

Соловьёв Алексей Владимирович

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ГИРОСКОП
С РАЗНЕСЁННЫМИ ЧАСТОТАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ
И СЪЁМА ИНФОРМАЦИИ

05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации.

Научный руководитель:

Черников Сергей Акимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Меркурьев Игорь Владимирович,
доктор наук, профессор,
ГУ «МЭИ»

Ведущая орг

У2045421 лександр Исаевич,
Соловьев А.В. доктор наук, доцент,
Микромеханический ИИ (НИУ))
вибрационный гироскоп с
разнесенными частотами
возбуждения и съема инфо... льные технологии
2014 0,00 », г. Раменское

2045421

засед
госу,
1050

1 мин. на
сковском
) адресу:

Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

напр
им. I

Баумана.

1, п
1, 1
41.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2045421
Соловьев А. В. Микромеханика

Энко Д.А.

3009

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Потребность в поиске альтернативных путей развития гироскопии, а именно в создании гироскопов на новых физических принципах с применением современных технологий, простых в изготовлении и потому менее дорогостоящих, но при этом обладающих достаточно высокими точностными характеристиками, была осознана еще в последней четверти прошлого века. К этой группе относятся и микромеханические вибрационные гироскопы (МВГ), получившие в настоящее время весьма широкое распространение. Причина востребованности таких приборов объясняется рядом их технических преимуществ перед традиционными гироскопами: низкой стоимостью, малыми габаритами, малой потребляемой мощностью, высокой надёжностью, высокой устойчивостью к внешним возмущающим факторам.

Для использования в точных инерциальных приборах, применяемых в авиации, управляемых снарядах и космических аппаратах, в последнее время ведутся разработки прецизионных МВГ. Для таких гироскопов стабильность нулевого сигнала должна находиться в пределах от $0,1$ до $10^\circ/\text{час}$, а величина углового случайного блуждания – от $0,5 \cdot 10^{-1}$ до $0,5^\circ/\text{час}^{1/2}$. Работы в этом направлении ведут крупные зарубежные фирмы, выпускающие продукцию, в том числе, и для военного применения: Thales, Northrop Grumman, Honeywell, Sensoror, Silicon Sensing. Однако, как показывает анализ, проведённый фирмой Yole, МВГ такого класса точности будут востребованы и в сфере гражданского применения.

В России также ведутся работы по созданию прецизионных МВГ. Основными разработчиками являются ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ЗАО «Инерциальные Технологии «Технокомплекса», ОАО «Гирооптика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ГИМ им. академика В.И. Кузнецова». Однако, в настоящее время МВГ в РФ серийно не выпускаются, и все имеющиеся образцы носят статус опытных.

Одной из доминирующих погрешностей, существенно ухудшающих точностные характеристики прибора, является квадратурная погрешность, содержащаяся в его выходном сигнале. В качестве одного из способов её подавления в контур управления вторичными колебаниями вводятся специальные звенья, что существенно усложняет его структуру. Также могут быть применены методы технологической корректировки геометрии упругих торсионов и балансировки кремниевого подвеса, требующие значительных затрат времени и материальных ресурсов. Одновременно с этим, квадратурная погрешность может быть снижена при использовании метода частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала. В настоящее время этот метод в МВГ не реализован.

Именно поэтому разработка схмотехнических и конструктивно-технологических решений МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, направленная на подтверждение применимости метода частотного разделения сигналов для снижения квадратурной погрешности микромеханических гироскопов, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка схмотехнических и конструктивно-технологических решений МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, исследование его характеристик и поиск путей их улучшения. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- обоснована возможность создания МВГ, в котором реализуется метод частотного разделения сигналов для снижения квадратурной погрешности;
- исследованы параметры движения кремниевого подвеса МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации и получены оценки влияния на них погрешностей его изготовления;
- предложена методика определения геометрических размеров кремниевых подвесов МВГ методами конечных элементов и аналитических расчётов;
- предложены и проанализированы варианты конструктивных реализаций кремниевых подвесов МВГ, отличающихся кинематикой рабочих движений и технологией изготовления;
- разработана конструкция МВГ в металлическом корпусе с кремниевым подвесом и стеклянной платой с напылёнными электродами емкостных датчиков положения (ДП) и датчиков силы (ДС);
- созданы и экспериментально исследованы макетные образцы МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации.

Объектом исследования является МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации с кремниевым подвесом и емкостными ДП и ДС.

Предметом исследования являются схмотехнические и конструктивно-технологические решения МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы и математический аппарат теоретической механики, теории колебаний, сопротивления материалов, теории упругости и методы численного моделирования.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Подтверждена применимость метода частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала МВГ для снижения его квадратурной погрешности.
2. Создана математическая модель МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, учитывающая геометрические погрешности при изготовлении его кремниевого подвеса.
3. Установлена аналитическая зависимость между геометрическими параметрами кремниевого подвеса, описывающая условие инвариантности отношения его собственных частот при погрешностях производства.

4. Получена экспериментальная оценка влияния блуждающих по поверхности кремниевого подвеса МВГ зарядов на его электромеханические характеристики.

Практическая ценность работы. На основании выполненных работ и проведённых исследований создан новый тип МВГ, реализующий метод частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала для снижения квадратурной погрешности и повышения точности. Предложены схемы построения кремниевых подвесов для МВГ разного уровня точности, отличающиеся кинематикой рабочих движений и технологией изготовления, в том числе схема с одной парой торсионов, в которой обеспечена инвариантность отношения собственных частот при погрешностях производства, что позволяет повысить процент выхода годных изделий. Разработанная конструкция МВГ позволяет проводить его изготовление на существующей отечественной технологической базе.

Достоверность полученных результатов следует из хорошего соответствия аналитических расчётов, результатов численного моделирования и результатов экспериментов.

Реализация и внедрение результатов. Основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе, использованы филиалом ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова» в научно-исследовательских работах при создании микромеханических гироскопов и приборов на их основе, что подтверждено актом внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Квадратурная погрешность МВГ может быть снижена при частотном разделении сигнала возбуждения и информационного сигнала.
2. Полученная аналитическая модель МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, учитывающая погрешности изготовления его кремниевого подвеса, адекватна и применима при разработке приборов такого типа.
3. Разработанные схемотехнические и конструктивно-технологические решения МВГ реализуют метод частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала и обеспечивают снижение квадратурной погрешности.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации докладывались на двух международных конференциях (на XVII международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», г. Москва, 2011 г.; на международной конференции «Микро- и наноэлектроника – 2012», г. Звенигород, 2012 г.), на 16 научно-технических конференциях (в том числе на I, II Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами», г. Москва, 2010 г., 2012 г.; на Всероссийском космическом инновационном конвенте, ЗАТО Углергск, 2011 г.; на II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения»), г. Самара, 2011 г.; на XIX научно-технической

конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 50-летию первого полёта человека в космос, г. Королёв, 2011 г.; на XIV конференции молодых учёных «Навигация и управление движением», г. Санкт-Петербург, 2012 г.; на XXXVII Академических чтениях по космонавтике, г. Москва, 2013 г.; на Всероссийской конференции молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора академика АН СССР В.И. Кузнецова», г. Москва, 2013 г.) и обсуждались на научно-техническом семинаре кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 15 научных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы из 64 наименований. Материал изложен на 188 страницах со 144 рисунками и 29 таблицами в тексте.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована её цель, задачи и методы исследования, представлена научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе описан принцип действия МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, выведены и проанализированы уравнения движения кремниевго подвеса прибора с учётом геометрических погрешностей при его изготовлении, а также проведён расчёт достижимых точностных параметров. Принцип действия такого МВГ может быть объяснён с помощью Рис. 1, на котором схематично изображён поворот подвижной массы гироскопа вокруг оси первичных колебаний на угол α , изменяющийся во времени следующим образом: $\alpha(t) = \alpha_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где: α_0 – амплитуда колебаний, *рад*; ω – круговая частота колебаний, *рад/сек*.

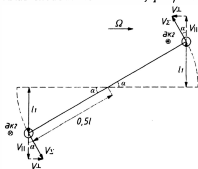


Рис. 1. К пояснению принципа действия МВГ

чувствительности, зависит от составляющей V_1 . Плечо l_1 , на котором приложена сила от ускорения Кориолиса, определяется следующим образом $l_1 = 0,5 \cdot l \cdot \sin \alpha$, где l – длина подвижного элемента.

Суммарную линейную скорость $\vec{V}_z$ подвижной массы прибора можно записать в виде векторной суммы двух линейных скоростей $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_1$, направленных по ортогональным осям, т.е.: $\vec{V}_z = \vec{V}_1 + \vec{V}_1$. Причём, $V_1 = V_z \cdot \sin \alpha$, а $V_1 = V_z \cdot \cos \alpha$.

Ускорение Кориолиса $\vec{a}_k = 2 \cdot \vec{\Omega} \times \vec{V}_z$, где Ω – проекция внешней угловой скорости на ось

Следовательно, момент сил Кориолиса определяется следующим соотношением:

$$M_{K2} = m \cdot a_{K2} \cdot 2 \cdot l_1 = m \cdot 2 \cdot \Omega \cdot V_z \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot l \cdot \sin \alpha = 2 \cdot m \cdot \Omega \cdot V_z \cdot l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = M_{02} \cdot \sin 2\alpha.$$

Графическое представление полученных зависимостей представлено на Рис. 2 (сверху вниз: график изменения линейной скорости подвеса во времени; график изменения плеча, на котором действуют силы Кориолиса, во времени; график изменения момента Кориолиса во времени). Таким образом, удвоенная

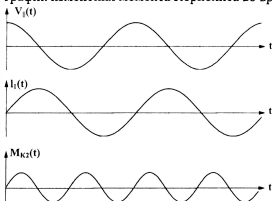


Рис. 2. Формирование момента сил Кориолиса

частота выходного сигнала формируется благодаря смещению на 90° фаз изменения линейной скорости подвижной массы и плеча, на котором действуют силы Кориолиса, в отличие от классического МВГ, где такого смещения нет, и частоты возбуждения и съема информации одинаковы.

Для вывода уравнений движения подвижных элементов подвеса гироскопа необходимо перейти от связанной с основанием системы координат $X_1Y_1Z_1$ к системе координат XYZ , образованной главными осями инерции подвеса. Последовательность поворотов показана на Рис. 3. Поворот 1: вокруг оси Y_1 на угол $\beta(t)$, т.е. кручение вокруг оси наружных торсионов. Поворот 2: вокруг оси Z_2 на угол $\nu = const$, который характеризует неперпендикулярность осей подвеса. Поворот 3: вокруг оси X_3 на угол $\gamma(t)$, т.е. кручение вокруг внутренних торсионов;

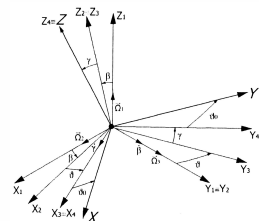


Рис. 3. Системы координат, используемые при составлении уравнений движения

Поворот 4: вокруг оси Z_4 на угол

$\nu_0 = const$, который характеризует несовпадение главной оси инерции X_4 с осью внутренних торсионов X_3 . Получившаяся в итоге всех поворотов система координат XYZ состоит из главных осей инерции подвеса. Определяя проекции абсолютных угловых скоростей на главные оси инерции $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, добавляя жесткостные члены $C_\beta \cdot \beta, C_\gamma \cdot \gamma$ и демпфирование $D_\beta \cdot \dot{\beta}, D_\gamma \cdot \dot{\gamma}$, и подставляя их в

динамические уравнения Эйлера, получим уравнения движения подвижной части кремниевго подвеса МВГ (1).

В данной записи для удобства анализа в уравнении для оси β вначале выписаны члены с удвоенной частотой (первые две строки), а затем – с одинарной. В уравнении для оси γ , наоборот, сначала идут члены на частоте возбуждения (первые две строки), потом – на удвоенной.

Первое уравнение системы (1) соответствует реакции подвеса гироскопа на внешнюю угловую скорость, т.е. это – вторичные движения.

$$\left\{ \begin{aligned} & I_{\beta} \cdot \ddot{\beta} + \gamma^2 \cdot \left(I_{\alpha} - \frac{1}{2} \cdot I_{\beta} \right) \cdot \ddot{\beta} + D_{\beta} \cdot \dot{\beta} + C_{\beta} \cdot \beta + 2 \cdot \Omega_2 \cdot (I_{\alpha} - I_{\beta}) \cdot \gamma \cdot \dot{\gamma} - \\ & - \Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + (\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \cdot \beta \cdot (I_{\alpha} - I_{\gamma}) + \Omega_1 \cdot \Omega_3 \cdot \gamma^2 \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) - \\ & - \Omega_1 \cdot (I_{\beta} + I_{\gamma} - I_{\alpha}) \cdot \dot{\gamma} - [I_{\gamma} \cdot \vartheta + (I_{\gamma} - I_{\beta}) \cdot \vartheta_0] \cdot \ddot{\gamma} + \Omega_1 \cdot \dot{\gamma} \cdot \gamma^2 \cdot (1,5 \cdot I_{\beta} - 2 \cdot I_{\alpha}) - \\ & - \Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot \gamma \cdot I_{\alpha} + \Omega_2 \cdot \beta \cdot \dot{\gamma} \cdot (I_{\gamma} - I_{\alpha}) + \Omega_2 \cdot \Omega_3 \cdot \gamma \cdot (I_{\alpha} + I_{\beta}) = M_{\beta}^{yp}; \\ & I_{\gamma} \cdot \ddot{\gamma} + D_{\gamma} \cdot \dot{\gamma} + C_{\gamma} \cdot \gamma + \Omega_1 \cdot \dot{\gamma} \cdot \vartheta_0 \cdot I_{\gamma} + 2 \cdot \Omega_2 \cdot \dot{\beta} \cdot \gamma \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) + \\ & + (\Omega_2^2 - \Omega_1^2) \cdot \gamma \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) + \dot{\beta}^2 \cdot \gamma \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) + \Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot (I_{\beta} + I_{\gamma} - I_{\alpha}) - \\ & - 2 \cdot \Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot \gamma^2 \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) - \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot \gamma^2 \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha}) + \Omega_2 \cdot \Omega_3 \cdot \beta \cdot (I_{\alpha} - I_{\beta}) - \\ & - [I_{\gamma} \cdot \vartheta + (I_{\gamma} - I_{\beta}) \cdot \vartheta_0] \cdot \ddot{\beta} = M_{\gamma}^{yp}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Второе уравнение системы (1) соответствует колебаниям подвеса гироскопа при его возбуждении, т.е. это – первичные движения. Входной, или измеряемой, угловой скоростью является скорость Ω_2 , совпадающая с осью вторичных движений.

Анализ системы начнём с перекрёстного влияния каналов друг на друга. Это члены с комбинацией моментов инерции $[I_{\gamma} \cdot \vartheta + (I_{\gamma} - I_{\beta}) \cdot \vartheta_0]$. Получается, что в выходном сигнале $\beta(t)$, пропорциональном удвоенной частоте возбуждения $2 \cdot \omega$, будет содержаться составляющая возбуждающего сигнала $\gamma(t)$, пропорционального $1 \cdot \omega$. Кроме того, в выходном сигнале также на частоте ω будет присутствовать гироскопический момент, образующийся «классическим» образом при действии внешней угловой скорости Ω_1 . Это составляющая $\Omega_1 \cdot (I_{\beta} + I_{\gamma} - I_{\alpha}) \cdot \dot{\gamma}$. Этот же гироскопический момент содержится и в канале возбуждения – $\Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot (I_{\beta} + I_{\gamma} - I_{\alpha})$.

Полезным сигналом в канале β будет являться составляющая $2 \cdot \Omega_2 \cdot (I_{\alpha} - I_{\beta}) \cdot \gamma \cdot \dot{\gamma}$. Произведение $\gamma \cdot \dot{\gamma}$ обуславливает его удвоенную частоту $2 \cdot \omega$.

Предположим, что каналы обладают высокой добротностью. Тогда, в уравнениях останутся только члены со «своей» частотой: $2 \cdot \omega$ – для канала β , $1 \cdot \omega$ – для канала γ . Уравнения в этом случае примут следующий вид:

$$\begin{cases} \left[I_\beta + \left(I_\alpha - \frac{1}{2} \cdot I_\beta \right) \cdot \gamma^2 \right] \cdot \ddot{\beta} + D_\beta \cdot \dot{\beta} + C_\beta \cdot \beta + 2 \cdot \Omega_2 \cdot (I_\alpha + I_\beta) \cdot \gamma \cdot \dot{\gamma} - \\ - \Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot I_\beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + (\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \cdot \beta \cdot (I_\alpha - I_\gamma) + \Omega_1 \cdot \Omega_3 \cdot \gamma^2 \cdot (I_\beta - I_\alpha) = M_\beta^{впр}; \\ I_\gamma \cdot \ddot{\gamma} + D_\gamma \cdot \dot{\gamma} + C_\gamma \cdot \gamma + \Omega_1 \cdot \dot{\gamma} \cdot \vartheta_0 \cdot I_\gamma + 2 \cdot \Omega_2 \cdot \dot{\beta} \cdot \gamma \cdot (I_\beta - I_\alpha) + \\ + (\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \cdot \gamma \cdot (I_\beta - I_\alpha) + \dot{\beta}^2 \cdot \gamma \cdot (I_\beta - I_\alpha) = M_\gamma^{впр}. \end{cases} \quad (2)$$

По уравнениям системы (2) видно, что в канале γ присутствуют две составляющие, $2 \cdot \Omega_2 \cdot \dot{\beta} \cdot \gamma \cdot (I_\beta - I_\alpha)$, $\dot{\beta}^2 \cdot \gamma \cdot (I_\beta - I_\alpha)$, которые обуславливают связь двух движений помимо наличия гироскопического момента.

Рассмотрим уравнение для канала β более подробно. Как уже было отмечено, помимо полезного гироскопического момента в нём присутствуют дополнительные три составляющие: $\Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot I_\beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$, $(\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \cdot \beta \cdot (I_\alpha - I_\gamma)$ и $\Omega_1 \cdot \Omega_3 \cdot \gamma^2 \cdot (I_\beta - I_\alpha)$.

Первая составляющая $\Omega_1 \cdot \dot{\beta} \cdot I_\beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$ обусловлена геометрическими погрешностями при производстве подвеса (ϑ – неперпендикулярность осей подвеса, ϑ_0 – несовпадение главной оси инерции и оси внутренних торсионов). Следует отметить, что эта составляющая изменяется с двойной частотой и находится в фазе с полезным сигналом $2 \cdot \Omega_2 \cdot (I_\alpha - I_\beta) \cdot \gamma \cdot \dot{\gamma}$. Для её снижения необходимо как можно сильнее уменьшать момент инерции I_β . Чтобы добиться этого, рамку нужно делать в виде стержня вдоль оси β . Тогда, $I_\alpha \approx I_\gamma$, $I_\beta \approx 0$. В качестве сравнения приведём формулу данной погрешности для схемы МВГ с совмещёнными частотами: $[I_\gamma \cdot \vartheta + (I_\gamma - I_\beta) \cdot \vartheta_0] \cdot \ddot{\gamma}$. Видно, что для новой схемы влияние этой погрешности меньше.

Вторая составляющая $(\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \cdot \beta \cdot (I_\alpha - I_\gamma)$ является добавкой к жесткости подвеса, а значит, влияет на величину собственной частоты. Выполнение рамки в виде стержня делает возможным снизить величину этой составляющей.

Третья составляющая $\Omega_1 \cdot \Omega_3 \cdot \gamma^2 \cdot (I_\beta - I_\alpha)$ является погрешностью от произведения поперечных угловых скоростей. Её величина во многом зависит от значений внешних угловых скоростей Ω_1 и Ω_3 .

Полезный момент, определяемый зависимостью $2 \cdot \Omega_2 \cdot (I_\alpha - I_\beta) \cdot \gamma \cdot \dot{\gamma}$, будет пропорционален не первой степени амплитуды возбуждения γ_0 , как у классических МВГ R-R-типа, а её квадрату γ_0^2 . Поэтому целесообразно использовать данное преимущество и задавать γ_0 как можно большим. Однако,

большие амплитуды требуют формирования увеличенных зазоров в емкостных датчиках, что снижает их эффективность.

Результаты расчёта достижимых точностных параметров для разработанных вариантов конструкций кремниевых подвесов МВГ представлены в таблице 1.

Таким образом, микромеханический вибрационный гироскоп с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации позволяет значительно уменьшить влияние геометрических погрешностей конструкции подвеса при его производстве, частотно разделить каналы возбуждения и съёма информации, а также обладает квадратичной зависимостью полезного сигнала от амплитуды возбуждения.

Таблица 1

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
	«Классическая схема»	«Внутренний подвес»	«Одна пара торсионов»
Нестабильность нулевого сигнала, $^{\circ}/\text{час}$	0,138	0,093	0,069
Диапазон измеряемых угловых скоростей, $^{\circ}/\text{сек}$	65,1	30,0	–
Порог чувствительности, $^{\circ}/\text{сек}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
Масштабный коэффициент, $\frac{мВ}{^{\circ}/\text{сек}}$	3,1	71,4	–
Нелинейность выходной характеристики, %	< 0,2	< 0,2	< 0,2

Во второй главе представлены конструктивно-технологические решения МВГ, как электромеханической системы. Предложена конструкция, состоящая из металлического корпуса с крышкой, электрической платы с напылёнными электродами ДП и ДС и чувствительного элемента (ЧЭ) в виде кремниевых подвесов (Рис. 4).

В качестве материала для корпуса и крышки применён ковар. Крышка соединяется с корпусом сварным вакуумплотным швом. Откачка и обезгаживание проводятся через штенгель, установленный на верхней крышке. Крепление стеклянной платы к корпусу осуществляется с помощью анаэробного герметика, предназначенного для изделий, в которых применён глубокий

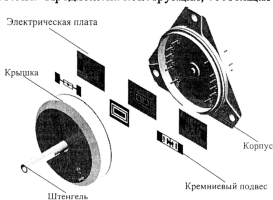


Рис. 4. Конструкция МВГ

вакуум (до 10^{-4} Па). Его эксплуатационный температурный диапазон находится в пределах от минус 120°C до плюс 350°C . Это позволяет использовать более интенсивный режим обезгаживания перед герметизацией. Для поддержания требуемого уровня вакуума при длительных сроках эксплуатации предусмотрена установка геттерного насоса.

На Рис. 5 представлен кремниевый ЧЭ МВГ, выполненный по классической схеме. Ось возбуждения данного подвеса Y направлена вдоль оси внутренних торсионов, а ось съёма информации X и совпадающая с ней ось чувствительности – вдоль оси наружных торсионов. Особенности такой схемы кремниевого подвеса являются:

- подвес выполнен по классической схеме, что позволяет использовать стеклянную плату прибора более ранней разработки;
- рельеф внутренней рамки обеспечивает увеличенный емкостной зазор с целью повышения амплитуды возбуждения колебаний;
- различные геометрические параметры наружных и внутренних торсионов с прямоугольным поперечным сечением, необходимые для разнесения собственных крутильных частот подвеса по этим осям.

Для изготовления кремниевого подвеса предложена технология двустороннего глубокого анизотропного плазмохимического травления, позволяющая полностью контролировать геометрию подвеса.

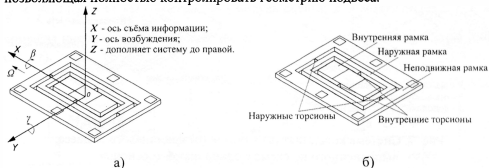


Рис. 5. Система координат (а) и состав (б) кремниевого подвеса, выполненного по классической схеме

На Рис. 6 представлен кремниевый ЧЭ МВГ, выполненный по схеме внутреннего карданова подвеса.

Ось возбуждения данного подвеса Y направлена вдоль оси наружных торсионов, а ось съёма информации X и совпадающая с ней ось чувствительности – вдоль оси внутренних торсионов. Особенности такой схемы кремниевого подвеса являются:

- подвес выполнен по обращённой схеме (схема внутреннего подвеса), что позволяет максимально использовать его геометрию при возбуждении;
- крестообразные торсионы обеспечивают требуемую крутильную жёсткость при значительно большей линейной, что увеличивает собственные линейные частоты подвеса;

– различные геометрические параметры наружных и внутренних торсионов, необходимые для разнесения собственных крутильных частот подвеса по этим осям.



Рис. 6. Система координат (а) и состав (б) кремниевого подвеса, выполненного по обращённой схеме

На Рис. 7 представлен кремниевый ЧЭ МВГ, выполненный по схеме с одной парой упругих торсионов и его расчётная схема. Ось возбуждения данного подвеса Y перпендикулярна плоскости подвеса, а ось съёма информации X и совпадающая с ней ось чувствительности направлена вдоль оси упругих перемычек.

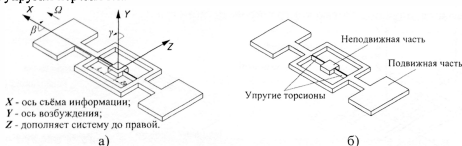


Рис. 7. Система координат (а) и состав (б) кремниевого подвеса, выполненного по схеме с одной парой торсионов

Сечение упругих перемычек вместо прямоугольного выбрано ступенчатым (Рис. 8а). Такая форма сечения получается как специальными методами двухсторонней литографии, так и случайно при появлении погрешностей совмещения масок. При этом наблюдается эффект возникновения тангенциального перемещения инерционной массы при её осевом нагружении. График отношения амплитуд тангенциального перемещения к осевому Δ в зависимости от ширины ступеньки D представлен на Рис. 8б. Это отношение может достигать 50...60. Поэтому данный эффект возможно использовать для создания первичных колебаний кремниевого подвеса в плоскости емкостных датчиков без использования гребенчатого привода. Также особенностью данного подвеса является возможность такого подбора параметров упругих перемычек, при котором погрешности производства не будут оказывать воздействия на отношения собственных частот.

Согласно функциональной схеме, изображённой на Рис. 9, электроника МВГ состоит из МАЭ, содержащей мостовую схему и дифференциальный усилитель, ПД, АЦП, БПФ, АУ, ЦАП, ОГ и выполняет:

- преобразование изменения емкостей в датчиках положения микромеханического вибрационного гироскопа в электрический сигнал;
- обеспечение амплитудной модуляции выходных сигналов датчиков положения;
- выделение амплитудных значений этих сигналов;
- цифровое преобразование пиковых значений двух амплитудно-модулированных сигналов, получаемых с выхода пикового детектора;
- определение значений амплитуд синусной и косинусной составляющих сигналов, получаемых с выходов АЦП;
- преобразование выходных сигналов;
- формирование управляющих сигналов и выходной измерительной информации.

В третьей главе проведена разработка трёхмерных моделей кремниевых подвесов МВГ с параметрическим заданием их основных геометрических размеров в CAD-системе Autodesk Inventor, на базе которых сформированы адекватные конечно-элементные модели кремниевых подвесов МВГ в среде Ansys Workbench, рассчитаны собственные частоты и амплитудно-частотные характеристики, определена реакция на внешние возмущающие воздействия – синусоидальную вибрацию, случайную вибрацию, удар.

Параметризации, в первую очередь, подлежали геометрические размеры упругих торсионов кремниевых подвесов, непосредственно определяющих их жёсткость, а также размеры, определяющие моменты инерции.

В результате аналитических вычислений и расчёта методом конечных элементов были определены требуемые геометрические параметры подвесов, их собственные частоты и амплитудно-частотные характеристики. Обеспечение резонансного режима работы прибора в совокупности с высокой добротностью колебательного контура обеспечит максимальный отклик подвеса на входную угловую скорость.

По графикам амплитудно-частотных характеристик, представленных на Рис. 10 видно, что благодаря разнесённым собственным частотам именно кремниевые подвесы выполняют функцию частотного фильтра, что позволяет механически снизить влияния канала возбуждения на канал съёма информации, т.е. уменьшить квадратурную погрешность.

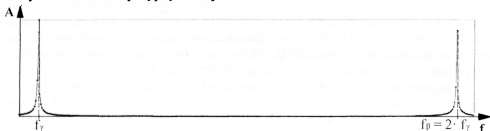


Рис. 10. Обобщённая АЧХ подвесов МВГ

Характер колебаний кремниевых подвесов и соответствующие значения их собственных частот представлены на Рис. 11. Необходимо отметить, что линейные частоты всех схем подвесов превышают величину 4000 Гц, что обеспечивает их стойкость к внешним вибрационным воздействиям.

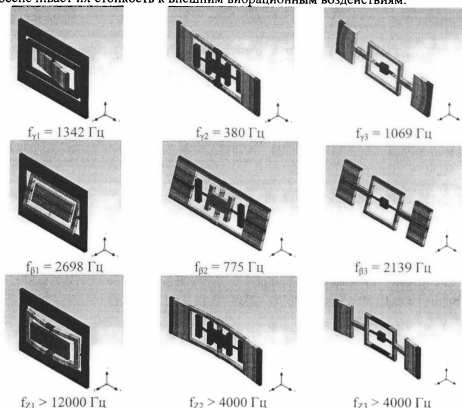


Рис. 11. Характер колебаний кремниевых подвесов МВГ и значения их собственных частот

Так расчёт подвеса, выполненного по обращённой схеме и обладающего наименьшими собственными частотами, подтвердил его стойкость к действиям синусоидальной вибрации (15g, 10...100 Гц), случайной вибрации (0,5g²/Гц, 100...400Гц). При ударном воздействии (900g, 0,5 мс) ускорение подвеса достигало 1000g (775 Гц), причём напряжения в торсионах вблизи их заделок в рамку в этом случае были равны 144 МПа, что меньше предела прочности кремния в 400 МПа.

В четвёртой главе представлены результаты испытаний трёх макетных образцов МВГ (№ 010021, № 010022, № 010023) с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, выполненных, в силу экономических соображений и технологических возможностей, по классической схеме и изготовленных в ОАО «НИИФИ».

Макетные образцы прошли определение электромеханических параметров (рабочие ёмкости, собственные частоты и добротности), а также были проведены испытания на стенде задания угловой скорости СС-107. Необходимо подчеркнуть, что данные испытания в первую очередь были направлены на подтверждение возможности применения частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала, как метода снижения квадратурной погрешности. Численные значения же измеренных параметров на данном этапе играли второстепенную роль.

При точном совмещении собственных частот каналов ($f_B = 2 \cdot f_T$), добиться которого удалось благодаря созданию отрицательной жёсткости при подаче постоянного напряжения, внутренняя рамка подвеса раскачивалась до определённой амплитуды A_p , а в выходном канале в цифровом виде регистрировалась реакция наружной рамки подвеса A_B . Величина перекрёстного влияния каналов МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации (МВГ-2) в сравнении с МВГ, у которого частоты равны (МВГ-1), изображена на Рис. 12а. Видно, что схема МВГ с разнесёнными частотами обладает значительно меньшей (> 6 раз) перекрёстной связью, чем аналогичный прибор с равными частотами возбуждения и съёма.

В результате проведения испытаний на СС-107 в диапазоне угловых скоростей до 80 °/сек в выходном сигнале прибора наблюдалась реакция на внешнюю угловую скорость (Рис. 12б). Значение масштабного коэффициента не превысило величины 1 мВ/°/сек.

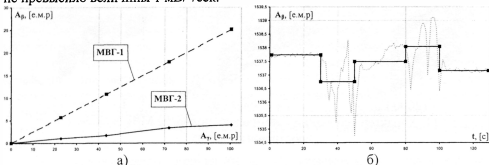


Рис. 12. Перекрёстное влияние каналов (а) и выходной сигнал МВГ при действии внешней угловой скорости (б)

Полученные результаты, подтверждают работоспособность частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала МВГ, как метода снижения квадратурной погрешности. Для улучшения точностных параметров макетного прибора необходимо снижать паразитные ёмкости, возникающие при подключении МВГ к макетному блоку электроники, а также повышать стабильность первичных колебаний при возбуждении, максимально увеличивая их амплитуду.

В качестве дополнительного материала в работе представлены результаты исследования потенциала поверхности чувствительного элемента МВГ методом зонда Кельвина (Рис. 13), проводимых совместно с ЯФ ФТИАН

РАН (г. Ярославль). В последнее время это направление активно развивается и заслуживает пристального внимания.

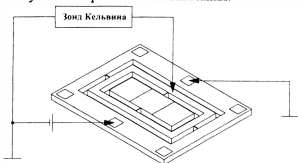


Рис. 13. Схема измерения встроенных зарядов методом зонда Кельвина

Исследования, проведённые в данной работе, направлены на проверку наличия встроенных зарядов на поверхности кремниевго подвеса МВГ, изготовленного методом глубокого анизотропного плазменного травления, а также на определение временного характера релаксации зарядов при подаче постоянного

напряжения.

Результаты работ, проведённых в данном направлении:

- на поверхности кремниевго подвеса в слое естественного окисла после всех этапов изготовления находятся встроенные заряды;
- кратковременная подача напряжения на кремниевый подвес приводит к изменению потенциала его поверхности;
- длительность переходного процесса при отключении заряженного образца от источника питания достигает 4 часов.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Теоретически описан метод частотного разделения сигнала возбуждения и информационного сигнала МВГ и экспериментально подтверждена его применимость для снижения квадратурной погрешности микромеханических гироскопов.

2. Получены и проанализированы уравнения движения кремниевго подвеса МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации, учитывающие геометрические погрешности при его изготовлении.

3. Разработана конструкция МВГ с металлическим корпусом, кремниевым подвесом и электрической платой с напылёнными электродами ДП и ДС, позволяющая проводить его изготовление на существующей отечественной технологической базе.

4. Предложены схемы построения кремниевых подвесов для МВГ разного уровня точности, отличающиеся кинематикой рабочих движений и технологией изготовления, в том числе схема с одной парой торсионов, в которой обеспечена инвариантность отношения собственных частот при погрешностях производства.

5. Расчётным путём определены основные точностные характеристики МВГ (нулевой сигнал и его нестабильность, диапазон измеряемых скоростей, масштабный коэффициент и его нестабильность).

6. Методом конечных элементов проведён расчёт собственных частот предложенных схем кремниевых подвесов МВГ, построены их АЧХ,

подтверждена их стойкость к внешним возмущающим факторам (синусоидальной вибрации, случайной вибрации, удару).

7. Созданы и экспериментально исследованы макетные образцы МВГ с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации. Результаты испытаний подтвердили основные положения теоретической части работы.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Соловьёв А.В. Результаты разработки микромеханического вибрационного гироскопа с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации // Прикладная физика и математика. 2013. №6. С. 3-19.

2. Изготовление кремниевого чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа / А.В. Соловьёв и [др.] // Наноинженерия. Том 2. Вып. 8. 2012. С. 12-18.

3. Соловьёв А.В. Анализ конструктивных реализаций кремниевого подвеса для микромеханического вибрационного гироскопа с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации: Реферат докл. // Гироскопия и навигация. 2012. №2 (77). С.166.

4. The mode matching technology for MEMS gyroscopes with mutually spaced eigenfrequencies / A. Soloviev [et al.] // International Conference Micro- and Nano-Electronics. 2012: Proc. SPIE 8700. DOI: 10.1117/12.2016784.

5. Соловьёв А.В. Результаты предварительных испытаний микромеханического вибрационного гироскопа с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации: Тезисы докл. // XXXVII Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства: Труды конференции. 2013. С. 635.

6. Соловьёв А.В. Варианты конструкции кремниевого чувствительного элемента для микромеханического вибрационного гироскопа с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации // Молодёжная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике»: Сборник материалов. 2011. С. 159-173.

7. Соловьёв А.В. Результаты разработки микромеханического вибрационного гироскопа с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации: Тезисы докл. // Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами»: Тезисы докладов. 2012. С. 108-109.

8. Микромеханический датчик угловой скорости с разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации / А.В. Соловьёв [и др.] // VIII научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова: Сборник докладов. 2010. С. 15-26.

9. Блок датчиков угловых скоростей на микромеханических вибрационных гироскопах / А.В. Соловьёв и [др.] // II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения»): Сборник материалов конференции. 2011. С. 393-394.

10. Соловьёв А.В. Микромеханический вибрационный гироскоп разнесёнными частотами возбуждения и съёма информации: Тезисы докл. // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2010»: Сборник тезисов докладов. 2010. С. 15.

11. Брюханова В.И., Соловьёв А.В., Тарасов А.Н. Блок микромеханических датчиков угловых скоростей: Статья // XIX Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 50-летию первого полёта человека в космос: Труды конференции. 2012. С. 20-25.

12. Соловьёв А.В., Тарасов А.Н. Результаты разработки блока микромеханических датчиков угловых скоростей и варианты его чувствительного элемента: Тезисы докл. // Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. 2012. С.124-125.

13. Соловьёв А.В. Состояние разработки микромеханического гироскопа «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»: Тезисы докл. // «Всероссийская конференция молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора академика АН СССР В.И. Кузнецова», посвящённая 100-летию со дня рождения выдающегося конструктора гироскопической техники Виктора Ивановича Кузнецова: Сборник материалов конференции. 2013. С. 39-40.

14. Экспериментальное определение зависимости параметров микромеханического вибрационного гироскопа от температуры / Соловьёв А.В. [и др.] // Научно-технический семинар «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы», посвящённый 75-летию юбилею кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сборник материалов. 2013. С. 43.

15. Оценка неустойчивости поддержания собственных частот микромеханического вибрационного гироскопа. / Соловьёв А.В. [и др.] // Научно-технический семинар «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы», посвящённый 75-летию юбилею кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сборник материалов. 2013. С. 30-31.

Подписано к печати 3.03.14. Заказ № 124

Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1

(499) 263-62-01

БИБЛИОТЕКА
М.Н.Э. БАУМАН