

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, Д. П. ЕЛИСЕЕВ, И. Б. ЧЕЛПАНОВ

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Рассматриваются основные методы повышения стойкости микромеханических гироскопов (ММГ) к механическим воздействиям. На базе выявленных признаков, используемых как критерии стойкости, предложена многоаспектная классификационная схема, позволяющая систематизировать данные об их взаимосвязях с конструктивным исполнением приборов, в состав которых входят ММГ, и выявлять новые, перспективные принципы их построения.

Ключевые слова: повышение стойкости, конструктивное исполнение приборов, классификационная схема

Введение

В настоящее время широко используются микромеханические гироскопы (ММГ) в различной аппаратуре гражданской и военной техники [1, 2]. Современные требования к характеристикам и показателям ММГ постоянно повышаются в связи с расширением областей применения, в значительной мере отличающихся все более высоким уровнем внешних воздействующих факторов, в частности более широким диапазоном параметров вибраций и ударов. Потребность в микромеханических приборах, сохраняющих показатели точности и другие эксплуатационные характеристики при расширенных диапазонах параметров воздействий, существует в таких областях, как подземная навигация при проходке скважин, военная техника, строительство, все транспортные средства, железно- и автодорожное хозяйство [3–6]. При этом требуется обеспечение стойкости (работоспособности и сохранения показателей точности) ММГ в особо жестких условиях. Стойкость ММГ должна обеспечиваться при следующих параметрах внешних инерционных воздействий: амплитуда виброускорений до 15 g, частотный диапазон до 5 кГц, удары с пиковыми значениями ускорений до 20000 g при длительности порядка 0,1 мс. Отметим, что при длительно действующих перегрузках их значения устанавливаются на уровне от нескольких десятков до 100 g, что значительно ниже, чем при ударах, но выше, чем при виброиспытаниях.

Сами конструкции ММГ, как правило, очень жесткие. Ввиду малой массы (единицы граммов) и малых габаритов (~10 мм) низшие собственные частоты

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

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

Челпанов Игорь Борисович. Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

таких конструктивных элементов ММГ, как чувствительный элемент (ЧЭ) в виде чипа, содержащего инерционное тело (ИТ) на упругом подвесе (УП), находятся в диапазоне от единиц до десятков кГц. Это в соответствии с результатами многократно произведенных расчетов должно исключать резонансные явления в установленной для виброиспытаний полосе частот до 2 кГц. Практически все современные ММГ демонстрируют работоспособность в полосе частот до 1 кГц, некоторые образцы сохраняют метрологические характеристики при вибрациях и до 2 кГц, при этом вибропрочность обеспечивается до 5 кГц [7, 8]. Судя по данным публикаций, более высокую стойкость могут иметь полностью твердотельные ММГ на поверхностных акустических волнах, однако их разработка еще не вышла за рамки лабораторных исследований [9]. При представлении результатов определения метрологических характеристик ММГ в одних случаях достаточно установить, до каких значений амплитуд ускорений дополнительные погрешности ММГ пренебрежимо малы, а в других – важны только сохранность характеристик и время восстановления после окончания воздействий.

Повышению вибрационной и ударной стойкости ММГ уделяется существенное внимание, показатель их стойкости к механическим воздействиям считается одним из ключевых показателей [10]. Следует отметить, что с 2002 года в США под эгидой оборонного агентства DARPA разрабатывается программа HERMiT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology), которая первоначально была ориентирована на создание новой технологии корпусирования и контроля внутренней среды микромеханических приборов в неблагоприятных условиях эксплуатации. На сегодняшний день цели программы расширены до поиска решения вопросов повышения надежности и долговременной стабильности радиочастотных переключателей, высокочастотных резонаторов и ММГ [11]. Одним из важных направлений этой программы является обеспечение работоспособности ММГ при высоких значениях ударов и вибрации.

Цель настоящей работы – систематизация различных методов и технических решений по повышению стойкости ММГ к механическим воздействиям в соответствии с выбранными классификационными признаками. Аналогично классифицированию признаков конструкций ММГ [12] рассмотрение разнообразных сочетаний выбранных признаков позволяет ускорить поиск рациональных конструктивных решений разрабатываемых и изготавливаемых приборов и структурировать базы данных в системах автоматизированного компьютерного проектирования [13].

Погрешности ММГ от вибраций

Конструкции подвесов ИТ, схемы размещения датчиков в ММГ, а также алгоритмы преобразования внутренних сигналов строятся так, что чувствительность микромеханических гироскопов по отношению к линейным ускорениям должна быть по возможности низкой. Тем не менее по результатам численных расчетов при использовании даже достаточно простых математических моделей, а также по данным испытаний линейные ускорения приводят к появлению дополнительной погрешности измеряемой угловой скорости. Эта погрешность δ_{ω} зависит от частоты вибраций, но в первую очередь от амплитуд W_0 виброускорений. Самая простая, но содержательная квазистатическая и нелинейная расчетная модель воздействия виброускорения $w(t)$ приближенно представляется первыми членами разложения в степенной ряд

$$\delta_{\omega}(t) \approx a_1 w(t) + a_2 w^2(t). \quad (1)$$

Вопрос о происхождении и физике возникновения нелинейности до сих пор окончательно не решен, хотя есть правдоподобные гипотезы. При синусоидальной вибрации $w(t) = W_0 \sin vt$, где v – частота вибрации, получаем

$$\delta_{\omega}(t) = a_1 W_0 \sin vt + \frac{1}{2} a_2 W_0^2 - \frac{1}{2} a_2 W_0^2 \cos 2vt. \quad (2)$$

Первое и третье слагаемые – колебательные; в результатах испытаний они могут быть разделены частотным анализом или синхронным детектированием; во многих приложениях их можно рассматривать как дополнительные помехи, имеющие нулевые средние значения. Очень часто результаты виброиспытаний представляются записями выходного сигнала в виде размытой полосы; по ее ширине можно грубо оценить коэффициент a_1 линейной модели. Наличие второй гармоники меньшей амплитуды, но значимого уровня будет свидетельствовать о нелинейности. Очевидно, что коэффициент a_1 может быть определен иначе, при испытаниях на постоянные перегрузки (на центрифуге), и тогда он является статическим коэффициентом влияния ускорения [14].

Однако для многих приложений, особенно когда интегрированием сигнала ММГ определяются приращения углов, важна постоянная составляющая, имеющая смысл дополнительного смещения нуля ММГ, пропорциональная квадрату амплитуды виброускорений и определяемая вторым слагаемым с коэффициентом a_2 . Отметим, что для эффекта появления постоянной составляющей в исходном выражении (1) совсем не обязательно вводить квадратичное слагаемое, важно лишь отличие этой зависимости от асимметричной, т.е. содержащей только нечетные степени аргумента.

Как правило, в паспортных данных приборов приводится параметр «допустимые уровни вибраций...», что, конечно, не позволяет определять дополнительные погрешности. Однако в некоторых случаях указываются следующие параметры: коэффициент влияния a_1 , который может характеризовать чувствительность к постоянному или переменному (медленно изменяющемуся) ускорению, имеющий размерность или измеряемый в единицах $[\text{°/c/g}]$, и второй коэффициент влияния a_2 смещения нуля к вибрационному воздействию, имеющий размерность или измеряемый в единицах $[\text{°/c/g}^2]$. Подобный же эффект появления дополнительного смещения нуля наблюдается при колебательных углах поворота основания, даже если среднее значение угловой скорости (или приращение угла) равно нулю.

Исходная модель (2) не единственная, к сходным зависимостям приводит допущение о том, что дополнительное смещение нуля имеет ту же природу, что и исследованный эффект неравножесткости подвеса ММГ [15]. В стандарте IEEE в качестве варианта предлагается рассматривать кусочно-линейные характеристики ММГ с различными наклонами при отрицательных и положительных значениях аргументов; при этом, однако, зависимость будет получаться линейной, а коэффициент преобразования будет иметь размерность $[\text{°/c/g}]$. В дальнейшем также подлежат описанию и исследованию более сложные модели, в которых должно приниматься во внимание направление вибраций, а также учитываться динамические эффекты при высоких частотах вибраций.

Учет динамики при вибрационных воздействиях безусловно необходим, если низшая собственная частота ИТ на УП находится в диапазоне частот вибраций, что приводит к резонансным явлениям. Однако встречаются и более сложные ситуации резонансов на субгармониках на частотах, составляющих $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$ от

собственной частоты [16, 17]. Возможны также резонансы на комбинационных частотах, когда частоты собственные и вибрационных воздействий относятся, как целые числа [18]. Появление таких резонансов реально возможно только при очень высокой добротности механических систем, что и имеет место в конструкциях ММГ. Кроме того, следует учитывать, что резонансы на комбинационных частотах наблюдаются при очень точной настройке частоты вибрации.

Классификация методов повышения стойкости ММГ

Проведенный анализ существующих и разрабатываемых путей, методов и технических решений по повышению стойкости ММГ позволяет разделить эти методы на *структурно-конструктивные* и *алгоритмические* (рис. 1).

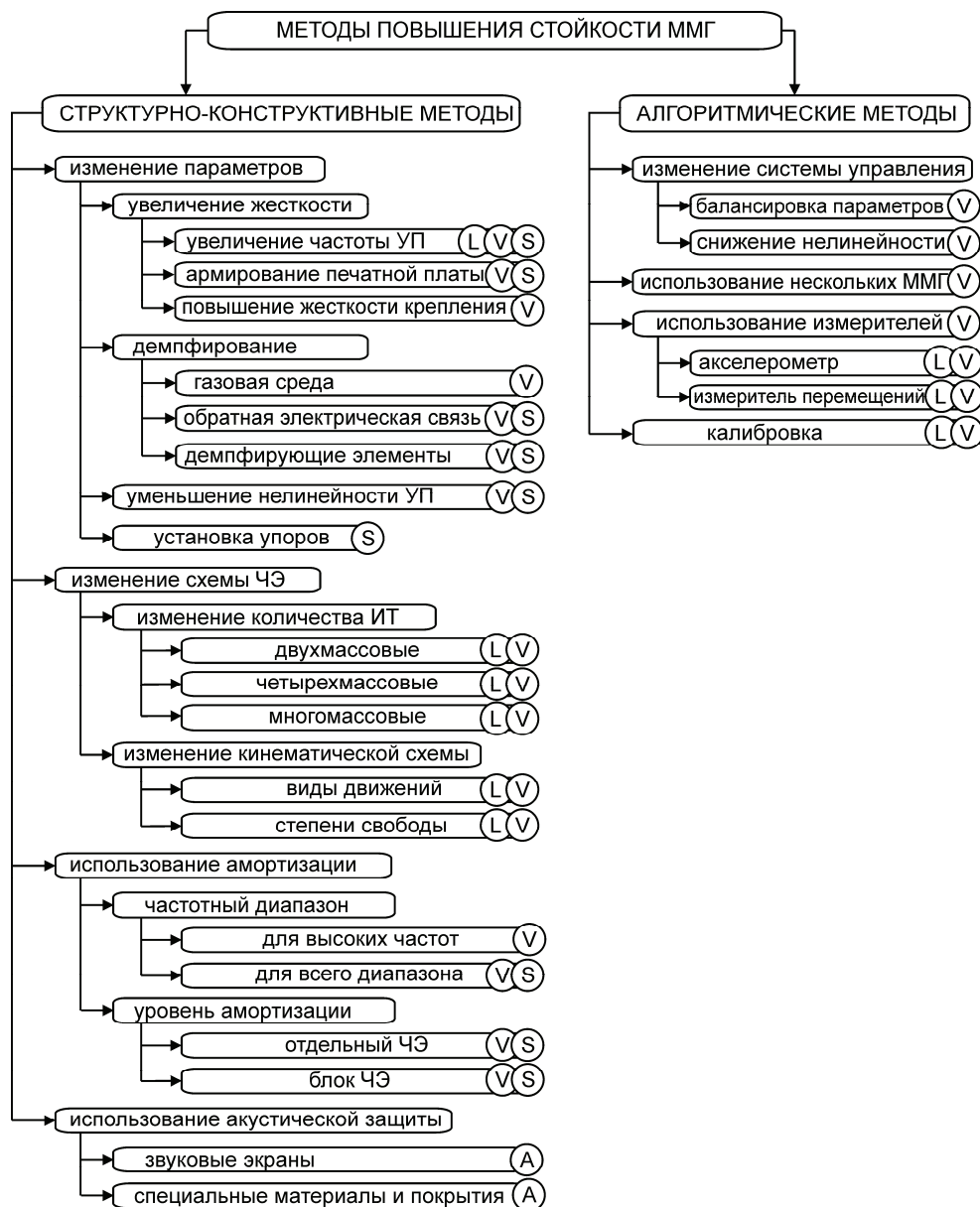


Рис. 1. Классификационная схема методов повышения стойкости ММГ к механическим воздействиям

Классификационный признак *структурно-конструктивных методов* описывает решения, реализуемые в ЧЭ ММГ или в приборе в целом, в виде изменений параметров прибора, модификации схемы измерителя, использования амортизации того или иного вида. Классификационный признак *алгоритмических методов* связан с разработкой процедур и схем преобразования сигнала в ЧЭ, с использованием нескольких ЧЭ или дополнительных измерителей для обработки сигналов в реальном времени.

Имеется в виду, что в процессе эксплуатации ММГ подвергаются воздействию постоянных или медленно меняющихся линейных ускорений, поступательной и угловой вибрации, ударов, акустического шума [19, 20]. На рис. 1 приведены обозначения методов повышения стойкости, наиболее действенных, по мнению авторов, по отношению к тем или иным воздействиям: «L» (*linear acceleration*) – методы, эффективные при постоянных ускорениях основания; «V» (*vibration*) – при вибрации основания; «S» (*shock*) – при ударных нагрузках; «A» (*acoustic*) – при акустическом шуме. Для повышения стойкости ММГ к любым механическим воздействиям необходимо использование комбинаций целого комплекса мер, основанных на различных методах.

Структурно-конструктивные методы повышения стойкости ММГ

Изменение параметров ЧЭ и его УП представляет собой подкласс структурно-конструктивных методов, связанный с повышением жесткости структуры механической системы «ИТ – установочная поверхность ММГ», со снижением нелинейности УП, с повышением демпфирования для снижения амплитуд резонансных колебаний, с ограничением перемещений ИТ. При этом приходят во взаимное противоречие требования прочности (обеспечение высокой жесткости) и эффективной амортизации воздействий от вибраций (уменьшение жесткости и увеличение демпфирования).

Очевидным методом повышения стойкости конструкции ММГ по отношению к вибрационным воздействиям является повышение жесткости и собственных частот ИТ на УП по оси первичных колебаний. В таблице приведены данные по собственным частотам колебаний ИТ на УП в ММГ различных производителей. Пределы получения высоких собственных частот ИТ на УП на уровне 30 кГц, по-видимому, объясняются технологической невозможностью реализации элементов УП требуемой толщины вследствие сверхмалых габаритов ММГ (гироскоп *ISZ-1215* имеет размеры 4×5×1 мм).

Фирма-производитель	Модель ММГ	Низшая собственная частота ИТ на УП, кГц
InvenSense	ISZ-1215	30
Silicon Sensing	CRS09	28
STMicroelectronics	L2G2IS	20
Analog Devices	ADXRS646	17,5
	ADXRS150	14
Kionix	KGF01	10
SensoNor	SAR100 (ButterflyGyro™)	9,4
Melexis	MLX90609	8,2
ЦНИИ «Электроприбор»	ММГ-ЭПТРОН	8
	ММГ-2	3

Повышение низшей собственной частоты ИТ на УП снижает амплитуду первичных колебаний и, соответственно, сдвигает вправо диапазон чувствительности ММГ к вибрации [16, 20]. Следует учитывать, что при этом уменьшается коэффициент преобразования (чувствительность) к измеряемой угловой скорости (при увеличении частоты УП в 2 раза чувствительность ММГ к угловой скорости снижается примерно в 3,2 раз) и не устраняется причина появления субгармонических резонансов при вибрации [17].

При анализе динамических воздействий, в первую очередь вибрационных, нужно учитывать свойства всей цепи упругих элементов от источника воздействия до ИТ (рис. 2).

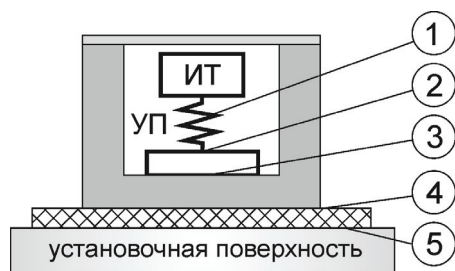


Рис. 2. Схема последовательного крепления в ЧЭ ММГ:

- 1) УП, связывающий ИТ и основание чипа;
- 2) УП к основанию чипа; 3) чип в корпусе ММГ; 4) корпус ММГ на печатной плате;
- 5) печатная плата к установочной поверхности

Во всех случаях сказываются как сами элементы, так и соединяющие их слои. Повышение жесткости структуры достигается использованием достаточно жестких высокочастотных УП (1), прочных соединений типа сварки или пайки (2, 3, 4), печатных плат с алюминиевым основанием (5, рис. 3, а), увеличением площади крепления платы к установочной поверхности (5). Например, на рис. 3, б показано крепление круглой платы с ММГ в инерциальном модуле, спроектированном в Лаборатории Ч. Дрейпера (США), как по периферии, так и в центре [21]. При испытаниях ММГ-ЭПТРОН наилучшие

результаты достигнуты при фиксировании клеем всей прилегающей поверхности платы [16].

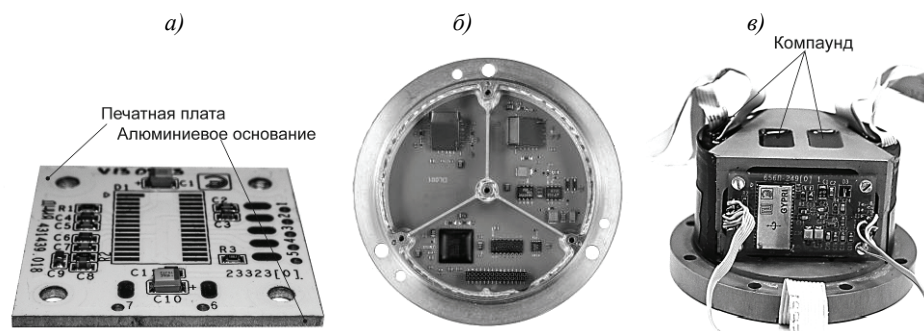


Рис. 3. Методы повышения стойкости элементов структуры «ИТ – установочная поверхность»: а) печатная плата на алюминиевом основании; б) крепление платы ММГ в инерциальном модуле; в) заливка модуля ММГ-ЭПТРОН компаундом

Выше отмечалось, что колебательная система, образуемая ИТ на УП, как правило, имеет высокую добротность. Для снижения уровней резонансных пиков используется демпфирование, которое может быть реализовано в ЧЭ заменой вакуумирования внутренней полости на газовую среду, как в ММГ фирмы Analog Devices (США), либо путем формирования канала демпфирования колебаний ИТ в виде цепи обратной электрической связи [22]. Следует учитывать, что снижение добротности колебательного контура уменьшает амплитуду вторичных колебаний и чувствительность к угловой скорости. Однако это позволя-

ет снизить чувствительность ММГ к воздействию вибраций и ударов. К тому же с использованием таких методов можно существенно снизить время восстановления работоспособности ММГ после окончания удара. Например, прибор KGF01, в котором осуществляется демпфирование, после удара 500 г имеет время восстановления 0,25 с, а для прибора ММГ-2 время восстановления после удара с пиковым значением 1200 г доходит до 5 с [14], что недопустимо при использовании ММГ на быстро движущихся объектах.

В качестве демпфирующих элементов для подавления колебаний элементов конструкции модуля ММГ используют заполнение внутренних полостей наружных корпусов компаундами или другими пластичными связующими составами, что значительно повышает стойкость собранного прибора к ударам и вибрации (рис. 3, б). Основная сложность применения компаундов заключается в необходимости обеспечения их достаточной теплопроводности для исключения перегрева внутренних элементов.

Одним из эффективных методов повышения вибро- и ударостойкости ММГ может быть использование в корпусах модулей демпфирующих (с высоким внутренним трением) сплавов. Сплавы высокого демпфирования и высокодемпфирующие стали, разработанные в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина на основе металлических систем $Fe-Al$ и $Fe-Cr$, отличаются высокой демпфирующей способностью при малых и средних амплитудах знакопеременного нагружения и предназначены для борьбы с шумами и вибрациями [23]. Использование таких сталей, а именно стали 16ХЮМТБ-ВИ взамен стали 12Х18Н10Т, в конструкции кронштейна модуля ММГ позволяет снизить амплитуду резонансных колебаний при вибрации в 2-3 раза, а время восстановления после удара уменьшить примерно в 5 раз [24]. Демпфирование может быть достаточно большим в пластмассах, однако большинство из них не обладает высокой стабильностью формы и размеров и сохранением свойств в широких диапазонах изменения температур. Во всех случаях следует иметь в виду, что демпфирующие свойства материалов проявляются в большей степени, когда имеют место механические напряжения в конструкциях; при этом, конечно, нужно учитывать требования обеспечения достаточных запасов прочности.

Известно, что нелинейность УП при первичных крутильных колебаниях ИТ обусловлена наличием как изгибной жесткости, так и жесткости элементов на растяжение–сжатие, что вызывает возникновение нелинейной восстанавливающей силы. Особенностью систем с нелинейной восстанавливающей силой является появление нескольких (обычно двух) устойчивых периодических режимов с различными амплитудами автоколебаний или вынужденных колебаний при изменении частоты в определенных пределах при возможности спонтанного перехода колебательной системы из одного режима в другой без каких-либо дополнительных внешних воздействий. Однако при вибрациях и ударах, в том числе и об упоры, существенно возрастает возможность проявления срывов и скачков амплитуд колебаний ИТ, вибрационных смещений нуля, нелинейного (демультипликационного) резонанса [25]. В настоящее время предложены и реализованы способы снижения нелинейности УП за счет изменения конфигурации его элементов, при этом коэффициент нелинейности снижается до 200 раз [26], что позволяет повысить стойкость ММГ к нагрузкам.

Для улучшения свойств вибро- и ударостойкости ЧЭ можно использовать методы введения ограничений на перемещения ИТ в упругом подвесе с помощью упоров, которые вступают в действие только при достаточно больших перемещениях. Это позволяет уменьшить амплитуду колебаний ИТ при больших

перегрузках, избежать электрического замыкания проводников подвижных и неподвижных электродов и снизить пиковые значения механических напряжений в УП, что существенно повысит запасы прочности УП и вибро- и ударостойкость ММГ [27]. Конструктивно ограничения перемещений ИТ обеспечиваются различными упорами, которые разделяются на три вида: жесткие (жесткость упоров существенно выше жесткости ИТ и УП), нелинейные (жесткость нелинейно возрастает в процессе сближения при контакте ИТ с упором) и линейные мягкие (упоры с эластичным покрытием, деформации которых существенно влияют на усилия) [28]. При контакте ИТ с упорами происходит значительное изменение напряженно-деформированного состояния как УП, так и самого ИТ с потерей плоской формы изгиба последнего. Анализ такого динамического процесса деформирования при контакте требует специальных методов расчета с использованием конечно-элементного анализа [29].

Структурные методы, связанные с изменением схемы прибора и используемые для повышения стойкости гироскопов, основаны на использовании в одном ММГ нескольких ИТ для компенсации воздействия инерционных нагрузок (сил инерции) на уровне ЧЭ. Принцип работы таких приборов основан на использовании двух и более ИТ, совершающих противофазные колебания, что позволяет использовать дифференциальный режим измерения и парировать действие инерционных ускорений [30]. Наиболее известные реализованные конструкции ММГ с двумя ИТ (двухмассовые) – приборы фирмы *Analog Devices*, например *ADXRS150 (L-L тип)* [31], фирмы *Sensoror*, например *SAR500 (R-R тип, ButterflyGyro™)* [32] и камертонный гироскоп *TFG Draper Laboratory (L-R тип)* [21]. В перечисленных гироскопах ИТ расположены в одной плоскости. При расположении ИТ друг над другом и при соответствующем замыкании обратных электрических связей повышаются возможности увеличения стойкости ММГ к линейным ускорениям, как предложено фирмой *Robert Bosch GmbH* [33]. Для улучшения показателей стойкости используют большее количество ИТ. Запатентованы решения по реализации ММГ с четырьмя и больше ИТ [34, 35], имеющими угловые степени свободы. В 2011 году фирма *Analog Devices* представила разработку нового четырехмассового ММГ *ADXRS646* [8] с пониженной чувствительностью к линейным ускорениям и вибрации, что достигается использованием четырех ИТ с механической связью между ними.

Сложность разработки многомассовых систем ММГ состоит в необходимости с высокой точностью обеспечивать равенство собственных частот ИТ на УП при отсутствии механической связи между подвесами или определенное соотношение между частотами при ее наличии. Обеспечение равенства частот для несвязанных ИТ ограничено точностью технологии фотолитографии, используемой при формообразовании УП и ИТ. По оценке в [36], достижимое рассогласование параметров при существующей точности изготовления составляет 1%; для более высокой точности необходимо использование специальных корректирующих средств. При механической связи между ИТ в гироскопе типа *TFG* для снижения чувствительности к вибрации рекомендован метод разнесения частот синфазных и противофазных колебаний ИТ в УП [37].

Вибро- и ударостойкость ММГ в значительной мере определяется кинематикой движений ИТ. В разных вариантах ИТ на УП может совершать поступательные, угловые или комбинированные движения по осям первичных и вторичных колебаний. Особенно часто для ММГ встречается классификация по степеням свободы, условно разделяемым на схемы с поступательными движениями по координате возбуждения и измерения (тип *L-L*), с угловыми движе-

ниями по обеим координатам (тип $R-R$) и с различными комбинациями поступательных и угловых движений (тип $L-R$). Гироскопы с поступательным движением ИТ $L-L$ типа по принципу построения наиболее чувствительны к поступательной вибрации, особенно в диапазонах собственных частот. Поэтому в таких конструкциях собственные частоты поднимают выше верхней границы установленного диапазона частот виброиспытаний, что повышает стойкость к ускорениям, но снижает чувствительность приборов к измеряемой угловой скорости. Гироскопы $R-R$ типа в идеале должны были быть нечувствительны к поступательной вибрации, однако технологические погрешности, наличие нелинейностей, чувствительность к угловым ускорениям приводят к чувствительности к перегрузкам. Гироскопы $L-R$ типа обладают как достоинствами, так и недостатками двух предыдущих схем.

При невозможности или недостаточной эффективности средств повышения вибростойкости на уровне ЧЭ используются методы внешней механической изоляции от механических воздействий. Реализуются такие методы путем создания амортизирующих устройств различного вида. Это могут быть простейшие резиновые или пластиковые прокладки или оболочки, в которых размещаются ММГ [10], специальные микроплатформы с виброизоляторами [11, 38], выполненные на уровне вафли, или виброударозащитные корпуса для всего инерциального модуля [39].

В зависимости от способа исполнения амортизация может обеспечивать виброзащиту во всем диапазоне частот (очевидно, с разной эффективностью в зависимости от частоты вибраций) либо только на высоких частотах, в диапазонах собственных частот ИТ на УП. Требования к виброзащите ММГ специфичны. Ввиду малости размеров и вследствие высоких собственных частот (килогерцы) амортизация может быть полезной, начиная с частоты 1 кГц. Это означает, что система амортизации может иметь достаточно высокую жесткость и обеспечивать только малые относительные виброперемещения (несколько единиц микрометров). К одним, упрощенным типам амортизаторов могут быть отнесены резиновые прокладки, к другим – виброизолирующие платформы. Эффективность и возможность реализации того или иного вида амортизации зависит от достижений технологии, алгоритма использования ММГ (отдельный прибор или инерциальный модуль), уровня и спектра внешних вибрационных воздействий.

В настоящее время все больше внимания уделяется стойкости ММГ к акустическим воздействиям. Сигнал ММГ значительно возрастает при приближении частоты акустического шума к резонансным частотам УП [16]. При определенном уровне звукового давления может происходить отказ прибора.

Звуковое давление в логарифмическом масштабе измеряется в децибелах (дБ). Технические средства измерения звукового давления широко используются, например, в охране труда. Существуют шкалы сопоставления уровней шумов, воспринимаемых человеком, и оцениваемых по приборам. Однако для испытаний приборов предусматриваются такие высокие уровни звуковых давлений, которые на порядки превосходят допустимые для человека. Стандарты диктуют требования к стойкости приборов вплоть до 170 дБ в полосе частот от 20 Гц до 20 кГц. Такие требования обусловлены тяжелыми условиями эксплуатации ММГ на различных технических объектах. Например, при работе сваебойной машины или копра звуковая нагрузка составляет 110 дБ, шум от реактивной струи вблизи при взлете самолета – 140 дБ, при взлете большой ракеты – 170 дБ.

В результате проведенного эксперимента определено [40], что при уровне давления 100 дБ гироскоп ADXRS300 еще способен определять угловую скорость основания (вращающегося стола), а при звуковом давлении 130 дБ уровень шума настолько высок, что гироскоп практически неработоспособен.

Для испытаний на акустические воздействия требуется специальные стенды. Для пробных исследовательских испытаний можно использовать устройства звуковоспроизведения мощных акустических систем. Но серьезная проблема заключается в построении замкнутой камеры с незначительными эффектами звукоотражения и с очень хорошей звукоизоляцией для обеспечения безопасности работающего персонала и отсутствия помех другому работающему оборудованию [41]. Такие камеры выпускаются несколькими фирмами.

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что для обеспечения нормальной работы ММГ в условиях мощных акустических воздействий требуется значительное снижение звукового давления непосредственно на гироскоп – в конструкции необходимо предусматривать специальные звукозащитные экраны для эффективной защиты от акустических воздействий или использовать специальные поглощающие материалы при корпусировании датчика [42]. Альтернативным методом является увеличение собственной частоты УП выше частоты акустических воздействий с соответствующим снижением чувствительности ММГ к угловой скорости.

Алгоритмические или схемотехнические методы повышения вибро- и ударостойкости

Класс алгоритмических методов повышения стойкости основан на использовании дополнительных процедур преобразования сигнала в ЧЭ (см. рис.1). Одним из методов повышения стойкости ММГ к ускорениям является модификация его электронной системы управления (СУ). При вибрационных испытаниях ММГ-2 было выявлено наличие субгармонических резонансов в полосе частот до 2 кГц [14]. Более подробные исследования [17] показали, что возникновение таких резонансов обусловлено нелинейностью характеристик датчиков угла и момента и неидентичностью параметров (емкостей, площадей, зазоров, напряжений и пр.) в парах датчиков угла и момента. При измерении емкостей датчиков угла и момента на этапе сборки приборов и введении дополнительных цепей в СУ возможно повышение стойкости ММГ и подавление субгармонических резонансов.

При использовании нескольких ЧЭ в составе модуля ММГ для повышения вибростойкости предложено использовать метод мажоритарного выбора в качестве алгоритма преобразования выходного сигнала [43]. За счет избыточного числа однотипных ЧЭ, обладающих разной реакцией на вибрационное воздействие, выбирается сигнал того ММГ, у которого отсутствует на выходе ложный сигнал высоких уровней вследствие субгармонических резонансов. Для того чтобы ложные сигналы при действии вибраций на одной частоте не возникали одновременно на выходе двух ММГ, собственные частоты ИТ на УП должны отличаться не менее, чем на 10%.

Для определения реакции ММГ на входное инерционное воздействие в целях последующей компенсации (корректировки выходного сигнала) ММГ может быть дополнен акселерометром [44] или датчиком перемещений ИТ [45, 46]. В расширение возможностей упомянутых методов могут быть использованы результаты калибровки ЧЭ ММГ для определения чувствительности ММГ к

постоянным ускорениям и к вибрации. Знание коэффициентов чувствительности к ускорениям при последующей компенсации позволит повысить эксплуатационные характеристики ММГ при соответствующей обработке выходного сигнала. Применение таких методов для устранения ошибки от высокочастотной вибрации связано с трудностями создания сложной системы, обеспечивающей требуемые фазовые соотношения между сигналом помехи и сигналом акселерометра. Согласно оценкам [10] подобные методы наиболее эффективны при компенсации влияния постоянных или низкочастотных ускорений.

Выводы

Анализ существующих и перспективных методов и технических решений по повышению стойкости ММГ к механическим воздействиям позволил с общих позиций разделить их на структурно-конструктивные и алгоритмические методы. Структурно-конструктивные методы включают изменение параметров, модификацию схемы измерителя, использование амортизации. К алгоритмическим методам относятся разработка процедур преобразования сигнала, использование нескольких ЧЭ или дополнительных измерителей для получения сигналов в реальном времени.

Предложена классификация, охватывающая большой спектр методов и определяющая место новых вариантов приборов путем разнообразных комбинаций вариантов методов. Комплексный подход с использованием широкого арсенала средств различных методов позволяет эффективно повысить стойкость ММГ к внешним механическим воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов, В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1. – С. 3-16.
2. **Пешехонов, В.Г.** Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы / В.Г. Пешехонов [и др.] // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2012. – № 19. – С. 108-114.
3. **Биндер, Я.И.** Мобильная инклинометрическая станция на основе микромеханических чувствительных элементов для съемки траекторий стволов группы скважин подземной выработки / Я.И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 95-106.
4. **Пешехонов, В.Г.** Микромеханические инерциальные преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике / В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк, Д.Г. Грязин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 28-32.
5. **Коновалов, С.Ф.** Инерциальный метод измерения перемещений строительных свай в процессе забивки / С.Ф. Коновалов, В.П. Подчерзев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4. – С. 14-23.
6. **Боронахин, А.М.** Исследование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути / А.М. Боронахин [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 1. – С. 57-66.
7. **Богданов, М.Б.** Результаты исследовательских испытаний инерциального измерительного блока АИСТ-350Т на стойкость к механическим воздействиям // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4. – С. 84-93.
8. **ADXRS646.** High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope / Data Sheet. Analog Devices. 2012. – 12 p.
9. **Лукьянов, Д.П.** Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах / Д.П. Лукьянов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 3. – С. 75-87.
10. **Weinberg, H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – September 2011. – pp. 1-5.

11. **Nguyen, C.** The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) Program: Success and Some Unfinished Business // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, June 2012, pp. 1-3.
12. **Евстифеев, М.И.** Классификационные признаки конструкций микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 3. – С. 30-37.
13. **Евстифеев, М.И.** Анализ компьютерных средств проектирования микромеханических гироскопов с позиций мехатроники // М.И. Евстифеев [и др.] / Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 31-37.
14. **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.
15. **Евстифеев, М.И.** Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 2. – С. 19-25.
16. **Некрасов, Я.А.** Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа / Я.А.Некрасов [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 226-235.
17. **Евстифеев, М.И.** Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания / М.И. Евстифеев, А.С. Ковалев, Д.П. Елисеев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 3. – С. 24-32.
18. **Лестев, А.М.** О комбинационных резонансах в динамике микромеханических гироскопов / А.М.Лестев // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 3. – С. 53-58.
19. **Acar C., Shkel A.** MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness / Springer Science. – 2009 – 262 p.
20. **Евстифеев, М.И.** Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С.119-133.
21. **Barbour, N.** Inertial MEMS System Applications /N. Barbour [et al.]// Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12.
22. **Патент 2447403 РФ**, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп // Я.А. Некрасов; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.04.2012; Бюл. № 10. – 10 с.
23. **Udovenko, V.A.** On the Formation of High Damping State and Optimization of Structure of Industrial Damping Steels / V.A. Udovenko [et al.] // Solid State Phenomena. – 2008. – vol. 137. – pp.119-128.
24. **Берштам, Я.Н.** Исследование сплавов с высоким внутренним демпфированием в конструкции микромеханического гироскопа / Я.Н. Берштам, М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев // Материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова. – 2014. – С. 65-72.
25. **Lestev M.A.** The influence of nonlinear factors on dynamics and accuracy of micromechanical gyroscopes // Proceedings of 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2007. – pp.24-25.
26. **Евстифеев, М.И.** Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С. 63-76.
27. **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.
28. **Sang Won Yoon.** Vibration Isolation and Shock Protection for MEMS // University of Michigan Ph.D. Dissertation. – 2009. – 208 p.
29. **Евстифеев, М.И.** Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 4. – С. 46-50.
30. **Евстифеев, М.И.** Использование многомассовых систем для повышения вибростойкости микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 1. – С.40-44.
31. **ADXRS150.** Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning / Data Sheet. Analog Devices. 2010. – 12 p.
32. **Lapadatu, D.** SAR500 – A High-Precision High-Stability Butterfly Gyroscope with North Seeking Capability / D. Lapadatu [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2010. – pp. 6-13.
33. **U.S. Patent 6443008.** Decoupled Multi-Disk Gyroscope/ Funk K. et al; Robert Bosch GmbH. - Sep.3, 2002. - 11 p.
34. **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.

35. **U.S. Patent 5635640.** Micromachined Device with Rotationally Vibrated Masses / Geen J.; Analog Devices. - Jun.3, 1997. - 8 p.
36. **Geen, J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine – November, 2004. – pp. 12-17.
37. **Singh, T.** Analysis of acceleration sensitivity in MEMS tuning fork gyroscope / T. Singh [et al.] // Proceedings of Transducers'11, Beijing, China, June 5-9, 2011. – pp. 2006-2009.
38. **Sang Won Yoon.** Analysis and wafer-level design of a high-order silicon vibration isolator for resonating MEMS devices / Sang Won Yoon [et al.] // J. Micromech. Microeng. 21 (2011). – pp. 1-12.
39. **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.
40. **Dean, R.N.** Characterization of the Performance of a MEMS Gyroscope in Acoustically Harsh Environments / R. N. Dean [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – vol. 58, №7. –pp. 2591-2596.
41. **Челпанов, И.Б.** Акустические испытания микромеханических гироскопов / И.Б. Челпанов, М.И. Евстифеев, А.В. Кочетков // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. – № 5 (18) [Электронный ресурс]. – М., 2013. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/106tvn513.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
42. **Dean, R.N.** Microfibrous metallic cloth for acoustic isolation of a MEMS gyroscope / R. N. Dean [et al.] // Proceeding of SPIE 7979, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. – 2011. – URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.880624>.
43. **Патент 2486469 РФ**, МПК G01C 19/5656. Способ подавления ложного сигнала в измерителе угловой скорости с микромеханическими гироскопами // Я.А. Некрасов; заявл. 31.01.2012; опубл. 27.06.2013; Бюл. № 18. – 12 с.
44. **Патент 2486468 РФ**, МПК G01C 19/56. Измеритель угловой скорости // Я.А. Некрасов; заявл. 31.01.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. – 13 с.
45. **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.
46. **Патент 2471149 РФ**, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп компенсационного типа// Я.А. Некрасов, Н.В. Моисеев, Р.Г. Люкшонков; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.06.2012; Бюл. №.17. – 10 с.

Abstract. The paper considers the methods improving the mechanical performance of MEMS gyros. A multiaspect classification is proposed for systematizing data on mechanical performance of various gyro designs, and new perspective design principles are revealed

Key words: MEMS gyro, mechanical performance, classification

Материал поступил 19.08.14