осуществляется при определенных ограничениях: по диапазону значений угловых скоростей, по скоростям их изменений и по частотам. Угловая скорость может рассматриваться, как мешающее воздействие в следующих случаях:

- измеряется составляющая угловой скорости не только вокруг своей измерительной оси, но и вокруг других осей;
- появляется составляющая сигнала, пропорциональная не угловой скорости, а угловому ускорению.

Первый случай вызван перекосом измерительной оси, положение которой отличается от номинального. Такая погрешность является систематической и может быть учтена при калибровке ММГ. Например, для трехосного гироскопа ITG-3200 нормируемая чувствительность к поперечным скоростям (cross-axis sensitivity) составляет 2%, но сюда входят и перекосы между отдельными измерителями.

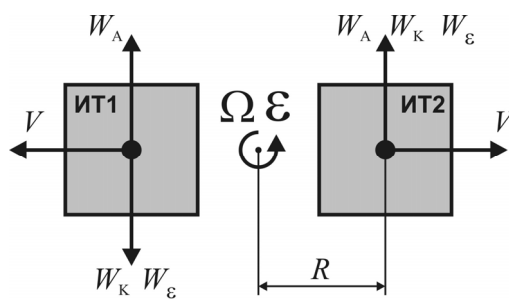


Рис. 2. Направления ускорений, действующих на двухмассовый ММГ

Действие углового ускорения $\varepsilon = d\Omega/dt$ на ММГ типа $R-R$ вызывает появление моментов, воздействующих на ИТ и пропорциональных ему и моменту инерции ИТ. Действие углового ускорения на двухмассовый ММГ типа $L-L$ (например, ADXRS150) вызывает появление линейных ускорений $W_\varepsilon = \varepsilon R$, действующих на ИТ, причем направление этих ускорений совпадает с ускорениями Кориолиса W_K при противо-

фазном движении ИТ со скоростями V (рис. 2).

При медленном изменении углового ускорения ε возникающие моменты имеют спектр в низкочастотной области, отличный от спектра частотно-модулированного сигнала ММГ, и могут быть эффективно отфильтрованы при измерении угловой скорости Ω . Однако ситуация осложняется при наличии переменного ускорения ε , если его частота становится близкой к собственным частотам конструкции.

Переменные воздействия

Переменными воздействиями следует считать механические воздействия, изменяющиеся во времени. К таким воздействиям можно отнести линейные и угловые вибрации в широкой полосе частот и собственные первичные колебания ИТ, обусловленные принципом работы ММГ.

Собственные первичные колебания ИТ являются естественным источником воздействий, они создают погрешности ММГ вследствие отклонений положения и форм поверхностей в пределах полей технологических допусков на изготовление. Эти отклонения приводят к периодическим, с частотой первичных

колебаний изменением зазора, что приводит к появлению «ложного сигнала» той же частоты. На ММГ типа *R-R* в соответствии с принципом действия оказывают влияние первичные угловые колебания ИТ, на ММГ типа *L-L* – первичные линейные колебания. Рассматриваемая погрешность имеет место на неподвижном основании и подлежит алгоритмической компенсации или снижению по результатам калибровки ММГ.

Для ММГ типа *L-L* амплитуда проекции ускорения первичных колебаний, действующего на ИТ по выходной оси вследствие перекосов осей, составляет

$$W_T = x_1 \omega_1^2 k_T, \quad (2)$$

где x_1 и ω_1 – амплитуда и частота первичных колебаний, k_T – безразмерный коэффициент, который имеет смысл угла перекоса плоскости ИТ.

Амплитуда ускорения Кориолиса имеет значение

$$W_K = 2\Omega x_1 \omega_1, \quad (3)$$

Частоты колебаний ИТ от ускорений W_T и W_K совпадают, а фазы колебаний отличаются на $\pi/2$.

С учетом формул (2) и (3) требование к допустимому перекосу осей имеет вид

$$k_T < 2\Omega \omega_1^{-1}, \quad (4)$$

Формула (4) позволяет определить допустимый угол перекоса при известной величине погрешности ММГ. Отметим, что чем выше частота собственных колебаний ИТ, тем жестче требования к точности изготовления.

При собственной частоте первичных угловых колебаний 3 кГц и погрешности в 1 град/с допустимый перекоз составляет $1,8 \cdot 10^{-6}$ (0,4 угл. с.), что невыполнимо технологически. Если принять, что достижимая точность изготовления составляет $5 \cdot 10^{-4}$ (допуск 0,5 мкм на длине 1 мм), то создаваемая погрешность составит 270 град/с. При более грубом изготовлении погрешность может перекрыть динамический диапазон измерений, что сделает ММГ неработоспособным. Эта погрешность является одной из составляющих квадратурной помехи (источников квадратурной помехи достаточно много), для борьбы с которой предложено большое количество решений [12–16].

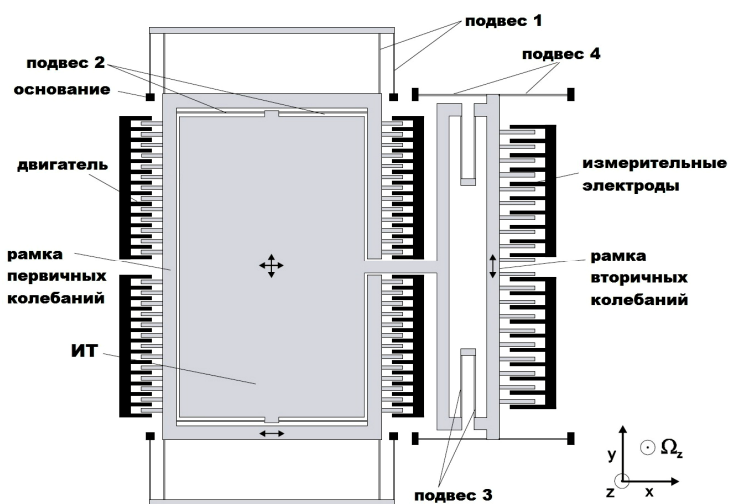


Рис. 3. Конструкция подвеса ММГ компании HSG-IMIT (Германия)

Одним из схемных решений (рис. 3), снижающим влияние первичных колебаний на вторичные, является создание сложной системы подвеса с промежуточными упругими элементами и дополнительными рамками [17]. Здесь ИТ в рамке совершает первичные колебания по оси X , и при наличии угловой скорости возникают колебания ИТ по оси Y . Эти колебания через стержень передаются на другую рамку, амплитуда колебаний которой измеряется. Таким образом, ИТ совершает колебания по двум направлениям, а каждая рамка – по своему направлению.

Для ММГ типа $L-L$ основным воздействием, определяющим погрешности прибора на подвижных объектах, является линейная вибрация основания в широком диапазоне частот, и особенно на частотах собственных колебаний. Резонансные явления при вибрационных воздействиях потенциально представляют большую опасность вследствие высокой добротности колебательной системы упругого подвеса ИТ. Для снижения чувствительности к вибрации и устранения резонансных явлений минимальная собственная частота колебаний ИТ в упругом подвесе выбирается достаточно высокой. Так, для прибора ADXRS150 собственная частота составляет 14 кГц, для трехосного прибора ITG-3200 компании InvenSense – от 27 до 33 кГц. Однако для увеличения коэффициента преобразования ММГ желательно снижение частоты первичных собственных колебаний [18].

Обычно опасность возникновения резонанса в подобных конструкциях при испытаниях устраняется тем, что все собственные частоты конструкции ММГ при проектировании поднимаются выше верхней границы установленного диапазона частот испытаний. Это не отражает реальных условий эксплуатации (нет законов природы, которые ограничивали бы диапазон частот), и в реальных условиях спектры вибраций не ограничены. Амплитуда ускорения Кориолиса, действующего на ИТ ММГ типа $L-L$, в соответствии с формулой (3) составляет всего 0,003 g (при $\Omega = 1$ град/с, $x_1 = 10$ мкм, $\omega_1/2\pi = 14$ кГц), а амплитуда вибраций может составлять десятки g. Даже с учетом резонансного усиления полезного сигнала и его синхронного детектирования чувствительность к линейной вибрации достаточно велика.

Эти обстоятельства заставляют разработчиков искать дальнейшие пути снижения чувствительности ММГ типа $L-L$ к линейным ускорениям. Способы снижения чувствительности к постоянному ускорению путем комплексирования ММГ и акселерометров или измерения зазора датчика перемещений в случае вибрации не подходят по ряду причин. Одна из них заключается в изменении сигнала помехи в зависимости от частоты вибрации, что требует сложной системы компенсации, учитывающей частоту внешнего воздействия. Другая причина состоит в сложности обеспечения фазовых соотношений между сигналом помехи и сигналом акселерометра; при несовпадении фаз возникает высокочастотная ошибка от вибрации. Поэтому усилия разработчиков ММГ сосредоточены на создании конструкций и электронных схем, позволяющих компенсировать помехи от механических воздействий на уровне чувствительного элемента. Фирма Analog Devices в 2011 году представила разработку нового четырехмассового ММГ ADXRS646 (рис. 4) с пониженной чувствительностью к линейным ускорениям и вибрации [19]. Стоимость одного гироскопа для России 90\$. Коэффициент чувствительности такого прибора к линейному ускорению составляет 0,015 град/с/g, к вибрации – 0,0001 град/с/g². Для сравнения: гироскоп CRG20-01 фирмы Silicon Sensing Systems имеет соответствующие показатели

0,1 град/с/g и 0,005 град/с/g². Снижение чувствительности к механическим воздействиям в ADXRS646 достигается использованием четырех ИТ с механической связью между ними в отличие от ADXS150 с двумя ИТ, связь между которыми осуществляется электрически.

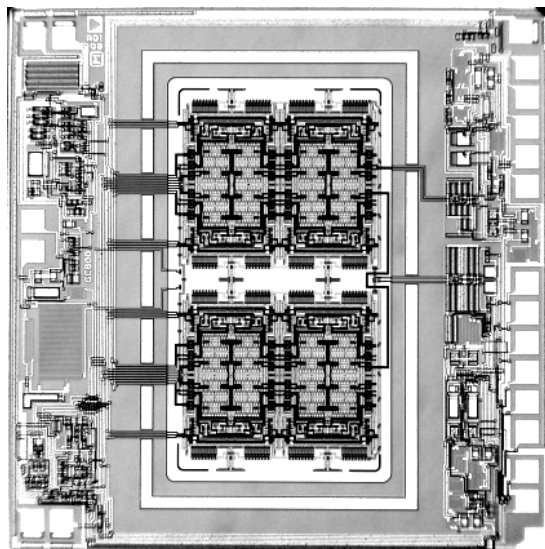


Рис. 4. Четырехмассовый ММГ
фирмы Analog Devices

Известный путь снижения чувствительности к линейной вибрации состоит в использовании только угловых колебаний в ММГ типа *R-R*. Для идеального прибора в отсутствие технологических погрешностей линейная вибрация не должна оказывать влияния на показания прибора. Тем не менее такой ММГ остается чувствительным к угловым вибрациям основания.

Необходимо отметить, что в технических требованиях, как правило, регламентируется воздействие линейной вибрации, при этом факт существования угловой вибрации игнорируется. Однако на объекте имеют место и линейные, и угловые колебания. По данным [20], спектральные плотности случайных вибраций для определенного класса объектов, на которых предполагается установка ММГ, имеют следующий уровень: спектр случайной линейной вибрации – 0,1–10 м/с²/√Гц, спектр случайной угловой вибрации – 10 рад/с²/√Гц.

Угловые ускорения вызывают дополнительные ошибки ММГ типа *R-R*. Воздействие угловых колебаний основания может приводить к изменению амплитуды первичных колебаний, но, поскольку амплитуды первичных колебаний относительно велики, это воздействие можно считать пренебрежимо малым. Для вторичных колебаний ситуация иная. Поскольку даже при измеряемых угловых скоростях порядка 100 °/с, но без совмещения частот и при добротности контура вторичных колебаний, равной единице, амплитуда вторичных колебаний составляет 0,5 угл. с, то сигнал от угловой вибрации на много порядков превосходит полезный сигнал. Хотя полезный сигнал выделяется синхронным детектированием, такие высокие уровни помехи от угловых вибраций основания могут превосходить диапазон измерения. Особую опасность представляют резонансные угловые колебания на собственных частотах подвеса.

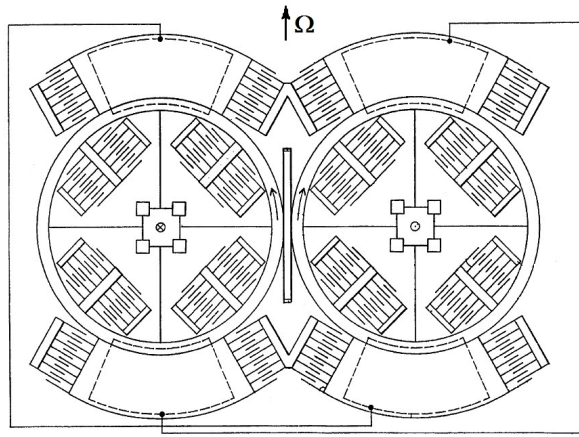


Рис. 5. Двухмассовый ММГ типа *R-R* фирмы Analog Devices

Снижение чувствительности к угловым ускорениям достигается использованием многомассовых систем ММГ, которые могут не иметь механическую связь между ИТ (см. рис. 1) или в которых ИТ могут быть связаны дополнительным упругим элементом, как в приборе фирмы Analog Devices [21]. В этом приборе два угловых осциллятора в дисковых ИТ в упругих подвесах совершают противофазные первичные угловые колебания (рис. 5). При действии угловой скорости по оси чувствительности инерционные тела совершают противофазные вторичные колебания, а при угловых вибрациях основания вторичные колебания осцилляторов будут синфазными. Дополнительный упругий элемент должен иметь минимальную жесткость в противофазном движении и значительную жесткость в синфазном. Это позволяет при определенном включении датчиков измерения вторичных колебаний получить нечувствительность ММГ к угловым ускорениям основания. Отметим, что в 2012 году фирма Analog Devices получила еще два патента на ММГ типа *R-R* с несколькими ИТ [15, 16].

Конструкции ММГ типа *R-R* выполняются так, чтобы не было чувствительности к линейным колебаниям. Однако существует много факторов, вследствие которых силы инерции приводят к появлению моментов вокруг оси вторичных колебаний. Среди этих факторов основными являются [22, 23]:

- 1) статический и динамический дисбалансы подвеса;
- 2) неравножесткость упругого подвеса, приводящая к появлению моментов на удвоенной частоте вибрации;
- 3) отклонения поверхности ИТ от плоской формы;
- 4) нелинейность характеристик подвеса и системы управления, вызывающая субгармонические колебания.

Первые три фактора подробно исследованы, и выработаны требования к конструкциям и к точности изготовления [22, 24]. Нелинейность упругих характеристик подвеса в значительной степени (до 200 раз) устраняется выбором конструкции криволинейных упругих элементов [25].

Нелинейность системы управления приводит к тому, что при виброиспытаниях с жестким ограничением диапазона частот значениями ниже низших частот свободных колебаний, могут наблюдаться сложные резонансные явления со значительным увеличением амплитуд на частотах, ниже резонансных, в частности на частотах в $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ от первичной собственной частоты подвеса. При ис-

следовательских испытаниях опытных экземпляров приборов ММГ-2 такие резонансные эффекты наблюдались, в резонансных режимах происходило полное нарушение нормальных режимов работы [8].

При исследовании электромеханической модели ММГ типа *R-R* показано, что в случаях совпадения частот линейных вибраций основания с субгармониками первичных и вторичных угловых колебаний ИТ, т.е. на кратных ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$...) гармониках, вибрация основания может оказывать существенное влияние на выходной сигнал гироскопа в виде резонансных пиков. Результаты моделирования в целом совпали с экспериментальными данными. При анализе модели выявлено, что это влияние возникает только при наличии нелинейности и неодинаковости электрических и емкостных характеристик датчиков угла и момента (неравенство зазоров и площадей, отличия формы и перекрытия электродов, неравенство напряжений) [23].

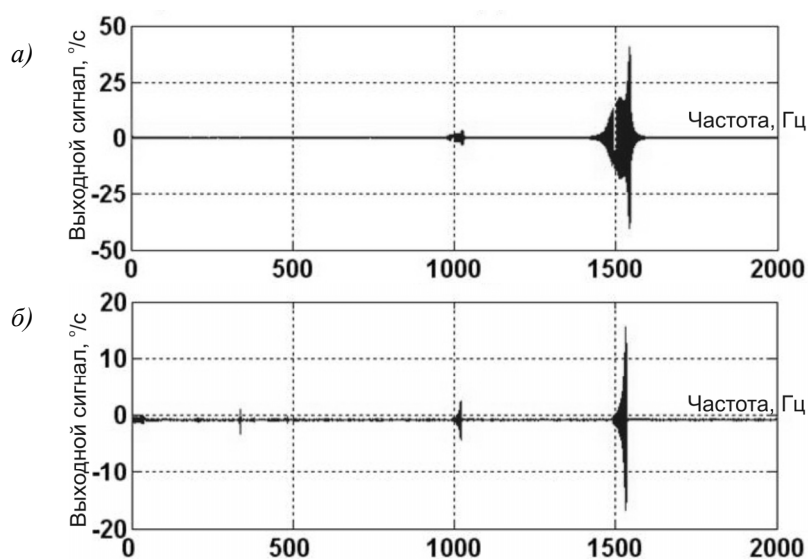


Рис. 6. Выходной сигнал ММГ при линейной вибрации: а) моделирование; б) эксперимент

На рис. 6 приведены результаты моделирования и экспериментальные данные, полученные на ММГ-2, при вибрации основания 10 g в полосе частот до 2 кГц. Собственная частота первичных колебаний ММГ-2 составляет $\omega_1/2\pi = 3$ кГц, и видно, что на частотах $\frac{1}{2}\omega_1$ и $\frac{1}{3}\omega_1$ наблюдаются резонансные явления.

На компьютерной модели показано, что введение корректирующих звеньев и коэффициентов в системе управления, выравнивающих параметры электрических и емкостных характеристик датчиков угла и момента, устраняет резонансы на субгармониках при вибрации. Полученные выводы требуют экспериментальной проверки, что в случае положительного результата создаст возможность использования низкочастотных ММГ на вибрирующем основании. Отметим, что использование высокочастотных осцилляторов не устраняет проблему нелинейности системы управления и в то же время снижает чувствительность такого ММГ к измеряемой угловой скорости пропорционально увеличению собственной частоты первичных колебаний.

Удары и контактные взаимодействия

Необходимость эксплуатации ММГ в условиях ударных воздействий выдвигает требования к безотказности. Обычно в паспортных данных серийных ММГ эти требования регламентируются как показатели прочности и характеризуются значением максимального ускорения $W_{\max}$, выдерживаемого прибором во включенном или выключенном состоянии, и временем восстановления работоспособного состояния после удара. Требования к устойчивости или к функционированию прибора во время кратковременных ударов, как правило, не выдвигаются.

Относительное движение ИТ при ударе и после него характеризуется произведением $\omega_0 \tau$ [26], где ω_0 – низшее значение собственной частоты поступательных колебаний в направлении действия удара, τ – длительность ударного импульса. Для всех созданных конструкций выполняется неравенство $\omega_0 \tau > 1$. При этом удар считается длинным, а перемещения под действием ускорения в первом приближении можно считать квазистатическими. Максимальное ускорение, приводящее к касанию ИТ и неподвижных частей конструкции, оценивается приближительным выражением, не учитывающим потерю плоской формы ИТ, $W_{\max} = \Delta \cdot \omega_0^2$, где Δ – зазор между ИТ и упорами в конструкции. Например, для прибора ММГ-2 при зазоре $\Delta = 1$ мкм и частоте $\omega_0 = 16$ кГц касание упоров происходит при $W_{\max} = 1000$ g.

Касание ИТ и неподвижных частей конструкции приводит к контактным взаимодействиям и временному отказу прибора. Установка ограничительных упоров и оптимизация их расположения позволяет в значительной степени снизить напряжения, возникающие в упругом подвесе ИТ и обеспечить значительную ударопрочность разрабатываемых ММГ до 10^4 - 10^5 g [27, 28]. Однако после временного отказа, который происходит во время касания ИТ и упоров, требуется время для восстановления номинальных характеристик ММГ. Способности возвращения в нормальный режим ММГ различных производителей значительно различаются. Некоторые приборы, как, например SCR1100-D04 компании VTI (с января 2012 г. входит в состав японской корпорации Murata), вообще перестают работать после удара более 250 g, и требуется его повторное включение [19]. Прибор ММГ-2 после удара 1200 g восстанавливает свои номинальные параметры в течение 5 с, что совпадает со временем его готовности [8]. Время готовности более нового поколения приборов ММГ-ЭПТРОН (совместная разработка ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и французской фирмы TRONIC'S Microsystems) составляет 1,5 с. Такое большое время готовности объясняется высокой добротностью контура первичных колебаний, так как при высокой добротности необходимо достаточное время для повторного раскачивания ИТ до номинальной амплитуды первичных колебаний.

Большое время готовности и восстановления работоспособности ММГ после удара нельзя признать удовлетворительным. При разработке ММГ следует уделить внимание снижению этого показателя и внедрению контуров форсированного запуска и демпфирования поперечных колебаний. Упомянутые приборы фирмы Analog Devices имеют следующее время готовности (turn-on time): ADXRS150 – 0,035 с, ADXRS646 – 0,05 с.

Для повышения стойкости и прочности инерциальных блоков или модулей, содержащих микромеханические гироскопы и акселерометры, используются различные конструктивные и технологические приемы. Повышение прочности

печатных плат и составных элементов блока достигается заливкой внутреннего пространства специальными компаундами. Основным требованием к таким компаундам является высокая теплопроводность для обеспечения равномерного поля внутри блока и устранения перегрева элементов. Такая технология использована в приборе ММГ-2, успешно выдержавшем заданные ударные воздействия.

Сам инерциальный блок с гироскопами и акселерометрами может быть размещен в специальной антивибрационной и антиударной подвеске. Такое конструктивное решение применено в инерциальном модуле SiIMU02® разработки компании Colibrys и корпорации Atlantic Inertial Systems (рис. 7). Блок предназначен для использования в артиллерийском вооружении и выдержал при испытаниях ударные воздействия на уровне 20000 g [29].



Рис. 7. Инерциальный модуль SiIMU02®

Процедуры испытаний и стенды

При проведении испытаний ММГ в целях оценивания или подтверждения адекватных эксплуатационных характеристик следует учитывать несколько особенностей.

Одна из тенденций изменения датчиков как объектов испытаний заключается в их миниатюризации, при этом уменьшение габаритных размеров означает повышение собственных частот. Поэтому диапазон частот, в котором виброиспытания могут принести полезную информацию именно о динамических характеристиках, сдвигается в область высоких частот. Если для классических механических гироскопов можно было наблюдать резонансные явления начиная со 100 Гц, то для ММГ – примерно с 1 кГц.

Хотя теоретически предполагается существование изолированных направленных вибраций, при которых резонансные колебания определенных форм не возбуждаются, практически все резонансные колебания отмечаются при любых направлениях линейных колебаний и при любых осях угловых колебаний, в том числе и при перемене направлений во времени. Важнейшим для испытаний является то свойство, что расчетное увеличение амплитуд (умножение нерезонансной амплитуды на добротность) имеет место при двух условиях:

- точная настройка частоты вибраций (с относительными погрешностями, не превышающими корень из числа, обратного величине добротности, т.е. не хуже 0,1%);
- достаточно большая выдержка во времени для увеличения амплитуды колебаний до номинального значения (порядка произведения периода колебаний на величину добротности, т.е. порядка нескольких минут).

Есть основания предполагать, что при эксплуатации такие условия не будут выполняться никогда, реальные воздействия не могут характеризоваться высокой стабильностью частот. В обычных контрольных испытаниях при прохождении с шагом по частотам через десятки процентов почти наверняка резонансные явления не будут наблюдаться. По крайней мере наблюдаемое некоторое увеличение амплитуд колебаний вблизи резонансных частот не будет соответствовать очень большим значениям добротностей. При больших шагах по частотам и малых выдержках по времени резонансы вообще могут оказаться ненаблюдаемыми.

Идеология виброиспытаний строится на разных представлениях. Один подход основывается на том, что проверяется прочность конструкции и виброиспытания нужны исключительно для выявления скрытых дефектов, в первую очередь в конструктивных соединениях (паяных, сварных, клеевых и пр.). Другой подход основан на требовании, что датчики должны сохранять свои метрологические характеристики на объектах, на которых вибрации являются естественными воздействиями. Для ММГ наиболее важно обеспечение стойкости в условиях вибрации.

Методы и средства испытаний должны быть в принципе инвариантны относительно датчиков. Особенностью вибраций является длительное действие, в отличие от кратковременных ударов. При испытаниях важно установить, не возникают ли необратимые изменения и какое время требуется для восстановления работоспособности. Следует отметить, что уровни вибраций (1–10g) значительно ниже (на порядки) по сравнению с ударами (10^3 – 10^4 g).

Традиционно при испытаниях на вибрацию используются электродинамические стенды с ограничениями по виброперемещениям около 10 мм, что позволяет проводить испытания при уровне виброускорений 10 g (иногда 100 g), начиная с частоты 15 Гц и выше. Недостатком таких стендов является создание не только линейных, но и трудно устранимых угловых ускорений, а также большого электромагнитного поля. Применительно к испытаниям ММГ в диапазонах очень высоких частот (в несколько килогерц) наиболее перспективны пьезоэлектрические стенды. Эти стенды выпускаются рядом фирм (например, Piezomechanik GmbH, Германия), но практически в любой организации они могут быть смонтированы в виде столбиков из пьезоэлементов (например, в ОАО «НИИ «Элпа»). Наиболее существенными являются ограничения по перемещениям, которые не превышают 0,1% высоты столба, что реально ограничивают амплитуды в несколько сотых миллиметра. Возможны воздействия только вы-

соких частот: уровня 10 g при 300 Гц и выше, уровня 100 g при 1 кГц и выше. На столбиках из пьезоэлементов создаются стенды для воспроизведения линейных вибраций, но на трех столбиках (при задании определенных перемещений в фазе и противофазе) могут также воспроизводиться угловые вибрации или комбинации линейных и угловых вибраций.

При испытаниях на ударные воздействия с использованием традиционных ударных стендов следует учитывать сложную форму закона изменения импульса ускорения. Такое ударное воздействие характеризуется большим числом пиков и изменений знаков, что квалифицируется как виброудар с широким частотным спектром, хотя, конечно, важнейшей характеристикой удара является высота самого большого пика, длительность которого оценивается в обычных стендах в 0,1-0,5 мс. Физически сложная форма импульса может появляться на реальных объектах [29] и означает, что на ММГ действуют не только простое по форме ударное воздействие, но и вибрация различной частоты, возможно, как линейная, так и угловая. Широкополосное воздействие повышает вероятность касания ИТ и неподвижных частей конструкции прибора.

Ударные стенды не позволяют воспроизводить ускорения, как правило, выше 2000 g. Для воспроизведения больших ударных ускорений целесообразно использование малогабаритных ударных стендов, обеспечивающих более близкую к требуемой форму импульса. Например, малогабаритный ударный стенд LSM-100 Linear Shock Machine компании GHI Systems (США) с габаритными размерами 120×41×34 см и полезной нагрузкой до 3 кг способен воспроизводить пиковое значение ударного ускорения до 10000 g с длительностью импульса 0,1-3 мс. Отечественные разработки подобных стендов находятся на этапе технических предложений [30].

Заключение

Рассмотрены вопросы обеспечения стойкости ММГ, функционирующих в условиях механических воздействий. В качестве воздействий подробно рассмотрены постоянные ускорения, линейные и угловые вибрации, удары. При постоянных ускорениях наблюдаются такие погрешности, как смещение нуля и изменение масштабного коэффициента. При линейной и угловой вибрации опасны резонансные явления. Повышение собственной частоты подвесов не устраняет появление субгармонических резонансов при нелинейности системы управления ММГ. При ударных воздействиях кроме обеспечения прочности важным является уменьшение времени восстановления прибора после удара.

Приведены сведения об актуальных разработках гироскопов и проанализированы тенденции их развития. Показано, что важным направлением в конструировании ММГ является использование упругих систем с несколькими инерционными телами.

Рассмотрены особенности методов испытаний гироскопов и приведены соображения по использованию вибрационных и ударных стендов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 10-08-00153-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов, В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. - 2011. - №1. - С.3-16.
2. **ITG-3200 Product Specification** // www.invensense.com/mems/gyro/catalog.html
3. **Xie H., Fedder G.K.** Integrated Microelectromechanical Gyroscopes // Journal of Aerospace Engineering. - April 2003. - pp. 65-75.
4. **Шахнович, И.** МЭМС-гироскопы - единство выбора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2007. - №1. - с.76-85.
5. **Сысоева, С.** Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы - от low-end до high-end сегментов // Компоненты и технологии. - 2010. - № 5. - С.22-30.
6. **Тузов, А.** Датчики для измерения параметров движения на основе МЭМС-технологии. Ч. 2. Инерциальные датчики высокой точности // Электроника. - 2011. - № 1. - С.2-5.
7. **Евстифеев, М.И.** Основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. - 2011. - Т. 54, № 6. - С. 75-80.
8. **Евстифеев, М.И.** Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн // Гироскопия и навигация. - 2011. - №1. - С.49-58.
9. **Агильдиев, В.М.** Комбинированный микромеханический гироскоп-акселерометр для инерциальных измерительных систем / В.М. Агильдиев, В.Н. Дрофа // Космонавтика и ракетостроение. - 1995. - №5. - С.79-83.
10. **Люкшонков, Р.Г.** Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре / Р.Г. Люкшонков, Н.В. Моисеев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - №4. - С.67-72.
11. **U.S. Patent 6443008.** Decoupled Multi-Disk Gyroscope/ Funk K. et al; Robert Bosch GmbH. - Sep.3, 2002. - 11 p.
12. **Беляева, Т.А.** Подавление квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR типа с помощью электродов, расположенных над зубцовой зоной / Т.А. Беляева, Я.А. Некрасов // Гироскопия и навигация. - 2008. - №1. - С.82-90.
13. **U.S. Patent 2005/0139005 A1.** Micromachined Sensor with Quadrature Suppression / Geen J.; Analog Devices. - Jun.30, 2005. - 24 p.
14. **Acar C., Shkel A.** MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness / Springer Science. - 2009 - 262 p.
15. **U.S. Patent 8151641.** Mode-matching Apparatus and Method for Micromachined Inertial Sensors / Geen J.; Analog Devices. - Apr.10, 2012. - 23 p.
16. **U.S. Patent 8266961.** Inertial Sensors with Reduced Sensitivity to Quadrature Errors and Micromachining Inaccuracies / Kuang J., Geen J.; Analog Devices. - Sep.18, 2012. - 17 p.
17. **Geiger, W.** Decoupled Microgyros and the Design Principle DAVED / W.Geiger et al // Proceeding of MEMS 2001. - pp.170-173.
18. **Кучерков, С.Г.** К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа / С.Г. Кучерков, Ю.В. Шадрин // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Спб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - С. 94-101.
19. **Weinberg, H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. - September 2011. - pp.1-5.
20. **Geen, J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine - November, 2004. - pp. 12-17.
21. **U.S. Patent 5635640.** Micromachined Device with Rotationally Vibrated Masses / Geen J.; Analog Devices. - Jun.3, 1997. - 8 p.
22. **Евстифеев, М.И.** Исследование динамики микромеханического гироскопа при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО - 2011. - №4. - С.72-76.

23. **Анализ** электромеханической модели микромеханического гироскопа RR-типа / М.И. Евстифеев [и др.] // Материалы XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова. - СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2012. - 13 с.
24. **Евстифеев, М.И.** Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа / М.И. Евстифеев, А.А. Унтилов // Гироскопия и навигация. - 2003. - №2. - С. 24-31.
25. **Евстифеев, М.И.** Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2009. - № 6. - С. 70-76.
26. **Особенности** испытаний микромеханических гироскопов на ударные воздействия / М.И. Евстифеев [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2011. - №3. - С.88-95.
27. **Елисеев, Д.П.** Оптимизация расположения упоров в микромеханическом гироскопе / Д.П. Елисеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2012. - №4. - С.93-96.
28. **Евстифеев, М.И.** Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2010. - № 4. - С. 46-50.
29. **Habibi, S.** Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / S. Habibi et al. // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008, May 6 - 8, 2008. - PP. 232-237.
30. **Елисеев, Д.П.** Разработка малогабаритного ударного стенда для испытаний микромеханических датчиков / Д.П. Елисеев, В.П. Серебряков, А.П. Чапурский // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - №4. - С.165-166.

Abstract. Some questions of the durability guaranteeing for the micromechanical gyroscopes functioning under the uniform accelerations, linear and angular vibrations, impact actions are examined. The information about microgyroscopes state of the art is given and the trends of their development are analyzed. It is shown that the use of elastic systems with several inertial bodies is the predominant direction in the micromechanical gyroscopes design.

Key words: microelectromechanical gyroscope, accelerations, impact, durability.