

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, И. Б. ЧЕЛПАНОВ

**КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА И ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ
КОНСТРУКЦИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ RR-ТИПА**

Предложен подход к построению комплексных критериев качества конструкций ММГ RR-типа, которые учитывают одновременно такие показатели как масштабный коэффициент и перегрузочная способность. Использование комплексных критериев, построенных на основе принципов квалитметрии, позволяет интегрально оценивать комплекс свойств, характеризующихся разнородными и взаимно противоречивыми зависимостями параметров гироскопов от конструктивных параметров подвесов. Предложенные комплексные критерии дают возможность объективно проводить сравнение различных вариантов конструкций гироскопов и осуществлять их параметрическую оптимизацию.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) как датчики угловой скорости, ориентированные на вполне определенные области применения, проектируются и крупносерийно производятся такими фирмами, как Analog Devices, Gladiator Technologies, ST Microelectronics, InvenSense и др. [1–5]. При проектировании механической подсистемы ММГ важнейшим моментом является выбор схемы и конструкции упругого подвеса инерционного тела (ИТ). К настоящему времени основные варианты конструкций подвесов ИТ для ММГ считаются хорошо отработанными. Однако обзор существующих конструкций показывает большое разнообразие как схемных решений, так и их реализованных вариантов, включая многообразие геометрических размеров конструкций. Каждая организация обычно развивает свое собственное направление, что, как правило, связано с защитой интеллектуальной собственности, еще более широкое разнообразие обнаруживается при патентном поиске.

До сих пор специалисты не пришли к единому мнению относительно преимуществ и недостатков разных путей построения систем подвеса ИТ. Одним из ключевых свойств для ММГ считается обеспечение стойкости к механическим воздействиям [6–8]. Схемы типа $L-L$ – конструктивно более простые, но они крайне чувствительны к поступательной вибрации, что требует повышения собственной частоты подвеса и приводит к снижению масштабного коэффициента ММГ [9]. Схемы типа $R-R$ в первом приближении нечувствительны к поступательной вибрации, но реагируют на угловые ускорения [10]. Схемы типа $L-R$ (Tuning Fork), также как и схемы типа $L-L$ и $R-R$, снижают чувствительность ММГ к постоянным ускорениям и вибрациям, но требуют определенных ус-

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). 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.

лий при разработке электроники для обеспечения равенства собственных частот подвеса по различным осям, если упругие подвесы отдельных ИТ механически не связаны, либо создания сложных подвесов, если отдельные подвесы механически связаны [11, 12]. Так, сложная многомассовая схема ButterflyGyro™ компании SensoNor [13] вследствие технологической невозможности создания гребенчатых структур имеет ступенчатые (непрямоугольные) в сечении упругие элементы для создания анизотропии упругих свойств подвеса.

В данной работе авторами предпринята попытка выработки объективных критериев, позволяющих сопоставлять разные варианты решений применительно к схеме ММГ типа *R-R* с одним ИТ, совершающим первичные и вторичные угловые колебания.

Отличительные особенности конструкций микромеханических гироскопов

Сначала констатируем общие черты большинства известных принципиальных и схемных решений в рассматриваемой области. Перечисленные ниже особенности построения современных конструкций ММГ можно рассматривать как удачные находки, позволившие создать работоспособные датчики угловой скорости с приемлемыми характеристиками и довести дело до серийных изделий, нашедших широкое применение в системах управления подвижными объектами.

1. *Механический принцип действия*, основанный на том, что первичные автоколебания в плоскости ИТ при вращении основания вызывают вторичные колебания от действия кориолисовых сил инерции. Распределение этих сил зависит от кинематики ИТ в упругом подвесе.

2. *Монолитность конструкции*, в которой элементы упругого подвеса и ИТ изготавливаются без сборочных операций по планарной технологии. При этом существует базовая плоскость, в которой можно формировать практически любую конфигурацию, а именно, – плоское подвижное ИТ на упругих элементах одинаковой с ИТ толщины, но малой ширины. Существует несколько классов вибрационных гироскопов, конструкции которых не связаны с планарными технологиями, но они в дальнейшем не рассматриваются.

3. *Высокооборотный материал* (кремний), из которого обычно выполнен подвес и ИТ, характеризуется малыми диссипативными потерями, поэтому любая конструкция при вакуумировании обладает ярко выраженными резонансными свойствами, что можно использовать для резонансного усиления в десятки тысяч раз.

4. *Упругие деформации элементов подвеса*, за счет которых в базовой плоскости ИТ происходят первичные колебания с относительно большой стабилизированной амплитудой, при этом перемещения ИТ допускаются как в базовой плоскости, так и при выходе из нее. Известны конструкции ММГ с промежуточными рамками для разделения движений по различным осям [14].

5. *Использование электростатического гребенчатого двигателя*, который создает движущие силы и вращающий момент в плоскости ИТ. Основное преимущество таких двигателей состоит в независимости порождаемых ими сил и моментов от перемещения ИТ. Хотя на двигатель выделяется значительная доля площади ИТ, рабочие поверхности гребенки малы. При вакуумировании достигается высокая добротность, так что приемлемые амплитуды установившихся угловых колебаний получаются при очень малых силах и мощностях.

6. *Достижение максимальной площади электродов* для емкостного датчика вторичных колебаний в целях обеспечения измерения сверхмалых перемещений. Вторичные колебания, по которым формируется выходной сигнал ММГ как датчика угловой скорости, происходят за счет отклонения ИТ от базовой плоскости (для схем $R-R$) или приводят к поперечному перемещению ИТ в базовой плоскости (как правило, для схем $L-L$). Вне зависимости от схемных особенностей эти перемещения очень малы – при угловой скорости $0,1^\circ/\text{с}$ типичные амплитуды угловых колебаний имеют порядок $0,05$ угл. с, что соответствует линейным перемещениям $0,5$ нм или $5 \text{ \AA}$.

7. *Обеспечение высоких жесткостей и отсутствие резонансов в частотных диапазонах вибраций*. Так как ММГ предназначены для работы на высокочастотных объектах с широким частотным спектром вибраций и ударов, необходимо, чтобы упругие перемещения под действием сил инерции были пренебрежимо малы или, по крайней мере, зазоры между ИТ и корпусом не возникали.

8. *Получение требуемых значений собственных частот* первичных и вторичных колебаний путем обоснованного выбора длины и ширины упругих элементов подвеса при выбранной толщине, а также изменением конфигурации и усложнением структуры подвеса (прямолинейные или криволинейные упругие элементы) [15].

9. *Обеспечение симметричности конструкции относительно ортогональных осей и плоскостей* для снижения перекрестных связей, вызванных недиагональностью матриц инерции и жесткости подвеса.

Основные количественные показатели параметров конкретных ММГ, дающие достаточно полное представление о возможностях их практического использования, частично содержатся в паспортных данных, а частично должны выявляться из результатов расчетов и специальных испытаний. Эти показатели по отдельности следует рассматривать как единичные показатели или критерии качества.

Критерии качества микромеханических гироскопов

Применительно к ММГ единичные показатели или критерии качества, наиболее важные при практическом использовании ММГ в системах автоматического управления подвижными объектами, удобно разделить на 5 групп.

1. Метрологические характеристики, в число которых входит диапазон измерения, но основными являются показатели точности.
2. Показатели надежности, стойкости и прочности (перегрузочной способности), в первую очередь по отношению к линейному ускорению по оси наименьшей жесткости (как правило, перпендикулярно плоскости ИТ).
3. Массогабаритные показатели.
4. Показатели энергопотребления.
5. Стоимость.

Показатели третьей и четвертой групп нужно учитывать при интегрировании ММГ в системы управления, но они, как правило, не являются определяющими. Показатели пятой группы важны при коммерциализации продукции. Далее рассматриваются только взаимно противоречивые показатели первой и второй групп (метрологические и перегрузочные) и обсуждаются возможности их комбинирования в комплексных показателях (критериях). При этом учитывается,

что показатели перегрузочной способности выражаются приближенными формульными зависимостями от геометрических параметров подвеса ИТ [16, 17]. Нормируемые показатели точности никак не могут быть прямо оценены по результатам численных расчетов подвеса ИТ (в частности, потому, что значительную роль в достижении точностных характеристик играет электроника), можно лишь определить множители, входящие в эти показатели.

Единичные критерии качества конструкции подвеса ММГ при рассмотрении показателей точности следует рассматривать как соотнесенные с такой последовательностью процессов:

- возбуждение с помощью электростатического двигателя первичных угловых колебаний ИТ с частотой ω_1 и постоянной амплитудой φ_1 , максимально допустимой по условиям прочности упругих элементов подвеса;
- возбуждение вторичных колебаний с той же частотой ω_1 , обычно близкой к собственной частоте вторичных угловых колебаний ω_2 ;
- изменения емкости C датчика вторичных колебаний.

Независимо от этого формулируются требования обеспечения перегрузочной способности при действии сил инерции, что означает сохранение прочности (во всех сечениях элементов подвеса механические напряжения не превышают допускаемые) и отсутствие контактов ИТ с неподвижными элементами конструкции при действии перегрузок. При этом авторами было показано, что наибольшую опасность представляют силы, возникающие при направлении перегрузок перпендикулярно плоскости ИТ [16, 18]. Без дополнительных пояснений именно этот случай будет рассматриваться в дальнейшем.

Сначала приводятся предварительные комментарии по признакам первичных единичных показателей качества. В последующем изложении используются приближенные формульные зависимости, которые в полном виде приводятся в работах [6, 16–18], однако, чтобы не отвлекать внимание читателя, в формулах сохраняются только переменные, имеющие смысл геометрических параметров; остальные считаются фиксированными и вместе с числовыми коэффициентами учитываются в множителях λ_i или μ_i , которые могут быть размерными и считаются постоянными.

Без детализации сложной конфигурации пластины ИТ и расположения прямолинейных упругих элементов подвеса следует констатировать, что первичными геометрическими параметрами ММГ являются следующие: радиус R ИТ, определяющий габаритный размер ММГ в целом; общая толщина h упругих элементов и ИТ; ширина b (в плане) и длина l упругих элементов; зазор d между электродами емкостного датчика вторичных колебаний. Существуют независимые конструктивные и технологические ограничения на указанные параметры h , b , R , d , но они не обсуждаются.

Относительно конструкции гироскопа RR -типа предполагается, что используется ставшая традиционной схема (рис. 1): внутренний подвес и заделка упругих элементов в центральный диск, близко расположенные к геометрическому центру [6]. На рисунке показана ось

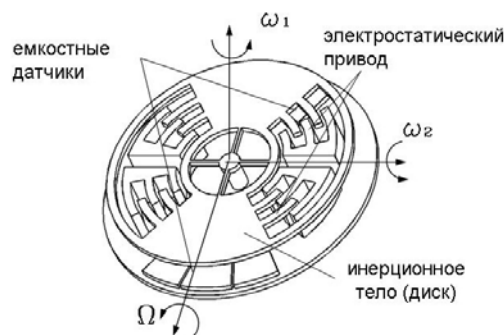


Рис. 1. Схема гироскопа R - R типа

измеряемой угловой скорости Ω , две другие оси, вокруг которых происходят первичные и вторичные угловые колебания, обозначены соответствующими собственными частотами ω_1 и ω_2 .

Зависимости показателей системы подвеса от геометрических параметров конструкции

Показатели системы подвеса вместе с ИТ делятся на первичные (геометрические параметры) и вторичные (рассчитываемые по первичным и/или определяемые экспериментально). Определим независимо формульные зависимости показателей от геометрических параметров подвеса ИТ. В соответствии с предыдущим разделом рассматриваются две группы показателей.

1. Метрологические характеристики. Одной из основных характеристик является масштабный коэффициент K , который в первую очередь определяется качеством электроники, но также зависит и от геометрических параметров подвеса. Масштабный коэффициент ММГ определяется соотношением [6]

$$K_1 = \varphi_2 / \Omega = 2(\omega_1^{-1} \varphi_1) q_2, \quad (1)$$

где φ_1 и φ_2 – амплитуды первичных и вторичных угловых колебаний, q_2 – добротность контура вторичных колебаний.

Для оценки качества электроники основным параметром является изменение емкости $\Delta C \approx C(\Delta d/d)$, где Δd – изменение зазора. Емкость датчика вторичных колебаний определяется выражением $C = \epsilon_a S d^{-1}$, где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость; S – площадь электрода емкостного датчика. Учитывая, что $\Delta d \approx \varphi_2 R$ и площадь S пропорциональна квадрату радиуса R^2 , масштабный коэффициент ММГ как датчика угловой скорости следует записать следующим образом:

$$K_2 = \Delta C / \Omega = \lambda_1 (\omega_1^{-1} \varphi_1) R^3 d^{-2}, \quad (2)$$

где λ_1 – размерный коэффициент, который не зависит от геометрических параметров R, h, b, l, d , но зависит преимущественно от применяемой электроники.

Для повышения масштабного коэффициента желательны меньшие зазоры и увеличенные габариты ИТ, что, в свою очередь, означает снижение частоты первичных колебаний ω_1 .

2. Показатели прочности. Перегрузочная способность может рассчитываться или по перемещениям (при этом предельное состояние достигается тогда, когда полностью выбирается зазор и возникает контакт ИТ с корпусом), или по механическим напряжениям (когда изгибные напряжения в определенных сечениях достигают предельно допустимых значений). Если учитывать упругость только упругих элементов подвеса, то предел для перегрузки по перемещению при воздействии ускорения W задается равенством [16]

$$u_{изг} = \frac{1}{4} \rho S_T l^3 W (E b h^2)^{-1}, \quad (3)$$

где ρ – плотность кремния; S_T – площадь ИТ; E – модуль Юнга.

Для повышения перегрузочной способности по этому показателю целесообразно увеличение зазора d . С другой стороны, предел по механическим изгибным напряжениям для того же W определяется соотношением

$$\sigma_{изг} = \frac{3}{4} \rho S_T l W (b h)^{-1}. \quad (4)$$

При использовании результатов решения перечисленных задач получаются формульные зависимости для совокупности различных показателей (критериев), для которых можно ввести единообразные обозначения μ_1, μ_2 . Все они являются функциями геометрических параметров.

Кроме того, нужно учитывать ограничения на некоторые параметры. Например, важнейшим является ограничение по собственной частоте ω_1 , которая не должна попадать в установленный нормативными документами диапазон вибрационных воздействий (чтобы не возникали резонансные явления при виброиспытаниях в заданном диапазоне частот). Не исключено использование приведенных выше показателей по отдельности для параметрической оптимизации схемных и конструктивных решений. Однако не всегда такая оптимизация будет разумна. Например, значительное увеличение амплитуды первичных колебаний может быть получено увеличением в несколько раз числа радиальных упругих элементов (на рис. 1 их четыре) при одновременном уменьшении b для сохранения соотношения собственных частот ω_1 и ω_2 , однако это приведет к потере устойчивости формы изгиба упругих элементов подвеса при действии перегрузок.

С другой стороны исходя из общих соображений желательны более высокие жесткости конструкции подвеса, что означает соответствующее повышение собственных частот поступательных (линейных) колебаний ИТ на подвесе. Предложенные критерии могут быть использованы как для оценки правильности и эффективности различных изменений конструкции, так и для оптимизации.

Как видно из сопоставления формул (1)–(4), геометрические параметры входят в показатели по-разному. При этом увеличение некоторых параметров приводит к улучшению одних показателей и одновременно к ухудшению других. Имея в виду эту взаимосвязь, как правило, нецелесообразно формулировать и находить решения задач оптимизации конструкции отдельно по критериям (показателям), нужно искать компромиссы. Для формализованного представления этих компромиссов необходимо рассматривать функции одновременно от нескольких показателей, что означает переход к комплексным показателям или критериям качества.

Пути построения комплексных критериев качества подвесов ИТ

Суть подхода к построению комплексных критериев качества конструкции ММГ заключается в следующем. Устанавливается совокупность геометрических и иных параметров, от которых зависят перечисленные выше единичные показатели (критерии).

Комплексный критерий формируется как сложная зависимость качества конструкции от нескольких показателей (критериев), он формально представляет собой функцию первичных или преобразованных показателей $Q=f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$.

Каждый из показателей $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, в свою очередь, является функцией геометрических параметров. Функция Q строится так, чтобы в ней учитывался как положительный эффект от увеличения одних показателей (критериев), так и отрицательный эффект от уменьшения других показателей (критериев) вследствие изменения в определенную сторону геометрических параметров. Комплексных критериев может быть несколько, однако однозначных рекомендаций по построению комплексных критериев дать нельзя. Например, комплексный кри-

терий целесообразно строить так, чтобы при технологически простом и естественном изменении одного определенного геометрического параметра комплексный критерий не изменялся.

Комплексные показатели должны давать обобщенное представление, на основе которого можно проводить сравнение различных вариантов и осуществлять структурную или параметрическую оптимизацию конструкции ММГ. Эти комплексные показатели могут отражать позиции и проектировщика (при приоритете факторов возможностей изготовления), и пользователя. Необходимость построения комплексных показателей обусловлена тем, что улучшение одних показателей обычно связано с ухудшением других, а комплексный показатель следует рассматривать как способ оценивания компромисса между ними. Правильно построенный комплексный критерий может взвешивать и сопоставлять выигрыши от увеличения одних первичных или преобразованных показателей и уменьшения других.

Специфика конструкций современных микромеханических приборов заключается в том, что параметры могут изменяться в довольно широких пределах (в несколько раз). Из формул (1)-(4) следует, что зависимости характеристик ММГ от его геометрических параметров являются степенными, что существенно, так как тогда комплексные показатели качества можно строить как мультипликативные.

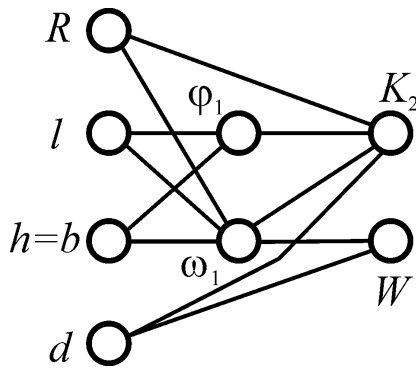


Рис. 2. Граф комплексных критериев качества

Взаимосвязь между геометрическими параметрами и показателями (критериями) удобно представить в виде графа (рис. 2). Первый, левый столбец графа представляет собой группу исходных, основных конструктивных (геометрических) параметров: радиус R ИТ и его толщина h (она же является толщиной упругих элементов), длина l и ширина b упругих элементов, номинальный зазор d . Предполагается, что собственные частоты первичных и вторичных колебаний близки, при этом сечения упругих элементов близки к квадратным, и тогда $b \approx h$. Следующие два столбца представляют собой комплексные показатели, которые могут быть получены по приближенным формулам в результате численных расчетов или по экспериментальным данным.

В дальнейшем при формульном наполнении схемы вводятся некоторые упрощения. Например, предполагается, что отношение собственной частоты ω_1 первичных угловых колебаний и собственной частоты $\omega_{1\text{лин}}$ линейных колебаний ИТ в направлении, перпендикулярном плоскости ИТ, сохраняет постоянное значение.

Показатели подвеса ММГ делятся на два уровня. На первом уровне комплексных показателей два: максимально допустимая по условиям прочности амплитуда первичных колебаний ϕ_1 и собственная частота ω_1 первичных или вторичных ω_2 угловых колебаний (предполагается, что они совпадают или, по крайней мере, близки). Эти показатели можно считать промежуточными, но они могут представлять и самостоятельный интерес. Их особенностью является то, что при испытаниях ММГ только по выходному сигналу они непосредственно не могут быть измерены. Предполагается, что момент, создаваемый электростатическим двигателем, возбуждающим первичные колебания, вполне достаточен

для того, чтобы получать амплитуду, определяемую условиями прочности упругих элементов при изгибе, и тогда это последнее условие является определяющим.

На последнем уровне имеем два показателя (критерия):

- масштабный коэффициент K_2 , который пропорционален $\beta = (\omega_1^{-1}\varphi_1)$ и R^3 и обратно пропорционален d^2 ;
- предельно допустимое ускорение W , при котором полностью выбирается зазор d , зависящее от $\omega_{1\text{лин}}$ и только от него при квазистатическом (относительно медленном) нагружении.

Увеличение каждого из показателей (критериев) двух уровней означает повышение качества ММГ в целом.

Общий подход к построению комплексных критериев качества

Способы формирования комплексных показателей качества, известные из квалиметрии [19, 20], могут быть различными. Комплексные показатели можно строить в различных математических формах, наиболее распространенными являются аддитивная и мультипликативная формы. Для рассматриваемых в этой работе задач более всего подходит мультипликативная форма

$$Q = \Pi \mu_k^n.$$

При мультипликативной форме значимость отдельных показателей качества определяется показателями n степеней, которые могут быть целыми или дробными, условие нормирования обычно не налагается, но если признано целесообразным, осуществляется масштабное преобразование показателя Q в целом. Обычно мультипликативная форма приводит к широким диапазонам изменения комплексного показателя, что может приводить к неадекватному восприятию результата. Эти диапазоны можно значительно сужать, пропорционально уменьшая показатели степеней или логарифмируя Q .

Предлагаемый подход позволяет объективно подойти к построению комплексных показателей. Для ММГ обычно допускается изменение какого-то конструктивного параметра и в новой модификации это не представляет серьезных трудностей. Тогда желательно строить такие комплексные показатели, которые не зависят от этого параметра, поскольку его значение достигается без труда и не может характеризовать прогресс в конструировании и технологии. Очевидно, что такой подход отражает позицию изготовителя.

Таким образом, комплексный критерий, объединяющий показатели, должен быть инвариантен по отношению к этому параметру, т.е. этот параметр не должен входить в критерий, для чего необходимо построить комбинацию первичных показателей, не зависящую от этого параметра. Последовательно задавая параметры, относительно которых должна быть получена инвариантность, можно получать различные комплексные критерии.

Комплексные критерии и возможности оптимизации конструкции ММГ

Рассмотрим некоторые, представляющиеся априори рациональными варианты построения комплексных критериев проектирования подвеса ИГ в конструкции ММГ. Попытки строить комплексный показатель без всякого обоснова-

ния могут приводить к рекомендациям, к которым следует относиться с чрезвычайной осторожностью. Нужно иметь в виду, что в общем случае при оптимизации по комплексному критерию экстремум может находиться внутри интервала или на границе, определяемой ограничениями. Однако при степенных зависимостях показателей от геометрических параметров аналитические экстремумы внутри областей невозможны, оптимальные решения могут быть только на границах (при действии ограничений). Функции в виде произведений степеней независимых аргументов обладают свойствами монотонности, и в многомерном пространстве при поиске экстремума решением является точка на границе, в которой достигается максимум по каждому аргументу.

Оценим полезный эффект изменения комплексных критериев конструкции от увеличения определенных геометрических параметров при постоянстве всех остальных – толщины ИТ и упругих элементов h (при условии $b \approx h$), длины упругих элементов l , радиуса ИТ (диска) R . Результаты анализа приближенных формульных зависимостей от изменений геометрических параметров представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

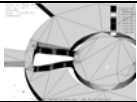
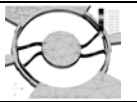
	Увеличение толщины, h	Увеличение длины, l	Увеличение радиуса, R
Допустимая из условий прочности амплитуда угловых первичных колебаний, φ_1	$\mu_1 h^{-1}$	$\mu_6 l^2$	не зависит
Частота первичных колебаний, ω_1	$\mu_2 h^{3/2}$	$\mu_7 l^{1/2}$	$\mu_{12} R^{-2}$
Множитель $\beta \approx \omega_1^{-1} \varphi_1$ масштабного коэффициента, K_2	$\mu_3 h^{-5/2}$	$\mu_8 l^{5/2}$	$\mu_{13} R^1$
Предельно допускаемое ускорение W по условию прочности упругих элементов	$\mu_4 h^2$	$\mu_9 l^{-1}$	$\mu_{14} R^{-2}$
Предельно допускаемое ускорение W по условиям ограниченности перемещений зазором d	$\mu_5 h^3$	$\mu_{10} l^{-3}$	$\mu_{15} R^{-2}$

Зазор d , допустимый при ускорении перегрузки W , определяется соотношением $d = W/\omega_{1\text{лин}}^2$. Для реализованных конструкций частота $\omega_{1\text{лин}}$ связана с частотой первичных угловых колебаний приближенным равенством $\omega_1 \approx n\omega_{1\text{лин}}$, где $n = 3-4$.

При увеличении толщины ИТ и упругих элементов подвеса критерии качества конструкции ММГ изменяются, при этом параметр h входит в разные показатели в разных степенях и влияние его увеличения на разные показатели (критерии) различно. Если считать, что желательно увеличение масштабного коэффициента, то необходимо уменьшать толщину и ширину упругих элементов (имея в виду, что здесь $b \approx h$), уменьшая одновременно частоту первичных колебаний. Если более важны показатели прочности, то целесообразно увеличивать h .

Такие изменения можно учесть в комплексном критерии $Q = \beta^{0,4} W^{0,5}$, который непосредственно не будет зависеть от h , т.е. содержит h в нулевой степени. Представляет интерес рассмотреть возможность использования указанного критерия для сравнения различных вариантов конструкций ММГ RR -типа, рассмотренных в работе [16]. Численные сравнительные данные представлены в табл. 2, исходя из условия, что напряжения в конструкции подвеса не превышают 500 МПа.

Т а б л и ц а 2

Вид подвеса			
Описание подвеса	Подвес с четырьмя прямыми стержнями, расположенными под углом	Подвес с четырьмя прямыми стержнями и полукольцами	Подвес с криволинейными стержнями
Коэффициент напряжений при первичных колебаниях, МПа/град	548	478	320
Допустимая амплитуда первичных колебаний, град	0,91	1,05	1,56
Частота первичных колебаний, с ⁻¹ (Гц)	23204 (3693)	22230 (3538)	21431 (3411)
Множитель β масштабного коэффициента, с	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Допускаемое ускорение W по условию прочности упругих элементов, м·с ⁻² (g)	59290 (6050)	72520 (7400)	52430 (5350)
Критерий качества, м ^{0,5} ·с ^{-0,6}	0,83	0,99	1,01

На основании данных, приведенных в табл. 2, наивысшее значение критерия качества – у подвеса с криволинейными стержнями. Значения критерия получаются близкими, что определяется узкими диапазонами изменения параметров для вариантов ($\pm 10\%$ от среднего значения). В подобных случаях надежные выводы о преимуществах того или иного варианта могут быть обоснованно сделаны только при учете тех показателей, которые при построении приведенного выше критерия не учитывались. Отметим также, что подвес с криволинейными стержнями имеет наименьшую величину нелинейности упругих характеристик.

Параметрическая оптимизация по комплексным критериям позволит находить новые пути повышения качества конструкции системы подвеса ММГ. Одним из важных достоинств этих комплексных показателей является то, что они могут оцениваться как по расчетным, так и по экспериментальным данным.

Заключение

На основе полученных ранее авторами аналитических зависимостей показателей качества подвеса ММГ *RR*-типа от геометрических параметров в работе предложен подход к построению комплексных критериев качества проектирования конструкций, которые учитывают одновременно такие показатели, как масштабный коэффициент и перегрузочную способность. При взаимной противоречивости частных требований к конструкции использование комплексных критериев, построенных на основе принципов квалиметрии, позволяет объективно оценивать комплекс свойств, характеризующихся разнородными зависимостями качества работы ММГ от параметров.

Комплексные критерии качества проектирования конструкций ММГ дают обобщенное представление, на основе которого можно проводить сравнение различных вариантов и осуществлять параметрическую оптимизацию, позволяющую находить новые пути повышения качества ММГ. Критерии качества могут оцениваться как по расчетным, так и по экспериментальным данным.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евстифеев, М.И.** Основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 6. – С. 75-80.
2. **Xie H., Fedder G.K.** Integrated Microelectromechanical Gyroscopes // Journal of Aerospace Engineering. – April 2003. – pp. 65-75
3. **Савенко, Н.** Акселерометры и гироскопы для портативных устройств // Современная электроника. – 2006. – № 6. – С. 18-21.
4. **Сысоева, С.** Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы – от low-end до high-end сегментов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С.22-30.
5. **Тузов, А.** Датчики для измерения параметров движения на основе МЭМС-технологии. Ч. 2. Инерциальные датчики высокой точности // Электроника. – 2011. – № 1. – С.2-5.
6. **Евстифеев, М.И.** Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 1. – С.27-39.
7. **Weinberg, H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – September 2011. – pp.1-5.
8. **Geen, J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine – November, 2004. – pp. 12-17.
9. **Евстифеев, М.И.** Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов // Материалы II конф. молодых ученых «Навигация и управление движением».- С.-Петербург, 2000.- С. 54-71.
10. **Евстифеев, М.И.** Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 6. – С. 70-76.
11. **Chaumet, B.** A New Silicon Tuning Fork Gyroscope for Aerospace Applications / B. Chaumet [et al.] // Proceedings of Symposium Gyro Technology, Karlsruhe, Germany, 2009. – pp.1.1-1.13.
12. **Geiger, W.** Test Results of the Micromechanical Coriolis Rate Sensor μ CORS II / W. Geiger [et al.] // Symposium Gyro Technology 2004, Stuttgart, Germany. – pp.1.0-1.18.
13. **Blixhavn, B.** SAR500 – A Novel High-Precision Gyroscope / B. Blixhavn [et al.] // Proceedings of Symposium Gyro Technology, Karlsruhe, Germany, 2010. – pp.5.1-5.13.
14. **Апостолук, В.А.** Динамика чувствительного элемента микромеханического гироскопа с дополнительной рамкой / В.А.Апостолук, А.В.Збруцкий // Гироскопия и навигация. – 1998. – №3. – С. 13-23.
15. **Джашитов, В.Э.** Выбор параметров упругого подвеса планарного микромеханического гироскопа на основе определения частот его собственных колебаний / В.Э.Джашитов, В.М.Панкратов // Гироскопия и навигация – 2005. – №4. – С.42-56.
16. **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.
17. **Евстифеев, М.И.** Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С.63-76.
18. **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.
19. **Азгальдов, Г.Г.** О квалиметрии / Г.Г.Азгальдов, Э.П.Райхман. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 172 с.
20. **Фомин, В.Н.** Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация: Курс лекций. – М.: ЭКМОС, 2000. – 320 с.

Abstract. The approach for building the complex performance criteria of RR-type MMG designs that takes into account simultaneously such factors as scale factor and overload capacity has been proposed. The common complex criteria built on the base of quality metering principle allow to estimate impartially the combination of attributes characterized by heterogeneous and mutually antithetic functions. These complex criteria allow to carrying out the comparison of different variants and the parametric optimization.

Key words: microelectromechanical gyroscope, performance criteria, optimization.

Материал поступил 30.12.11