

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, Д. П. ЕЛИСЕЕВ, А. С. КОВАЛЕВ, Д. В. РОЗЕНЦВЕЙН

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Приведены результаты испытаний микромеханического гироскопа ММГ-2 RR-типа, разработанного в ЦНИИ «Электроприбор». Проведены экспериментальные оценки изменения характеристик прибора при испытаниях на центрифуге, вибрационных и ударных стендах. Получены зависимости параметров прибора от механических воздействий и определены пути снижения влияния вибраций и ударов на характеристики ММГ.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) благодаря низкой цене, габаритам и энергопотреблению находят все большее применение в различных областях навигации и управления движением. Обоснованность использования того или иного прибора на конкретном подвижном объекте обуславливается как параметрами датчика, так и их стабильностью к внешним эксплуатационным факторам [1]. В соответствии с общепринятым в мировой практике стандартом международной организации IEEE Standard 1431-2004 в паспорте изделия рекомендуется указывать чувствительность основных характеристик датчиков к внешним факторам. Разработанный в ЦНИИ «Электроприбор» гироскоп ММГ-2 (рис. 1) квалифицируется как датчик угловой скорости для использования на динамичных объектах, подверженных значительным инерционным перегрузкам [2]. В связи с этим важна задача оценки влияния линейных ускорений на характеристики этого датчика – смещение нуля и масштабный коэффициент (коэффициент преобразования).

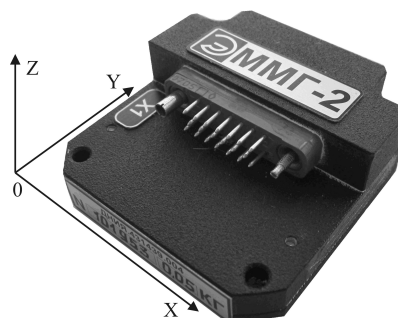


Рис. 1. Гироскоп ММГ-2

Основные характеристики ММГ-2 приведены в табл. 1. Сигнал гироскопа выдается в цифровой (по интерфейсам RS-232 и CAN) и в аналоговой форме.

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

Елисеев Даниил Павлович. Инженер ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Ковалев Андрей Сергеевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых Академии навигации и управления движением.

Розенцвейн Дмитрий Владимирович. Научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Таблица 1

Основные характеристики гироскопа ММГ-2

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерения, $^{\circ}/с$	± 150
Нестабильность масштабного коэффициента, %	< 1
Рабочая полоса частот, Гц	40
Время готовности датчика к работе, с	< 2
Шум, $^{\circ}/с/\sqrt{Гц}$	$< 0,05$
Рабочая температура, $^{\circ}C$	$-40...+60$
Питание	5 В, 120 мА
Габариты, мм	$50 \times 50 \times 18$
Масса, г	50

Основу гироскопа ММГ-2 составляет микромеханический чувствительный элемент (ЧЭ), построенный по схеме гироскопа *RR*-типа и изготавливаемый по технологии SOI – кремний на изоляторе (рис. 2).

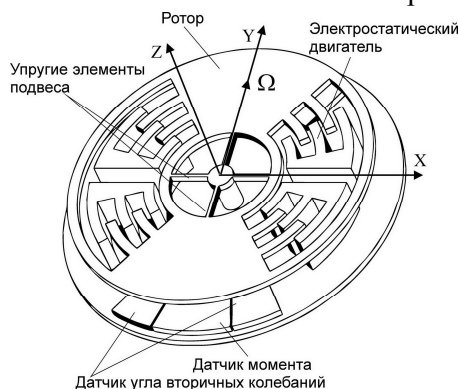


Рис. 2. Схема гироскопа

Принцип действия заключается в измерении амплитуды вторичных колебаний ротора относительно оси *X*, возникающих вследствие моментов сил Кориолиса при воздействии переносной угловой скорости основания Ω по оси чувствительности *Y* и наличии относительных первичных колебаний по оси *Z*. Измерение производится емкостным датчиком угла, расположенным под ротором. ЧЭ представляет собой сложную микроэлектромеханическую систему, содержащую как механические компоненты

(ротор и упругий подвес), так и электрические компоненты – зубцовый электростатический двигатель, емкостные датчики углов и моментов по осям первичных и вторичных колебаний. Управление режимами работы ММГ реализовано при помощи цифровой электроники, что дает возможность регулировать характеристики датчика под требования конкретного потребителя в широком диапазоне значений. ММГ-2 оснащен встроенным датчиком температуры и имеет систему термокоррекции, что позволяет снижать температурные погрешности без термостабилизации.

Испытания на центрифуге

Для проведения испытаний на воздействие постоянных линейных ускорений с амплитудой выше 1 g традиционно используется центрифуга. Прибор устанавливается на столе центрифуги на точно измеренном расстоянии относительно оси вращения. Постоянная угловая скорость вращения ротора центрифуги задается автоматическим приводом такой, чтобы центростремительное ускорение W_c в центре ЧЭ было равно заданному. При этом на прибор во время испытаний воздействуют два кинематических фактора: постоянное линейное ускорение и постоянная угловая скорость. Это было учтено при разработке методики испытаний [3].

Одна из проблем при проведении испытаний состоит в обеспечении точной выставки прибора на столе центрифуги. Неточность угловой выставки прибора приводит к возникновению проекции угловой скорости на ось чувствительности ММГ. В этом случае возникает дополнительная систематическая погрешность, так как к изменению выходного сигнала датчика от ускорения добавится сигнал об измеренной составляющей скорости вращения стола центрифуги. Методика испытаний состояла в том, что для исключения указанной погрешности, вызванной неточностью выставки, проводились парные испытания при двух направлениях вращения стола без переустановки датчика, а результаты осреднялись. Поскольку проекции угловых скоростей для обоих случаев имели одинаковые модули, но различные знаки, а линейные ускорения одинаковы, то для исключения погрешности выставки достаточно рассчитать среднее арифметическое полученных измерений:

$$U_1(W_C) = U_0(W_C) + K_0(W_C)\omega_C, U_2(W_C) = U_0(W_C) - K_0(W_C)\omega_C;$$

$$U_0(W_C) = \frac{1}{2} [U_1(W_C) + U_2(W_C)], \quad (1)$$

где $U_1(W_C)$ – сигнал прибора при положительном направлении вращения центрифуги; $U_2(W_C)$ – сигнал прибора при отрицательном направлении вращения центрифуги; $U_0(W_C)$ – смещение нуля ММГ; $K_0(W_C)$ – масштабный коэффициент ММГ; ω_C – величина угловой скорости вращения центрифуги; W_C – ускорение, воспроизводимое центрифугой.

С другой стороны, проекцию угловой скорости вращения центрифуги можно использовать для определения изменений масштабного коэффициента датчика при воздействии линейных ускорений. Для этого необходимо выставить ММГ таким образом, чтобы при заданном ускорении проекция угловой скорости на ось чувствительности прибора имела заданную величину. Значение масштабного коэффициента определяется из выражений (1) согласно формуле: $K_0(W_C) = \frac{1}{2} \omega_C^{-1} [U_1(W_C) - U_2(W_C)]$.

Исходя из предложенной методики было определено 6 положений датчика, в которых оценивалось влияние линейных ускорений на смещение нуля и масштабный коэффициент датчика (табл. 2).

Таблица 2

Положения датчика на центрифуге (оси X, Y и Z связаны с корпусом ММГ)

Номер положения	Направление действия линейного ускорения	Направление действия угловой скорости вращения центрифуги	Ось наклона*
1	Y	X	Z
2	-Y	-X	Z
3	Z	X	Z
4	-Z	X	Z
5	X	Z	X
6	-X	Z	X

* Ось, относительно которой необходимо наклонить датчик для создания проекции угловой скорости на ось чувствительности.

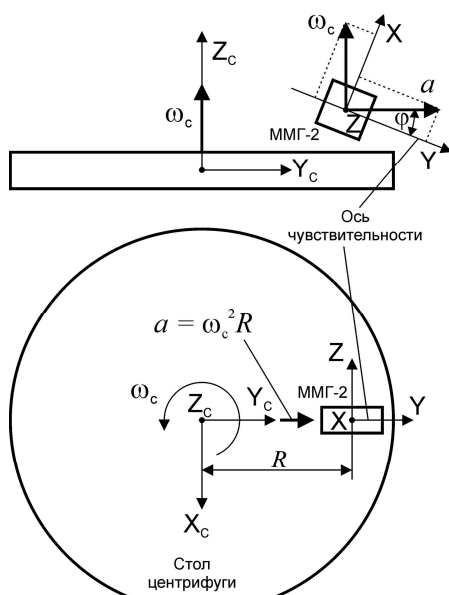


Рис. 3. Способ установки ММГ в положение 1

Например, чтобы выставить ММГ в положение 1, его следовало установить на кронштейн так, чтобы линейное ускорение действовало вдоль направления оси Y , вектор угловой скорости вдоль оси X , затем повернуть кронштейн относительно оси Z на заданный малый угол ϕ (рис. 3).

Результаты испытаний, проведенных в соответствии с разработанной методикой во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, приведены на рис. 4 в виде графиков зависимостей смещения нуля и масштабного коэффициента от постоянного линейного ускорения W_c . Наибольшие изменения характеристик ММГ происходят при действии постоянных линейных ускорений по оси Z , т.е. оси первичных колебаний. Предельные значения отклонений характеристик от номинальных при действии линейных ускорений до 50 g приведены в табл. 3.

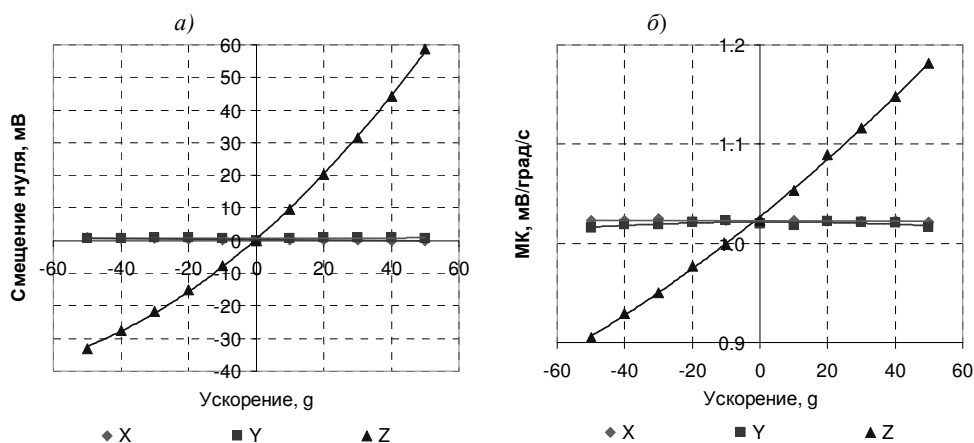


Рис. 4. Зависимости смещения нуля (а) и масштабного коэффициента (б) от линейных ускорений

Таблица 3

Изменения характеристик ММГ при действии ускорения

Ось	Смещение нуля, $^0/c/g$	Масштабный коэффициент, $\%/g$
X	0,006	0,002
Y	0,01	0,004
Z	0,86	0,27

Механизм изменений характеристик ММГ обусловлен в основном наличием следующих факторов:

– изменение зазоров в датчиках углов и моментов вследствие конечной жесткости подвеса и соответствующего смещения ротора по оси действия линейного ускорения;

– технологические погрешности, вызывающие вторичные колебания ротора на неподвижном основании и соответственное смещение нуля датчика. При регулировке ММГ смещение нуля компенсируется постоянным напряжением, а при действии ускорений, вызывающих смещение ротора, изменяется и смещение нулевого сигнала.

Относительное изменение масштабного коэффициента при действии ускорения W в направлении, перпендикулярном плоскости ротора, можно оценить по формуле [3]

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

где ω_0 – частота собственных колебаний ротора на упругом подвесе по оси Z ; d_0 – величина номинального зазора в датчике угла ДУ.

Особенность конструкции рассматриваемого ММГ заключается в том, что при использовании подвеса с полукольцами [4] поступательные жесткости по всем трем осям различны. Собственная частота поступательных колебаний ротора, рассчитанная методом конечных элементов, по оси X составляют 42 кГц, по оси Y – 8,5 кГц, по оси Z – 10 кГц.

Однако только по оси Z ускорение, приводящее к упругому перемещению ротора ММГ в этом направлении, изменяет величину зазора между электродами датчика угла вторичных колебаний. Это приводит к соответствующему изменению масштабного коэффициента прибора. Для более точной оценки изменения масштабного коэффициента следует учитывать искривление плоской формы ротора при воздействии нагрузки в направлении, перпендикулярном плоскости ротора [5].

Аналитически рассчитанное изменение масштабного коэффициента показано на рис. 5. Теоретическая оценка изменения масштабного коэффициента датчика по формуле (2) составляет 0,26%/g, экспериментальная – 0,27%/g, что свидетельствует о правильности принятой математической модели. Аналитическая оценка смещения нуля затруднена в связи с тем, что она зависит от начальных условий, определяемых неточностями изготовления и изменяющихся от образца к образцу в широком диапазоне.

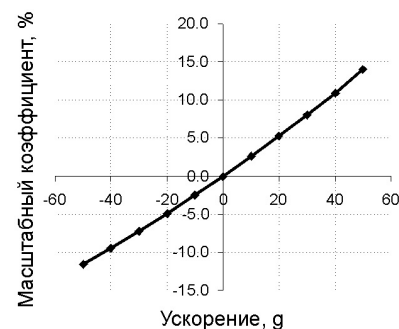


Рис. 5. Изменение масштабного коэффициента при ускорении по оси Z

Испытания на вибрационных стендах

Для определения изменения характеристик ММГ и выявления резонансных частот в испытательном центре ЦНИИ «Электроприбор» были проведены испытания стойкости приборов к вибрационным воздействиям. Гироскопы устанавливались последовательно на стенд TiraVib 5222, создающий вертикальную вибрацию основания, и на стенд TiraVib 5142, создающий горизонтальную вибрацию. Результаты испытаний на разных стендах оказались примерно одинаковыми, и в дальнейшем приводятся результаты испытаний на стенде TiraVib 5222.

При задании вибрации использовались следующие методы:

- метод сканирования диапазона при синусоидальной вибрации с непрерывно изменяющейся частотой со скоростью нарастания 1 Гц/с в полосе от 2 Гц до 2 кГц с постоянной амплитудой ускорения 2 g;
- метод широкополосной случайной вибрации (ШСВ) в полосе частот от 20 до 500 Гц с вариацией амплитуды от 0 до 10 g.

Одна из проблем при проведении вибрационных испытаний состоит в обеспечении вибрационной стойкости кронштейнов крепления во всем спектре задаваемых частот. В процессе проведения испытаний были выявлены нежелательные резонансные частоты кронштейнов в полосе до 2 кГц и предприняты меры по ужесточению крепления к стенду.

Результаты вибрационных испытаний ММГ с использованием метода непрерывно изменяющейся частоты показаны на рис. 6.

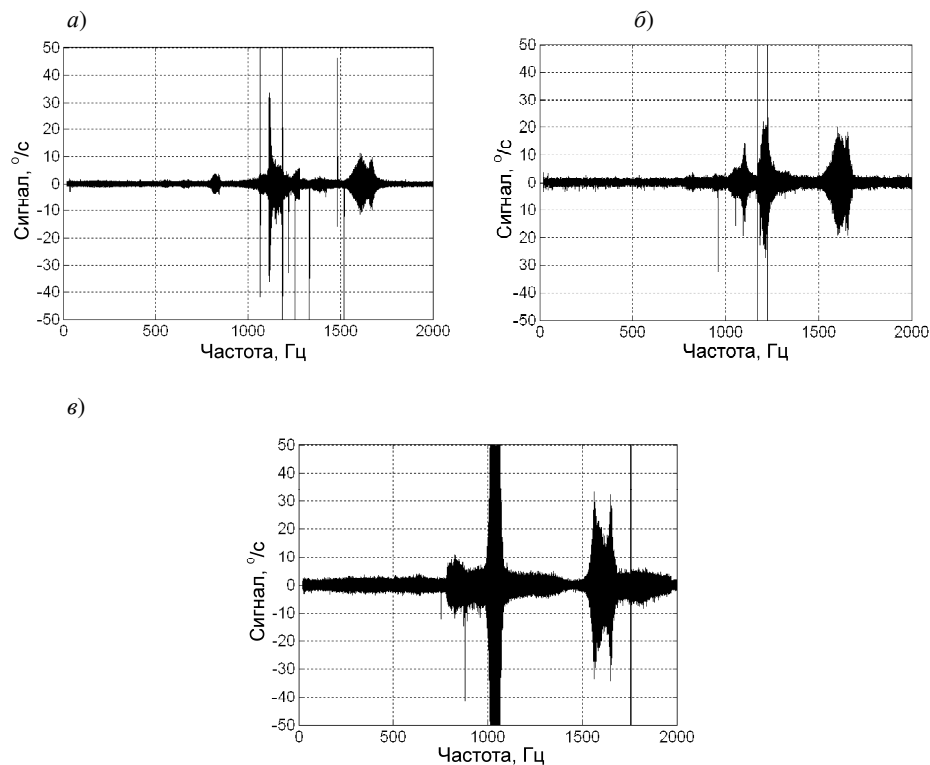


Рис. 6. Сигнал ММГ при вибрации основания по осям X (а), Y (б), Z (в)

Полученные результаты свидетельствуют о довольно высоких уровнях шумовых составляющих по всему диапазону, но наиболее неприятен значительный рост уровней сигналов, особенно при воздействии вибрации по оси Z на некоторых частотах выше 1 кГц. При этом уровень сигнала ММГ достигает до 300-500%/с.

Эффект значительного увеличения уровня сигнала объясняется наличием в рассматриваемом диапазоне частот резонансов механической системы конструкции прибора. Однако согласно расчетам, выполненным методом

конечных элементов, механические компоненты ЧЭ (упругий подвес и ротор) не имеют собственных частот ниже 3 кГц. В связи с этим необходимо обратить внимание на другие элементы конструкции. Возможно следующее объяснение полученных экспериментальных данных в части практически полных метрологических отказов в определенных диапазонах частот:

- первый резонансный пик объясняется низкой жесткостью печатной платы, на которой установлен ЧЭ, недостаточной жесткостью ее крепления или наличием конструктивных зазоров при ее креплении, а также нежесткостью корпуса гироскопа. Согласно расчетам при ослаблении крепления плата имеет резонансную частоту 1085 Гц;

- второй резонансный пик частотной характеристики обуславливается неравножесткостью упругого подвеса [6]. Это подтверждается теоретическим положением о том, что вибрации могут вызывать вредный сигнал ММГ на частоте, равной половине значения частоты вторичных колебаний.

Дальнейшая работа с гироскопом ММГ-2 предполагается в направлении повышения жесткости всех элементов прибора и устранения резонансов в полосе частот до 2 кГц.

Возможной причиной могут быть также наличие собственных резонансов конструкции стенда (вследствие чего может иметь место значительное увеличение амплитуд воздействий и появление высоких гармоник) и наличие угловых колебаний при линейных вибрациях. Для выяснения этой причины необходимо с помощью образцового акселерометра измерить виброускорения в различных точках стола.

Испытания методом ШСВ позволили определить зависимости характеристик ММГ от амплитуды ускорения (рис. 7).

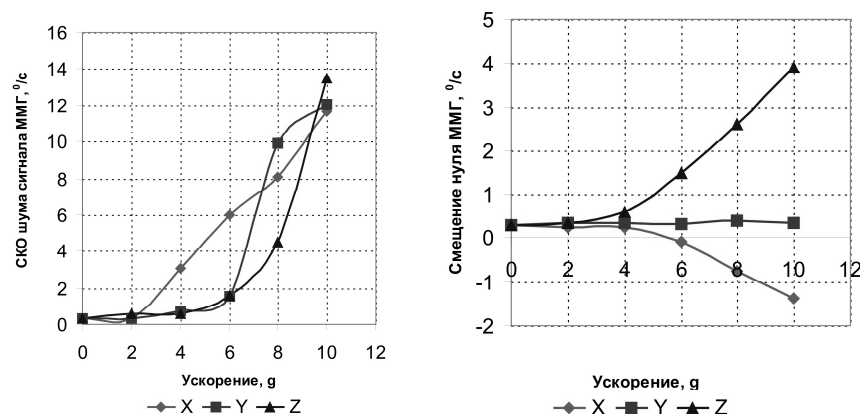


Рис. 7. Изменения характеристик ММГ при ШСВ

Результаты испытаний показывают, что при вибрационных воздействиях с уровнями до 2 g при полосе частот до 1 кГц погрешности ММГ-2 не превышают 1⁰/с, но при 10 g могут быть больше 10⁰/с.

В дальнейших исследованиях в первую очередь следует оценить, насколько приведенные и ранее полученные результаты можно считать типичными для разных образцов приборов [7].

Испытания на ударном стенде

Для оценки устойчивости гироскопа ММГ-2 проводились испытания на ударном стенде TiraShock 4120. Основными параметрами, которые контролировались в ходе испытаний, были стойкость гироскопов к значительным ударным нагрузкам и время восстановления номинальных характеристик прибора после удара.

Проводились испытания двух образцов ММГ-2 при пиковых значениях 1200 и 200 g с длительностью 0,3 и 3,3 мс соответственно.

Результаты испытаний представлены на рис. 8 и в табл. 4.

Время восстановления характеристик после удара оценивалось по времени прихода выходного сигнала к одному из двух установившихся значений точности ММГ – 0,5 и до 5°/с.

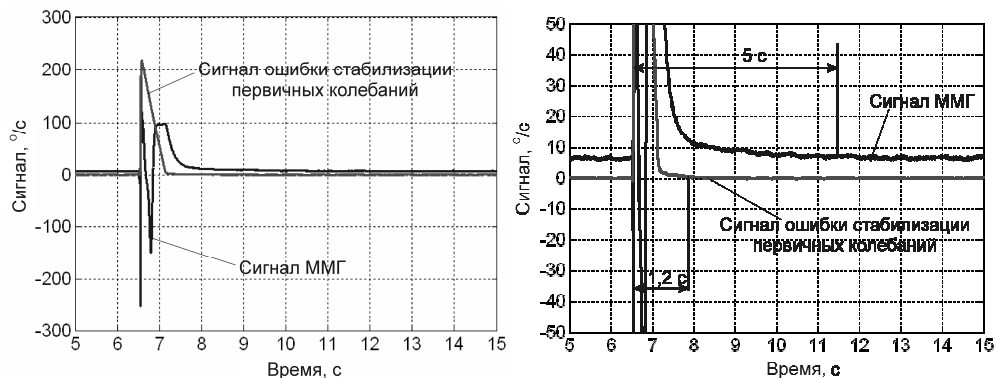


Рис. 8. Изменения характеристик ММГ при ударе 1200 g (график сигнала ошибки стабилизации первичных колебаний показан условно для оценки формы сигнала)

Таблица 4

Время восстановления характеристик ММГ после действия удара (в секундах)

Номер ММГ	Направление удара	Удар 1200 g, 0,3 мс		Удар 200 g, 3,3 мс	
		Точность, °/с		Точность, °/с	
		<0,5	<5	<0,5	<5
1	x	2,2	1,1	1,6	1,1
	y	2,2	1,1	1,6	1,1
	z	5	1,1	1,6	1,1
2	x	1,6	0,9	1,6	0,9
	y	1,6	0,9	1,6	0,9
	z	1,6	0,9	1,6	0,9

Из результатов испытаний на ударном стенде следует, что ММГ выдерживает перегрузки до 1200 g и восстанавливает свою работоспособность, что подтверждает полученные ранее теоретические оценки [5, 8]. Однако метрологические характеристики прибора после удара возобновляются длительное время. Например, при ударе по направлению оси Z время восстановления номинальных характеристик с точностью до 0,5°/с может достигать до 5 с.

Одной из причин нарушения работоспособности прибора является касание ротором неподвижных частей конструкции. Это особенно очевидно при ударах выше 1000 g, когда вследствие конечной жесткости упругого подвеса происходит касание и нарушение режима первичных колебаний (см. рис. 8). При высокой добротности подвеса ЧЭ необходимо достаточное время для повторного разгона ротора до номинальной амплитуды первичных колебаний.

Временное нарушение работоспособности прибора ММГ-2 при ударах на уровне 200 g обуславливается сложной формой импульса ускорения. На рис. 9 показана осциллограмма записи ударного воздействия. Как видно из графика, 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 по приведенной записи оценивается в 0,3–0,5 мс. Физически сложная форма импульса может появляться на реальных объектах и означать, что на ММГ действует не только ударное воздействие, простое по форме, но и вибрация различной частоты: линейная и угловая [9]. Широкополосное воздействие повышает вероятность касания ротором неподвижных частей конструкции прибора.

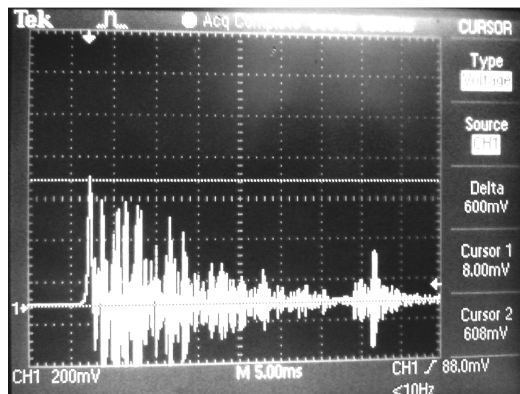


Рис. 9. Осциллограмма удара 1200 g

Один из возможных путей исключения соприкосновения ротора с корпусом состоит в введении демпфирующей обратной связи, апробированной на предыдущих образцах гироскопов и позволившей уменьшить возможность появления срывов колебаний [7]. Такой же способ может быть рекомендован для снижения времени восстановления характеристик ММГ после ударных воздействий.

Выводы

1. Воздействие постоянных линейных ускорений вызывает упругие перемещения ротора, что приводит к изменению масштабного коэффициента и к смещению нуля прибора. Наиболее существенные изменения характеристик ММГ происходят при воздействии ускорения по направлению, перпендикулярному плоскости ротора, и составляют 0,27 %/g для масштабного коэффициента и 0,86°/с/g для смещения нуля. Изменения характеристик при воздействии ускорений по другим осям примерно на два порядка меньше.

2. При вибрационных воздействиях с уровнями ускорений до 10 g метрологические характеристики ММГ (смещение нуля, масштабный коэффициент) изменяются существенно, погрешности могут иметь порядок 1-12°/с. Наибольшее воздействие оказывают вибрации по направлению, перпендикулярному плоскости ротора. Амплитуды виброускорений, практически не

влияющие на точность прибора, находятся на уровне 1 g. В поддиапазонах частот выше 1 кГц наблюдается значительное увеличение погрешностей в выходном сигнале до 300-500⁰/с на определенных резонансных частотах. Это является предметом дальнейших исследований.

3. Во время действия удара с пиковыми значениями ~200 g и более ММГ теряет свою работоспособность. При этом выявлено относительно длительное время восстановления режима нормальной работы после удара – примерно несколько секунд. По прочности прибор выдерживает удары с пиковыми значениями ускорения на уровне 1200 g.

4. Полученные результаты позволяют определить пути снижения влияния вибраций и ударов на характеристики ММГ как датчика угловой скорости при сохранении на требуемом уровне его метрологических характеристик.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00153а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Geen J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems Magazine, November 2004, pp. 12-17.
2. **Пешехонов, В.Г.** Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» /В.Г. Пешехонов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С.29-31.
3. **Евстифеев, М.И.** Результаты экспериментального исследования влияния линейных перегрузок на характеристики ММГ RR-типа / М.И.Евстифеев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2. – С.100.
4. **Патент 2269746** РФ, МПК G01 С 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // М.И.Евстифеев, Л.П.Несенюк, В.Г.Пешехонов, А.А.Унтилов; заявл.06.12.2004; опубл. 10.02.2006.- Бюл. № 4. – 8 с.
5. **Евстифеев, М.И.** Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М.И.Евстифеев, Д.В.Розенцвейн // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. - 2010. - № 4.- С.46-50.
6. **Евстифеев, М.И.** Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. - 2002. - № 2. - С. 19-25.
7. **Евстифеев, М.И.** Исследование по ведению чувствительного элемента микромеханического гироскопа на вибрирующем основании / М.И. Евстифеев [и др.] // Навигация и управление движением. – Материалы VII конференции молодых ученых. – 2006. – С. 168-174.
8. **Евстифеев, М.И.** Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И.Евстифеев, Д.В.Розенцвейн, И.Б.Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3 – С.22-34.
9. **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.- Hyatt Regency Hotel Monterey, CA, pp. 232 - 237.

Abstract. Test results of the micromechanical RR-type gyro of MMG-2 modification, designed in CSRI "Elektroprigor", are presented.
The experimental estimations of the metrological characteristic variations when tests on centrifuge, vibration stand and shock table are carried out.
Functions of device parameters related to mechanical effect are obtained.
Methods of reduction of the vibration and impact influence on characteristics of MMG as angular rate sensor are determined.