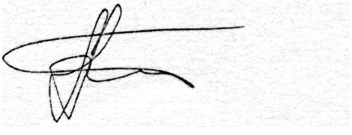
УДК 629.7.05
На правах рукописи

Пономарев Юрий Анатольевич

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2013

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

Научный руководитель: **Коновалов Сергей Феодосьевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рахтеенко Евгений Романович**, доктор технических наук, профессор, ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей»

Черноморский Александр Исаевич, кандидат технических наук, профессор, Московский авиационный институт

Ведущая организация: ФГУП «ЦЭНКИ», филиал НИИ Прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова, г. Москва

Защита диссертации состоится 10 апреля 2013 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5., стр. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «26» февраля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор Бурый Е.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана

1694

Ант 4112

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Последние несколько лет все более широкое распространение в мире получают гироскопы, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС), популярность которых обусловлена, в первую очередь, малыми габаритами, низким энергопотреблением и низкой стоимостью. В то же время существуют области применения МЭМС-гироскопов, где требуются достаточно высокие точностные характеристики, которые существенно превышают точностные характеристики имеющихся в продаже недорогих твердотельных МЭМС-гироскопов. Также не предъявляются жесткие требования к габаритам приборов. Приемлемыми являются максимальный габаритный размер до 20 мм и цены до 1000 USD при объеме производства от 1000 до 10000 штук в год.

Таким требованиям отвечают гибридные гироскопы, сочетающие элементы, получаемые методами МЭМС технологии, с элементами электромеханических приборов, хорошо освоенных российскими приборостроительными предприятиями. Это обеспечивает возможность изготовления и сборки МЭМС-гироскопов на предприятиях отечественной приборостроительной отрасли. При этом гибридные гироскопы не требуют больших затрат на подготовку производства, как в случае организации серийного выпуска твердотельных гироскопов, которые окупаются только в случае объемов продаж от миллиона штук в год.

Гибридные гироскопы имеют ряд конструктивных отличий от твердотельных МЭМС-гироскопов. Они допускают применение магнитоэлектрических датчиков момента (ДМ), позволяющих развивать гораздо большие моменты по сравнению с электростатическими ДМ в твердотельных приборах. Благодаря этому для нормальной работы приборов достаточно иметь добротность механических систем от 500 до 3000, которая может быть достигнута при отсутствии вакуумирования и величинах рабочих зазоров между подвижной и неподвижными частями гироскопа от 30 до 60 мкм. Допустимые большие размеры гибридных гироскопов позволяют увеличить площадь электродов емкостного датчика угла (ДУ) и получить приемлемые величины номинальных емкостей ДУ от 10 до 20 пФ при больших рабочих зазорах. Большие размеры также позволяют увеличить длину упругих перемычек, и, соответственно, получить большую, чем в твердотельных приборах, амплитуду колебаний маятника по оси возбуждения. Большая амплитуда в совокупности с большими толщиной и диаметром маятника, в свою очередь, позволяют увеличить момент кориолисовых сил, вызывающих колебания вокруг измерительных осей прибора, и повысить точностные характеристики гироскопов. Использование технологии анизотропного травления и применение магнитоэлектрических ДМ дает возможность применить новые способы компенсации квадратурной погрешности гироскопов.

Среди российских фирм, занимающихся МЭМС гироскопами, необходимо отметить фирмы «Электроприбор», i-Sense, «Гирооптика», РПКБ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИ ПМ им. В.И. Кузнецова. Однако до настоящего времени разработки не вышли из опытной стадии, и серийный выпуск МЭМС-гироскопов не реализован.

Таким образом, разработка и исследование принципов построения гибридных гироскопов, отвечающих вышеперечисленным требованиям, и повышение

2017950
Пономарев Ю.А. Двухкоординатный

точности этих гироскопов является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертации является разработка и исследование принципов построения гибридных гироскопов, исследование причин возникновения погрешностей в нем и способов их снижения. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Развита теория работы микромеханических вибрационных гироскопов R-R-R типа:

– исследованы прямой и перекрестный варианты построения системы компенсационной обратной связи в приборе;

– выявлены основные причины возникновения квадратурной погрешности гибридного гироскопа, разработаны и исследованы способы ее устранения.

2. Разработана схема построения гибридного гироскопа и отдельных его узлов: кремниевого маятника; датчиков угла (ДУ); ДМ системы возбуждения колебаний: ДМ обратной связи (ОС).

3. Разработана методика определения рационального соотношения размеров ДМ ОС с целью получения максимального момента в минимальных габаритах.

4. Разработаны и исследованы характеристики различных конструкций упругих подвесов кремниевого маятника и определено рациональное соотношение собственных линейных и угловых частот по трем осям, позволяющее улучшить характеристики прибора.

5. Обосновано применение различных вариантов построения систем возбуждения колебаний маятника с поддержанием амплитуды угловой скорости.

6. Разработана технология изготовления маятникового узла гибридного гироскопа, а также технология его сборки и регулировки.

7. Созданы и экспериментально исследованы опытные образцы гибридных гироскопов.

Объектом исследования является гибридный двухкоординатный компенсационный микромеханический гироскоп с кремниевым маятниковым узлом, с емкостными ДУ, с магнитоэлектрическими ДМ системы возбуждения колебаний и с магнитоэлектрическими ДМ ОС.

Предметом исследования являются принципы построения гибридных гироскопов.

Методы исследований. В диссертации использованы классические методы аналитической механики и теории гироскопов, методы математического моделирования, методы теории автоматического регулирования. Экспериментальные исследования базируются на стандартизированных методиках испытаний – в частности, рекомендованных международными стандартами IEEE Standard.

Научная новизна

1. Разработаны принципы построения двухкоординатных гибридных гироскопов с кремниевым маятниковым узлом, с емкостными ДУ, с магнитоэлектрическими ДМ системы возбуждения колебаний и с магнитоэлектрическими ДМ ОС, позволяющие создавать высокоточные приборы при отсутствии вакуумирования.

2. Решена задача определения рационального соотношения основных размеров узлов гибридного гироскопа и ДМ ОС, обеспечивающих увеличение точно-

сти измерения угловой скорости.

3. Разработаны методы компенсации квадратурной погрешности гироскопа в процессе изготовления кремниевого маятника и сборки прибора, позволяющие увеличить точность гироскопов и увеличить процент выхода годных изделий.

4. Разработаны способы построения системы возбуждения колебаний с поддержанием амплитуды, позволяющие упростить конструкцию прибора и электронного блока и повысить точность гироскопа.

Практическая ценность работы. На основании выполненных исследований создан новый гибридный двухкоординатный компенсационный микромеханический гироскоп, конструкция которого позволяет изготавливать его на существующей отечественной технологической базе и повысить точностные характеристики. Предложена новая конструкция ДМ ОС с роторной частью в виде обмотки плоской формы, что позволяет изготавливать ее одновременно с остальными обмотками и металлизированными дорожками кремниевого маятника. Предложены новые методики компенсации квадратурной погрешности гироскопа, применение которых позволяет увеличить выход годных приборов и повысить точностные характеристики гироскопа.

Достоверность полученных результатов следует из хорошего совпадения аналитических расчетов, результатов численного моделирования и результатов экспериментов.

Реализация и внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертации, используются в НИИ ПМ им. академика Кузнецова В.И. при создании МЭМС-гироскопов, что подтверждено актом внедрения. Кроме того, результаты диссертации, в соответствие с контрактом между МГТУ им. Н.Э. Баумана и PoongSan FNS, используются при создании МЭМС-гироскопов в южнокорейской компании PoongSan FNS.

На защиту выносятся:

1. Принципы построения двухкоординатного гибридного МЭМС-гироскопа R-R-R типа с кремниевым маятниковым узлом, емкостными ДУ, магнитоэлектрическими ДМ системы возбуждения колебаний и магнитоэлектрическими ДМ ОС, с большими рабочими зазорами и без вакуумирования, позволяющие повысить их точностные характеристики.

2. Методы компенсации квадратурной погрешности гироскопа, применяемые в процессе изготовления маятников и сборки приборов, позволяющие уменьшить величину паразитных колебаний и тем самым повысить как точностные характеристики гироскопов, так и увеличить процент выхода годных приборов.

3. Способы построения системы возбуждения колебаний маятника гироскопа с поддержанием амплитуды, позволяющие упростить конструкцию и технологию изготовления прибора и с бо̲льшей точностью поддерживать амплитуду собственного кинетического момента, тем самым повысив точностные характеристики гироскопа.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 6 научно-технических конференциях (на III научно-технической конференции молодых специалистов в ФГУП «НПЦ АП», г. Москва 2008 г.; на XI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», г. Санкт-Петербург,

2009 г.; на XXXIV Академических чтениях по космонавтике, г. Москва, 2010 г.; на XVII международной конференции по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург, 2010 г.; на XXXV Академических чтениях по космонавтике, г. Москва, 2011 г.; на VI молодежной конференции Академии навигации и управления движением, г. Москва, 2011 г.) и обсуждались на научном семинаре кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 13 научных работах, в том числе в пяти статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Получено положительное решение на выдачу патента РФ на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 265 листах машинописного текста, содержит 195 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 124 библиографические ссылки.

Содержание работы

Во **введении** дан обзор существующих гироскопов, их характеристик и стоимости, конструкций, приведен анализ литературных и патентных источников, относящихся к теме диссертации. Определено место создаваемого гироскопа среди уже существующих и требования к нему. Приведены основные преимущества и особенности создаваемого гироскопа перед твердотельными приборами. Определены цели и задачи диссертации.

В **первой главе** описана конструкция гибридного гироскопа (рис. 1), которая содержит кремниевый маятник плоской формы 1 расположенный между двумя керамическими пластинами 3 и 4 с зазором в 50 мкм обеспечиваемым платиками 8, на которые устанавливается центральная часть маятника. Наружная часть маятника имеет возможность совершать угловые движения вокруг трех осей X, Y и Z. По принципу действия гироскоп представляет из себя двухкоординатный датчик угловых скоростей (ДУС). При наличии проекции угловой скорости основания с установленным гироскопом вокруг оси X (или Y) возникают колебания маятника по перекрестной оси Y (или X) под действием сил Кориолиса, сигнал с ДУ поступает через контур компенсационной ОС на ДМ ОС подавляя возникшие колебания. В результате, амплитуда и фаза тока ДМ ОС будут пропорциональны величине и направлению проекции угловой скорости. Таким образом

Разработано и исследовано два вида упругих подвесов кремниевого маятника – подвес с промежуточной рамкой (рис. 1) и Г-образный подвес (рис. 2). Оба маятника изготовлены методами двухстороннего жидкостного анизотропного травления. На поверхности маятника, покрытой оксидом кремния, располагаются обмотки магнитоэлектрических ДМ.

Емкостные ДУ по обеим осям (рис. 3) представляют собой подвижный электрод 1, расположенный между неподвижными обкладками 2. Подвижным электродом является тело маятника, выполненное из легированного фосфором кремния, а неподвижные обкладки получены напылением металла на обращенные к маятнику стороны ответных пластин (по четыре на каждую выходную ось).

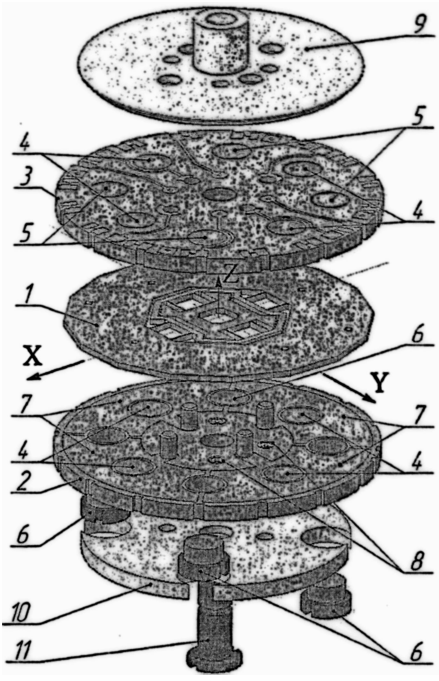


Рис. 1. Конструкция гироскопа: *1* – маятник с подвесом с промежуточной рамкой; *2, 3* – нижний и верхний керамические корпуса; *4, 5* – магниты ДМ ОС и ДМ системы возбуждения; *6* – регулировочные головки; *7* – обкладки емкостных ДУ; *8* – установочные платики; *9, 10* – верхний и нижний магнитопроводы; *11* – центральный установочный винт

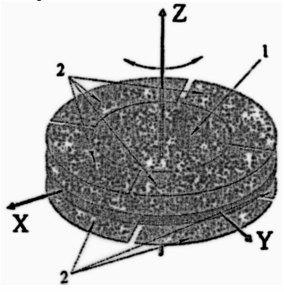


Рис.3. Схема емкостных ДУ: *1* – подвижный электрод ДУ (тело маятника); *2* – неподвижные обкладки ДУ

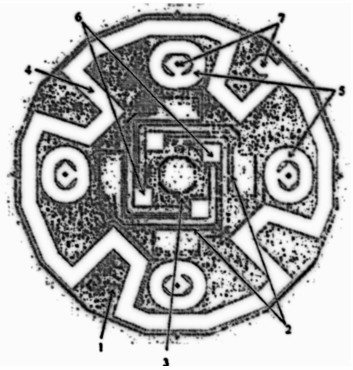


Рис. 2. Маятник с Г-образным подвесом: *1* – подвижная часть маятника; *2* – Г-образные упругие перемычки; *3* – неподвижная часть маятника; *4* – обмотка ДМ системы возбуждения; *5* – обмотки ДМ ОС; *6* – контактные площадки; *7* – сквозные металлизированные отверстия

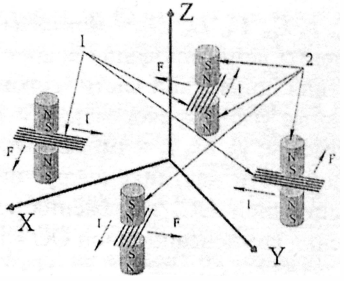


Рис. 4. Схема магнитоэлектрического ДМ системы возбуждения: *1* – роторная часть ДМ; *2* – статорная часть ДМ

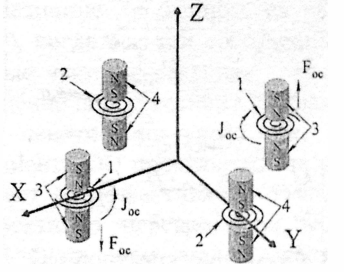


Рис. 5. Схема магнитоэлектрических ДМ ОС: *1, 2* – роторная часть ДМ вокруг осей Y и X; *3, 4* – статорная часть ДМ вокруг осей Y и X

Статорная часть магнитоэлектрических ДМ (рис. 4 и 5) представляет собой магнитную систему с постоянными магнитами, закрепленными в керамических корпусах. Магниты ДМ системы возбуждения попарно обращены разноименными полюсами к рабочему зазору, в котором размещен маятник для получения прямого магнитного поля. Магниты ДМ ОС попарно обращены одноименными полюсами к рабочему зазору для получения стесненного магнитного поля, имеющего составляющую магнитной индукции параллельную плоскости маятника. Роторная часть магнитоэлектрических датчиков момента представляет собой плоские обмотки, напыленные на поверхность подвижной части маятника с обеих сторон. Рабочие части обмотки ДМ системы возбуждения расположены таким образом, чтобы при протекании по ним тока возникающие силы Ампера создавали момент вокруг оси возбуждения. Рабочие части обмоток ДМ ОС выполнены в виде спирали; при нахождении их в стесненном магнитном поле это позволяет получать силы Ампера перпендикулярные плоскости маятника и создающие моменты вокруг осей X и Y.

Математическая модель гироскопа основана на уравнениях движения двухкоординатного ДУС вокруг измерительных осей:

$$\begin{cases} I_x\left(\dot{\Omega}_\xi + \ddot{\alpha}\right) + H_A\cos\left(\omega_z t\right)\left(\Omega_\eta + \dot{\beta}\right) = -D_x\dot{\alpha} - C_x\alpha + M_{\xi OC} \\ I_y\left(\dot{\Omega}_\eta + \ddot{\beta}\right) - H_A\cos\left(\omega_z t\right)\left(\Omega_\xi + \dot{\alpha}\right) = -D_y\dot{\beta} - C_y\beta + M_{\eta OC} \end{cases}, \quad (1)$$

где I_x, I_y, C_x, C_y, D_x, D_y, – моменты инерции, угловые жесткости подвеса и коэффициенты демпфирования вокруг измерительных осей Ox, Oy; α и β – углы отклонения подвижной части маятника вокруг измерительных осей; Ω_ξ и Ω_η – измеряемые угловые скорости; $H_A=I_z\gamma_0\omega_z$ – амплитуда собственного кинетического момента; γ_0, ω_z, I_z – амплитуда, частота возбуждения и момент инерции подвижной части маятника вокруг оси возбуждения; $M_{\xi OC}$ и $M_{\eta OC}$ – моменты компенсационной ОС, выражения для которых будут зависеть от варианта построения компенсационной ОС – прямая либо перекрестная (рис. 10 и 11).

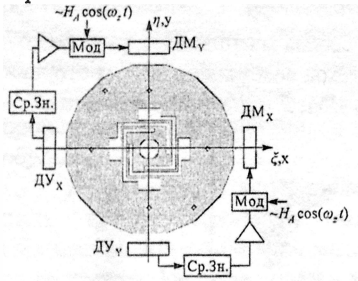


Рис. 6. Схема перекрестной ОС

$$\begin{cases} M_{\xi OC} = K_{\xi OC}\cdot\beta \\ M_{\eta OC} = K_{\eta OC}\cdot\alpha \end{cases} \quad (2)$$

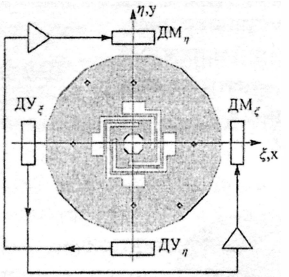


Рис. 7. Схема прямой ОС

$$\begin{cases} M_{\xi OC} = -C_{\xi OC}\alpha \\ M_{\eta OC} = -C_{\eta OC}\beta \end{cases} \quad (3)$$

Установлены границы применимости прямой и перекрестной ОС в зависимости от угловой жесткости упругого подвеса. В случае перекрестной ОС выражения для моментов ОС будут соответствовать выражениям (2), где $K_{\xi OC}$ и $K_{\eta OC}$ – коэффициенты, символизирующие преобразования сигналов и усиление. В этом случае решения уравнений для установившегося движения в первом приближении для постоянных угловых скоростей будут иметь вид:

$$\begin{cases} \alpha = A_0 + A_1 \sin\left(\omega_z t + \chi_\alpha\right) \\ \beta = B_0 + B_1 \sin\left(\omega_z t + \chi_\beta\right) \end{cases}, \tag{4}$$

где

$$A_0 = -\frac{H_A \Omega_\xi \left(C_y C_{\xi OC} + \left(D_y H_A - C_{\xi OC} I_y\right)\omega_z^2\right)}{C_y C_{\eta OC} C_{\xi OC} + C_{\eta OC}\left(D_y H_A - C_{\xi OC} I_y\right)\omega_z^2 + 2C_x\left(D_y^2\omega_z^2 + \left(C_y - I_y\omega_z^2\right)^2\right)},$$

$$A_1 = -\frac{2C_y H_A \Omega_\eta \sqrt{D_x^2\omega_z^2 + \left(C_x - I_x\omega_z^2\right)^2}}{C_x C_{\eta OC} C_{\xi OC} + C_{\xi OC}\left(D_x H_A - C_{\eta OC} I_x\right)\omega_z^2 + 2C_y\left(D_x^2\omega_z^2 + \left(C_x - I_x\omega_z^2\right)^2\right)},$$

$$\chi_\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{C_x - I_x\omega_z^2}{D_x\omega_z}\right).$$

Выражения для B_0, B_1, χ_β имеют структуру, аналогичную A_0, A_1, χ_α. Перекрестная ОС эффективна в случае, когда поворот маятника за вращающимся основанием будет происходить в большей степени за счет цепочек перекрестной ОС, а не за счет жесткости упругого подвеса. Об эффективности перекрестной ОС при различных соотношениях жесткостей подвеса и коэффициентов перекрестной ОС можно судить, например, по поведению углов α и β – наличие отрицательных постоянных составляющих углов A_0 и B_0 (т.е. углов запаздывания маятника относительно корпуса или статических ошибок) и их доминирование над величинами переменных составляющих A_1 и B_2 являются признаками эффективности перекрестной ОС. Отношение постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей A_0/A_1 линейно зависит от коэффициента ОС, т.е. с увеличением коэффициента перекрестной ОС она становится более эффективной. При этом, чем больше тангенс угла наклона $K_{A0/A1}$ этой прямой, тем при меньшей абсолютной величине коэффициента ОС можно достигнуть эффективности перекрестной ОС. Видно, что $K_{A0/A1}$ не зависит от коэффициента ОС, но сильно зависит от жесткости подвеса.

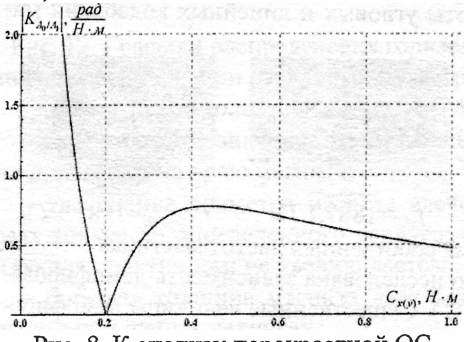


Рис. 8. К анализу перекрестной ОС

В результате, если жесткость подвеса принимает значения близкие к величине (в данном случае *0.2 Н·м*), когда все три собственные угловые частоты маятника совпадают, введение перекрестной ОС практически невозможно: увеличение коэффициента ОС практически не увеличивает ее эффективность. Наиболее эффективно перекрестную ОС использовать при малой жесткости подвеса.

В случае прямой ОС выражения для моментов ОС будут соответствовать выражениям (3), где $C_{\xi OC}$ и $C_{\eta OC}$ – коэффициенты обратной связи. В этом случае решения уравнений для установившегося движения в первом приближении для

постоянных угловых скоростей будут иметь вид:

$$\begin{cases} \alpha = A_0 + A_1 \sin\left(\omega_z t + \chi_\alpha\right) \\ \beta = B_0 + B_1 \sin\left(\omega_z t + \chi_\beta\right) \end{cases}, \tag{5}$$

где

$$A_0 = -\frac{D_y \omega_z^2 H_A^2 \Omega_\xi}{2\left(C_x + C_{\xi OC}\right)\left(D_y^2 \omega_z^2 + \left(\left(C_y + C_{\eta OC}\right) - I_y \omega_z^2\right)^2\right)},$$

$$A_1 = -\frac{H_A \Omega_\eta}{\sqrt{D_x^2 \omega_z^2 + \left(\left(C_x + C_{\xi OC}\right) - I_x \omega_z^2\right)^2}}, \quad \chi_\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{\left(C_x + C_{\xi OC}\right) - I_x \omega_z^2}{D_x \omega_z}\right).$$

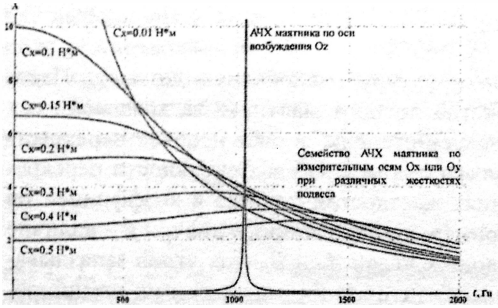


Рис. 9. АЧХ маятника по измерительным осям при различных жесткостях подвеса

Выражения для B_0, B_1, χ_β имеют структуру, аналогичную A_0, A_1, χ_α. Прямая ОС эффективна как при малой, так и при большой жесткости упругого подвеса. При этом для обоих случаев ОС слишком большая жесткость подвеса нежелательна с точки зрения обеспечения устойчивости и конечного порога чувствительности ДУ. Выбор осуществлен в пользу прямой ОС.

Теоретически и экспериментально исследованы упругие подвесы маятников. Определены величины жесткостей подвеса, при которых отклик механической системы (без ОС) будет максимальным на частоте возбуждения (рис. 9) (что соответствует резонансной настройке механической системы), определены геометрические размеры элементов упругих подвесов, обеспечивающие выполнение этого условия, и позволяющие разнести собственные частоты угловых и линейных колебаний маятника (рис. 10).

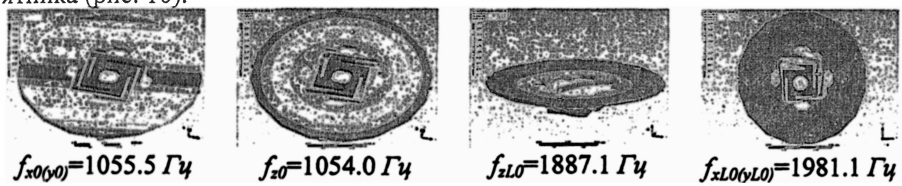


Рис. 10. Результаты исследования собственных частот маятника

Теоретически и экспериментально исследована зависимость демпфирование от величины рабочего зазора (рис. 11). Существенные величины демпфирования по измерительным осям способствуют лучшему сопротивлению вибрациям и ударам. Добротность в 2500 в совокупности с магнитоэлектрическими ДМ достаточна для получения больших амплитуд колебаний по оси возбуждения. Обеспечение больших зазоров, позволяет обойтись без вакуумирования и

работать при атмосферном давлении, что позволяет существенно снизить стоимость приборов.

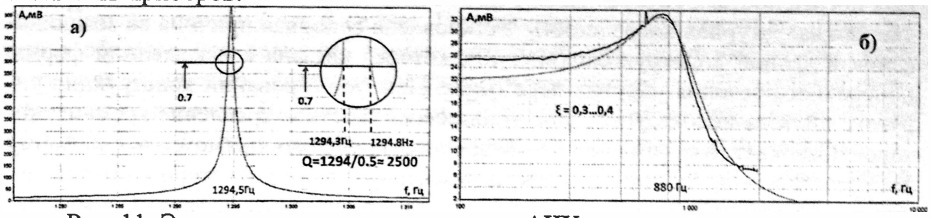


Рис. 11. Экспериментально полученные АЧХ маятника: а – вокруг оси возбуждения; б – вокруг измерительных осей

Теоретически и экспериментально исследованы магнитоэлектрические ДМ ОС и системы возбуждения, что позволило разработать методику определения рационального соотношения размеров ДМ с целью получения максимального момента в минимальных габаритах. Исследование распределения горизонтальной составляющей индукции «стесненного» магнитного поля ДМ ОС позволило определить его поведение в зависимости от геометрических размеров магнитов (рис. 12):

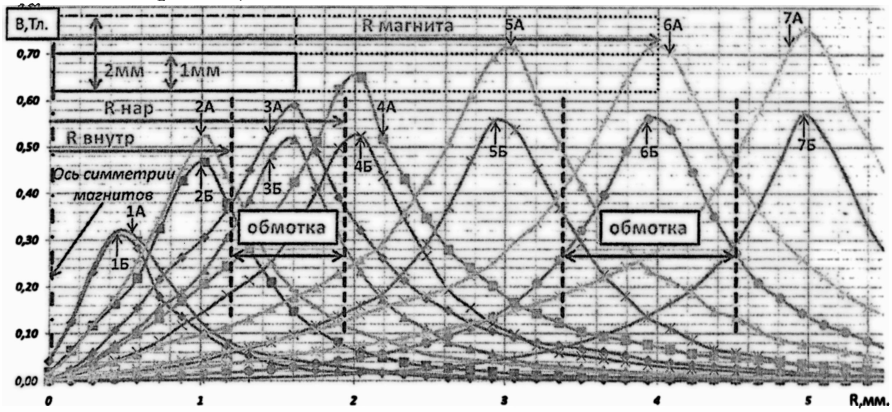


Рис. 12. Графики распределения горизонтальной составляющей магнитной индукции ДМ ОС при различных геометрических размерах магнитов: 1Б–7Б – для магнитов толщиной 1 мм; 1А–7А – для магнитов толщиной 2 мм

– максимальное значение горизонтальная составляющая магнитной индукции принимает на краю магнита;

– увеличение диаметра магнита влечет за собой увеличение индукции на краях только до определенного радиуса: при дальнейшем увеличении радиуса индукция практически не увеличивается;

– большая толщина магнита дает большую величину индукции на краях магнита при любых радиусах.

Таким образом, витки спиральной обмотки следует концентрировать как можно ближе к краю магнита, толщину магнита лучше делать как можно больше.

Во **второй главе** приведены результаты исследования квадратурной по-

грешности гироскопа и способов ее устранения. Известно, что наиболее значимой погрешностью, которая влияет на точностные характеристики прибора, является квадратурная погрешность. Установлена основная причина ее возникновения в данной конструкции (рис. 13), которая связана с искажением формы поперечного сечения упругих перемычек. При формировании конструкции упругого подвеса используется анизотропное жидкостное травление кремния, которое позволяет (в отличие от Bosch-процесса) получить прямоугольную форму поперечного сечения упругих перемычек. Применение двухстороннего травления позволяет уменьшить минимальный размер сквозных отверстий в маятнике. При неточном совмещении верхней и нижней масок при фотолитографии форма поперечного сечения балки искажается (рис. 13), при возникновении колебаний по оси возбуждения возникает косой изгиб балок, который приводит к передаче колебаний по оси возбуждения на измерительные оси, приводя к возникновению квадратурной погрешности.

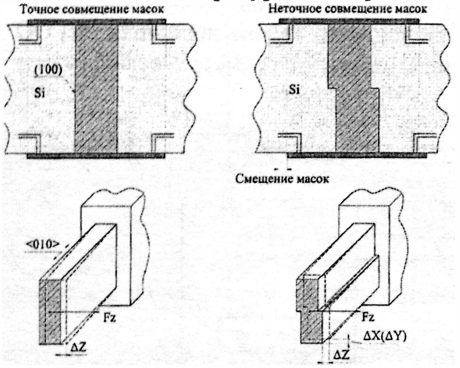


Рис. 13. К объяснению причины искажения формы поперечного сечения упругих перемычек

Предложены методы компенсации квадратурной погрешности, применяемые в процессе изготовления маятников и сборки приборов. Первый метод – корректировка формы поперечного сечения упругих перемычек в процессе изготовления кремниевого маятника (рис. 14), которая заключается в выполнении дополнительного вытравливания выемок в телах упругих элементов таким образом, чтобы их влияние было противоположно влиянию искажений, образующихся в процессе двухстороннего травления из-за неточности совмещения масок при двухсторонней фотолитографии. В результате получается скорректированная форма поперечного сечения перемычки (Шаг 2 на рис. 14), которая способствует устранению косого изгиба упругих перемычек, а, следовательно, и квадратурной погрешности. Правильно подобранные размеры и места подтравов позволяют уменьшить как минимум на порядок величину паразитных колебаний из-за квадратурной погрешности.

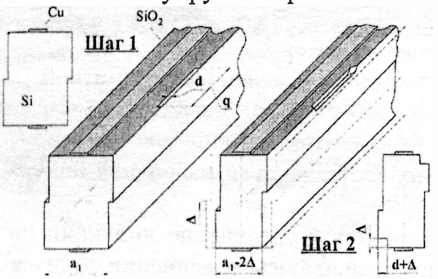


Рис. 14. Устранение квадратурной погрешности путем подтрава упругих перемычек

Второй метод заключается в изменении формы магнитного поля в зазоре датчиков момента по оси возбуждения при помощи разворота магнитов с профилированными торцами, либо путем разворота вкладышей из магнитомягкого материала (МММ) с профилированными торцами (рис. 15). Разворот приводит к изменению направления ради-

альной составляющей индукции B_2, а это в свою очередь приводит к изменению направления и величины аксиальной силы F_2, перпендикулярной плоскости зазора. Четыре головки (поз. 6 на рис. 1) позволяют сконфигурировать пары сил таким образом, что величина паразитных колебаний будет уменьшена, либо устранена полностью. Исследованы различные варианты формы профиля регулировочных головок. Выявлены формы профиля, позволяющие увеличить аксиальные силы F_2 при минимальном уменьшении сил в плоскости маятника.

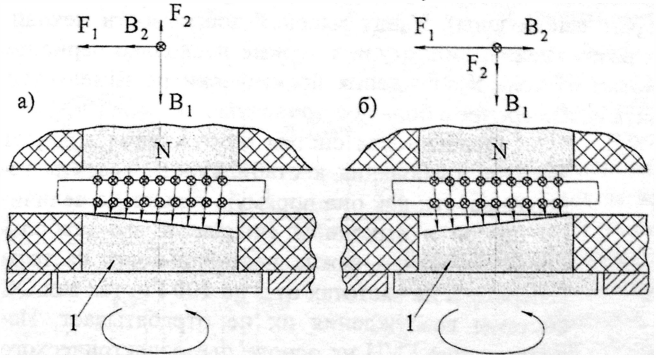


Рис. 15. Устранение квадратурной погрешности путем изменения формы магнитного поля при помощи разворота вкладышей *1* с профилированными торцами: а) положение вкладыша *1* – 0°; б) положение вкладыша *1* – 180°

Предложен способ подавления квадратурной погрешности заключающийся в размещении дополнительных обмоток ДМ идентичных ДМ ОС. Для реализации такого способа необходимо организовывать дополнительные обратные связи, идентичные компенсационным ОС, которые будут выделять из сигналов с ДУ информацию о квадратурной составляющей и подавать токи управления на обмотки ДМ для устранения паразитных колебаний.

В **третьей главе** приведены результаты исследований вариантов построения систем возбуждения колебаний. Первый вариант – система автовозбуждения колебаний с мостовой схемой включения обмотки возбуждения, которая имеет существенные недостатки:

– существенная зависимость работы системы возбуждения от основания, на котором установлен гироскоп;

– для гарантированного запуска системы требуется внешнее воздействие;

– зависимость мостовой схемы от температуры (из-за зависимости сопротивления обмотки возбуждения от температуры), которая приводит появлению паразитного сигнала с моста в фазе с сигналом об угловой скорости, что не позволяет их разделить;

– частота питания ДУ не синхронизирована с частотой тока возбуждения, что приводит к переменному дрейфу выходного сигнала гироскопа по всему диапазону измерения.

Отказ от системы автовозбуждения с мостовой схемой в пользу системы возбуждения с поддержанием амплитуды, разделение функций обмотки ДМ во времени, использование управляемого напряжением генератора (ГУН) и синхронизация частот тока возбуждения и питания ДУ позволили избежать вышеперечисленных проблем.

Разделение функций обмотки ДМ во времени (рис. 16 и 17) позволили устранить влияние тока возбуждения и температурных изменений сопротивления обмотки на сигнал наводимой ЭДС. При реализации такой схемы один или несколько периодов тока возбуждения обмотка подключена к системе возбуждения (период возбуждения; ключи Кл1 включены, ключи Кл2 выключены). Затем, следующие один или несколько периодов обмотка отключается от тока возбуждения и с нее снимается сигнал наводимой ЭДС (период опроса; ключи Кл2 включены, ключи Кл1 выключены). Ввиду высокой добротности механической системы по оси возбуждения, амплитуда в первые несколько периодов после отключения обмотки от тока возбуждения практически не изменяется, что позволяет реализовать ее измерение с большой точностью.

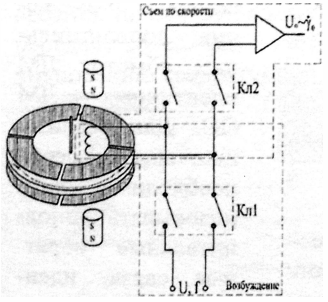


Рис. 16. К описанию разделения функций обмотки ДМ во времени: схема включения обмотки ДМ

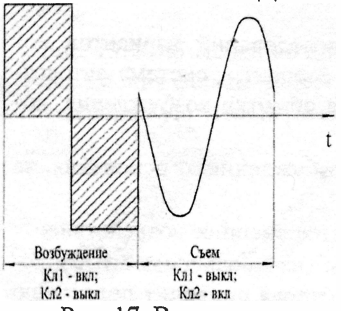


Рис. 17. Временная диаграмма работы схемы включения обмотки ДМ

Особенности систем возбуждения диктуют жесткие требования к стабильности частоты генератора, так как она впрямую влияет на величину шумов в выходном сигнале и его стабильность. Особенно важна нестабильность частоты генератора на частотах от 1 до 100 Гц, так как ОС системы возбуждения их не отрабатывает. Использование ГУН на основе пьезоэлектрического резонатора из лантан галлиевого силиката (лангасита), обладающего несколько меньшей добротностью по сравнению с кварцем, позволяет при существенно бо̲льшем (чем у кварца) диапазоне перестройки сохранить удовлетворительную стабильность частоты. Другим важным достоинством резонатора из лангасита является возможность точной настройки его частоты при изготовлении, что позволяет путем замены лангасита изменять номинальную частоту работы ГУН и перекрыть тем самым изменения собственных частот маятников от партии к партии.

На основании вышеперечисленных изменений разработано два варианта систем возбуждения с поддержанием амплитуды, которые позволяют избавиться от недостатков системы автовозбуждения и более точно поддерживать амплитуду угловой скорости, а соответственно и амплитуду собственного кинетического момента, позволяя тем самым повысить точностные характеристики гироскопа. Один из них – вариант системы возбуждения с дорезонансной настройкой. Возбуждение осуществляется на частоте, чуть меньшей резонансной и поддержание амплитуды колебаний маятника осуществляется за счет изменения частоты возбуждения.

Другой вариант – система возбуждения с резонансной настройкой (рис 18 и 19). В системе имеется два контура ОС. Первый при помощи фазометра (ИФ) отслеживает фазу колебаний относительно тока возбуждения и подает управ-

ляющее напряжение $V_{упр}$ на ГУН, который меняет частоту тока возбуждения, удерживая систему в резонансе. Второй контур отслеживает амплитуду угловой скорости и в случае ее отклонения от заданной изменяет напряжение возбуждения U_B, подаваемое на схему формирования тока возбуждения на ключах Кл3 и Кл4, поддерживая ее постоянной.

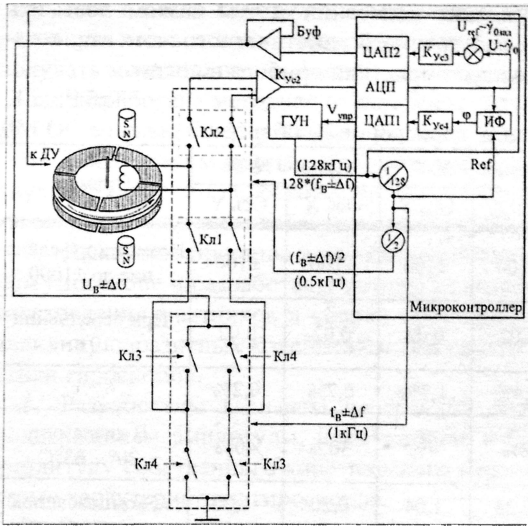


Рис. 18. Принципиальная схема системы возбуждения колебаний с поддержанием амплитуды и резонансной настройкой (в скобках приведены ориентировочные значения номинальных частот)

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований опытных образцов гибридного гироскопа. Подтверждена работоспособность двухкоординатного компенсационного микромеханического гироскопа в гибридном исполнении: с кремниевым маятниковым узлом, магнитоэлектрическими ДМ системы возбуждения колебаний и обратной связи, работающего при больших зазорах между подвижной и неподвижной частями и при отсутствии вакуумирования. Путем создания работоспособных опытных образцов гибридного гироскопа на территории России подтверждена возможность создания гироскопов подобного типа на существующей технологической базе отечественных приборостроительных предприятий. Описаны элементы, входящие в состав гибридного гироскопа: кремниевый маятник с двумя вариантами упругих подвесов, керамические корпуса, платы электроники и прочие детали конструкции. Описан процесс сборки и настройки приборов и необходимое для этого оборудование. Описаны проблемы, возникающие при изготовлении деталей и сборке приборов. Описано оборудование и приспособления, необходимые для проведения испытаний гироскопов. Методика испытаний соответствует международным стандартам IEEE Std. В таблице 1 представлены результаты испытаний двух из приборов (условные номера 06 и 07).

Испытания приборов 06 и 07 проводились без компенсации квадратурной погрешности. Но было заведомо известно, что прибор 06 имеет большие искажения формы упругих перемычек (до 7 мкм), а прибор 07 малые (до 1–2 мкм). Одновременно с этим в результатах испытаний наблюдаются резкие расхождения нестабильности и повторяемости смещения нуля и температурная нестабильности масштабного коэффициента и смещения нуля: у прибора 07 эти параметры на один два порядка лучше без какой-либо алгоритмической компенсации. В результате подтверждена важность физической компенсации квадра-

турной погрешности, и ее сильное влияние на точностные параметры прибора. Аналогичные результаты были получены и на других макетах приборов.

Проведенные испытания опытных образцов подтверждают работоспособность системы возбуждения с дорезонансной настройкой и системы возбуждения с резонансной настройкой, позволяющих избавиться от недостатков и погрешностей системы автовозбуждения колебаний и тем самым повысить точность поддержания амплитуды собственного кинетического момента, а соответственно повысить точностные характеристики прибора в целом.

Таблица 1.

Результаты испытаний гироскопов № 06 и № 07

Параметр		Ед. изм.	Прибор № 07		Прибор № 06		Примеч.
			Ось X	Ось Y	Ось X	Ось Y	
Диапазон измерения		°/с	±100	±100	±100	±100	Возможно увеличение до ±1000
Разрешающая способность		°/с	0,02	0,02	0,02	0,02	При осреднении 10 с.
Нелинейность масшт. коэф.		%	0,4%	1,2%	0,7%	0,2%	
Температурная нестабильность масшт. коэф.		%	2%	4%	30%	40%	В диапазоне 20°…63°С
Смещение нуля	Номинальное	°/с	-0,23	1,04	0,20	-1,00	С компенсацией
	Нестабильность	°/с	0,04	0,03	0,12	0,12	
	Повторяемость	°/с	0,15	0,08	1,00	0,30	
	Температурная нестабильность	°/с	0,1	0,1	23,0	20,0	В диапазоне 20°…63°С

Время готовности приборов по результатам испытаний составляет от 3 до 5 с., полоса пропускания составляет 70 Гц. Величина нестабильности нуля гироскопов достигает десятков °/ч, случайный дрейф (ARW) составляет 1…2 $°/\sqrt{ч}$. Однако, наличие компенсационной обратной связи, использование магнитоэлектрических ДМ, возможность применения новых способов компенсации квадратурной погрешности, применяемых в процессе изготовления маятника и сборки и регулировки приборов, дает возможность существенного повышения точности прибора в дальнейшем.

Основные результаты и выводы диссертационной работы

1. Разработана конструкция двухкоординатного гибридного МЭМС гироскопа R-R-R типа с кремниевым маятниковым узлом, емкостными ДУ, магнитоэлектрическими ДМ системы возбуждения колебаний и магнитоэлектрическими ДМ ОС, с большими рабочими зазорами и без вакуумирования, позволяющая повысить точностные характеристики гироскопов, и позволяющая изготавливать их на существующей отечественной технологической базе.

2. Разработана конструкция кремниевого маятника, выполненного по обращенной схеме, с размещенными не его поверхности обмотками магнитоэлек-

трических ДМ ОС и системы возбуждения.

3. Разработаны варианты конструкции упругого подвеса маятника, позволяющие варьировать величины его жесткостей и тем самым получить максимальный отклик механической системы на частоте возбуждения и разнести собственные частоты угловых и линейных колебаний маятника.

4. Разработана конструкция магнитоэлектрического ДМ ОС, которая, имея роторную часть в виде плоской обмотки на поверхности маятника, позволяет получать моменты от сил Ампера, лежащие в плоскости маятника.

5. Разработана методика определения рационального соотношения размеров ДМ ОС с целью получения максимального момента в минимальных габаритах.

6. Исследованы варианты построения компенсационной ОС в гибридном двухкоординатном гироскопе, что позволило обеспечить более высокие точностные и динамические характеристики приборов.

7. Выявлены причины возникновения квадратурной погрешности в гибридном гироскопе и разработаны методы ее компенсации, применяемые в процессе изготовления маятников и сборки приборов, позволяющие физически снизить величину паразитных колебаний и тем самым повысить точностные характеристики гироскопов.

8. Разработаны варианты построения системы возбуждения колебаний с поддержанием амплитуды, позволяющие с большей точностью поддерживать амплитуду собственного кинетического момента и тем самым повысить точностные характеристики гироскопов.

9. Разработана технология изготовления маятникового узла, сборки и регулировки гибридных гироскопов.

10. Созданы и экспериментально исследованы опытные образцы гибридных гироскопов. Результаты испытаний подтвердили основные положения теоретической части работы.

11. Получено положительное решение на выдачу патента РФ на изобретение: микромеханический вибрационный гироскоп.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Micromechanical compensation accelerometer with magnetoelectric torquers: Report / S.F. Konovalov [et al.] // 19th St. Petersburg International conference on Integrated Navigation Systems: Proceedings. 2012. P. 82–87.

2. Two-axis MEMS angular rate sensor with magnetoelectric feedback torques in excitation and measurement channels / S. F. Konovalov [et al.] // Gyroscopy and Navigation. USA: Pleiades publishing, Ltd., 2010. Vol. 1, № 4. P. 321–329. DOI: 10.1134/S2075108710040140.

3. Two-axis MEMS angular rate sensor with magnetoelectric feedback torques in excitation and measurement channels: Report / S. F. Konovalov [et al.] // 17th St. Petersburg International conference on Integrated Navigation Systems: Proceedings. 2010. P. 17–24.

4. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры: Статья / С.Ф. Коновалов [и др.] // http://technomag.edu.ru: электронное научно-техническое издание «Наука и образование». Электрон. журн. 2011. № 10. 23с. URL. http://technomag.edu.ru/doc/219257.html (дата обращения: 12.12.12)

5. Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения / С.Ф. Коновалов [и др.] // Гироскопия и навигация. 2010. №3(70). С. 61–71.

6. Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения: Доклад / С.Ф. Коновалов [и др.] // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. 2010. С. 18–25.

7. Двухкоординатный компенсационный микромеханический гироскоп R-R типа: Тезисы докл. / С.Ф. Коновалов [и др.] // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIV Академических чтений по космонавтике. 2010. С. 598.

8. Коновалов С.Ф., Подчезерцев В.П., Пономарев Ю.А. Моделирование процессов компенсации нулевого сигнала в МЭМС гироскопе: Статья // http://technomag.edu.ru: электронное научно-техническое издание «Наука и образование». Электрон. журн. 2012. № 9. 12с. URL. http://technomag.edu.ru/doc/476265.html (дата обращения: 12.12.12) DOI: 10.7463/0912.0476265

9. Микромеханический компенсационный акселерометр с магниоэлектрическими датчиками момента: Доклад / С.Ф. Коновалов [и др.] // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. 2012. С. 78–84.

10. Положительное решение по заявке на изобретение: Микромеханический вибрационный гироскоп: №2010120200/28(028737) РФ / С.Ф. Коновалов [и др.] заявл. 21.05.2010.

11. Пономарев Ю.А., Кулешов А.В., Подчезерцев В.П. Особенности формирования контура обратной связи двухкомпонентного микромеханического гироскопа R-R типа: Тезисы докл. // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXV Академических чтений по космонавтике. 2011. С. 610.

12. Пономарев Ю.А., Кулешов А.В., Джепаров И.Э. Макет микромеханического осцилляторного вибрационного гироскопа R-R типа // Труды ФГУП «НПЦ АП». 2009. №2 (8). С. 52–58.

13. Пономарев Ю.А., Теленков Д.А. Результаты испытаний блока чувствительных элементов VN-100 фирмы VectorNav // Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. М.: ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2012. №6(258). С. 12–21.

14. Пономарев Ю.А., Коновалов С.Ф. Двухкоординатный микромеханический осцилляторный вибрационный гироскоп R-R типа: Тезисы докл. // Гироскопия и навигация. 2009. №2(65). С. 95.