

На правах рукописи



МОИСЕЕВ НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП
КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА С РАСШИРЕННЫМ
ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЕНИЯ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Некрасов Яков Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения»

Лестев Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерных измерительных и навигационных систем» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Шевченко Сергей Юрьевич

Ведущая организация – филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова»

Защита состоится «16» декабря 2015 г. В 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, ауд. 5108

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПб ГЭТУ: www.eltech.ru.

Автореферат разослан «15» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.06

д.т.н., доцент



/ А. М. Боронахин /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Инерциальные МЭМС датчики стали доступны в качестве альтернативы для недорогих систем примерно с середины 1990-х годов. Хотя уровень характеристик новых МЭМС-датчиков был ниже, чем у их механических аналогов, они имели значительно меньшие размер, потребляемую мощность и стоимость.

МЭМС датчики нашли применение в таких областях как управление движением объектов (автомобили, авиация, ракеты), в системах навигации, в машиностроении и измерительной технике, в геологоразведочной аппаратуре, робототехнике. В процессе расширения областей применения микромеханических датчиков возникали проблемы с их использованием. Это было связано с тем, что при работе в реальных условиях (вибрации, удары, акустические воздействия, изменения температуры) характеристики датчиков существенно ухудшались.

В 2003г. в США началась программа HERMIT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology), целью которой был поиск решений по созданию МЭМС устройств, способных работать в жестких условиях и сохранять характеристики в этих условиях. Только в 2012 году в аналитическом обзоре французской фирмы Yole отмечалось, что проблемы ухудшения характеристик существующих МЭМС датчиков и ИИМ при работе в жестких условиях были решены.

Среди доступных публикаций посвященных вопросам повышения стабильности характеристик, можно отметить статьи зарубежных исследователей: M.S. Weinberg, A.Shkel. Несколько компаний достигли успеха в создании датчиков тактического класса точности. Это такие фирмы как: Honeywell (США), AIS (США), LITEF (Германия), Gladiator technologies (США), L-3 Com (США), ADI (США), Sensoror (Норвегия), Thales (Франция).

Помимо стабильности характеристик также немаловажными являются такие характеристики как диапазон измерения угловых скоростей (более 2000°/с) и частотный диапазон (более 100Гц). Гироскопы, обладающие такими характеристиками, применяются на высоко динамичных объектах, а также идеально подходят для носимых применений в области спорта для отработки техники движений спортсмена во время тренировок.

Публикации, посвященные расширению диапазона измерения, практически отсутствуют, за исключением статьи ф.Analog Devices, в которой исследуются

характеристики гироскопа прямого преобразования ADXRS649 с диапазоном измерения до $\pm 50000^\circ/\text{с}$.

На рынке также присутствуют такие фирмы как InvenSense, STMicroelectronics с гироскопами ITG-3701($\pm 4000^\circ/\text{с}$), LY5150AL ($\pm 6000^\circ/\text{с}$) соответственно. Из отечественных разработчиков можно выделить Лабораторию Микроприборов (Зеленоград), с гироскопом ММГК-10000($\pm 10000^\circ/\text{с}$) и фирму “Гирооптика” (Санкт-Петербург) в которой разработан гироскоп с диапазоном измерения до $\pm 9000^\circ/\text{с}$.

Сохранение высоких точностных характеристик в широком диапазоне угловых скоростей при жестких механических и температурных воздействиях в настоящее время является одной из основных целей при проектировании микромеханических гироскопов (ММГ). Для ее достижения применяются такие средства как повышение резонансной частоты инерционной массы (ИМ) чувствительного элемента (ЧЭ), использование многомассовых ЧЭ, демпфирующих подвесов из кремния, использование избыточного числа датчиков, разработка новых алгоритмов управления положения ИМ и преобразования сигналов в ММГ.

Отсутствие литературы, посвященной созданию ММГ компенсационного типа с расширенным диапазоном измерения, обусловлено тем, что такие датчики относятся к продукции двойного назначения. Поэтому решение ряда задач, направленных на расширение диапазона измерения и повышение точности ММГ, является актуальным.

Цель диссертационной работы заключается в расширении диапазона микромеханического гироскопа компенсационного типа и улучшении его характеристик за счет систем управления в контуре первичных и вторичных колебаний.

Сложность задачи повышения точности ММГ с расширенным диапазоном измерения обусловлена тем, что необходимо обеспечить достаточно большое контурное усиление в канале вторичных колебаний при всех внешних воздействиях, определяемых условиями работы ММГ, стабильную амплитуду первичных колебаний при этих воздействиях и угловых скоростях, превышающих более, чем на порядок угловые скорости для ММГ компенсационного типа с типичным (до $500^\circ/\text{с}$) диапазоном, обеспечить формирование компенсирующих

моментов, соответствующих действующему моменту сил Кориолиса и квадратурной помехи.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные *задачи*:

1. Проведен анализ работы ММГ с расширенным диапазоном измерения с каналами вторичных колебаний, выполненных по разомкнутой и замкнутой схемам, выявлены преимущества гироскопа при использовании компенсационного режима в канале вторичных колебаний.

2. Проведен анализ факторов: технологических погрешностей, внутренних связей, в том числе и паразитных, между каналами и функциональными узлами и внешних воздействий, влияющих на точность и диапазон измерения ММГ.

3. Разработаны методы повышения точности ММГ с расширенным диапазоном измерения, основанные на результатах аналитического анализа, моделирования и экспериментальных исследований образцов.

4. Разработана уточненная модель ММГ с расширенным диапазоном измерения, учитывающая влияние внешних воздействий и внутренних перекрестных связей на параметры чувствительного элемента

5. Разработаны структуры каналов измерения и управления положением инерционной массы и преобразования сигналов в ММГ компенсационного типа.

6. Разработан стенд с диапазоном задаваемых угловых скоростей до 15000°/с и проведены экспериментальные исследования ММГ с расширенным диапазоном измерения.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в работе использовались методы и аппарат теории автоматического управления, теоретической механики, теории колебаний, цифровой обработки информации, математического анализа и компьютерное моделирование.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель ММГ RR-типа, учитывающая влияние перекрестных связей, что позволило расширить его диапазон измерения и улучшить точностные характеристики.

2. Разработан способ управления положением инерционной массы чувствительного элемента, заключающийся в управлении по напряженности электрического поля в зазоре между силовыми электродами и обеспечивающий нечувствительность масштабного коэффициента ММГ к изменению зазора.

3. Разработана структура преобразователей емкость-напряжение с нормированным коэффициентом передачи, позволяющая повысить стабильность масштабного коэффициента ММГ при воздействии вибраций и температуры.

4. Разработан метод настройки демодулятора, позволяющий уменьшить погрешность гироскопа, обусловленную наличием квадратурной и синфазной помех.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Созданы экспериментальные образцы ММГ компенсационного типа с диапазоном изменения до $\pm 10000^\circ/\text{с}$, нестабильностью нуля менее $10^\circ/\text{ч}$ и нелинейностью масштабного коэффициента менее 1%.

2. Разработана структура преобразователей емкость-напряжение с нормированным коэффициентом передачи, позволяющая повысить стабильность масштабного коэффициента ММГ.

3. Результаты работы используются в учебном процессе ИТМО в читаемом на факультете КТиУ курсе “Инерциальные чувствительные элементы”.

Достоверность научных и практических результатов подтверждается использованием корректных математических приемов, сопоставлением аналитических результатов, данных, полученных в ходе математического моделирования и экспериментальных исследований, прохождением экспертизы в Российском агентстве по патентам и товарным знакам и положительным решением на выдачу 7 патентов РФ, критическим обсуждением результатов работы на научно-технических конференциях.

Материалы работы докладывались и обсуждались на XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург, 2014 г.), на XL научной и учебно-методической конференции СПб НИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2011г.), на XX – XXI международных конференциях по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2013 – 2014 г.), на VII-VIII конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, 2006 – 2007 г.).

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Метод определения диапазона измерения и плотности мощности шума по параметрам чувствительного элемента позволяет оптимизировать характеристики ММГ с расширенным диапазоном измерения.

2. Способ управления положением инерционной массы чувствительного элемента, заключающийся в управлении по напряженности электрического поля в зазоре между силовыми электродами, позволяет исключить влияние изменения зазора на масштабный коэффициент ММГ.

3. Структура преобразователей емкость-напряжение с нормированным коэффициентом передачи позволяет обеспечить инвариантность коэффициента передачи емкостного датчика угла к изменению межэлектродного зазора.

4. Уточненная математическая модель гироскопа RR-типа с расширенным диапазоном измерения, учитывающая влияние перекрестных связей в чувствительном элементе, позволяет моделировать поведение ММГ при воздействии угловой скорости в широком диапазоне.

5. Метод настройки демодулятора, учитывающей наличие синфазной составляющей нулевого сигнала, позволяет уменьшить погрешность измерения ММГ, обусловленную наличием квадратурной помехи.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, включая статьи в периодических изданиях, из них 3 статьи в научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК, 2 статьи в материалах конференций индексируемых SCOPUS, 7 патентов РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, списка использованной литературы, списка сокращений. Общий объем диссертации составляет 123 страницы, в тексте имеется 81 рисунок, 10 таблиц, список литературы содержит 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении рассмотрены актуальность и практическая ценность диссертации. Сформулированы цель, задачи и методы исследований, определена научная новизна.

В первой главе приведен обзор рынка гироскопов с расширенным диапазоном измерения и анализ зарубежных публикаций по повышению стабильности характеристик гироскопов. Практически все гироскопы с расширенным диапазоном представляют собой датчики прямого преобразования. Изменение диапазона датчиков осуществляется за счет изменения коэффициента

передачи электронной части, изменения амплитуды первичных колебаний или изменения добротности вторичного контура.

Проведенный анализ работы ММГ с расширенным диапазоном измерения с каналами вторичных колебаний, выполненных по разомкнутой и замкнутой схемам, показал преимущества ММГ с замкнутой схемой.

Определены зависимости между достижимым диапазоном измерения гироскопа и плотностью мощности шума в гироскопе, работающем в компенсационном режиме.

В режиме прямого преобразования диапазон измерения определяется максимально возможным углом отклонения $\alpha_0 = \frac{2\gamma_0 J_z Q_\alpha}{J_x \omega_\gamma} \Omega_y$ инерционной массы вокруг оси вторичных колебаний, где ω_γ - частота первичных колебаний, Q_α - добротность, Ω_y - входная угловая скорость, J_z, J_x - моменты инерции.

Для расширения диапазона необходимо уменьшать добротность в канале вторичных колебаний и амплитуду первичных колебаний. Согласно формуле для расчета эквивалентного шума ЧЭ $MNE\Omega \propto \frac{1}{2\gamma_0} \sqrt{\frac{4k_B T}{\omega_\gamma J Q_\alpha}} \sqrt{ППП}$, где k_B, T, PPP - постоянная Больцмана, температура датчика, полоса пропускания датчика соответственно, ω_γ - частота первичных колебаний, J_z - момент инерции, γ - амплитуда первичных колебаний, Q_α - добротность колебательного контура канала вторичных колебаний, эти меры ведут к увеличению шума ММГ и ухудшению его разрешающей способности.

В компенсационном режиме работы диапазон измерения определяется моментом сил Кориолиса и максимальным моментом M_{DM} , который необходимо создать с помощью датчиков момента в обратной связи, для компенсации угловых перемещений инерционной массы при воздействии угловой скорости, $\max \Omega_y = \frac{1}{4} \frac{dC(\alpha)}{d\alpha} \frac{U^2}{J_z \gamma \omega_\gamma}$, где U - напряжение управления на электродах датчиков момента, $C(\alpha)$ - зависимость межэлектродной емкости датчика момента от угла отклонения ИМ.

Величина M_{DM} , в свою очередь, ограничена конструктивными параметрами датчиков момента, напряжением пробоя, разностью частот первичных и вторичных колебаний Δf , и отрицательной электрической жесткостью.

На Рис.1 приведены графики расчетных зависимостей диапазона измерения для ММГ прямого преобразования (график 1) и ММГ компенсационного типа с увеличенным в 3 раза коэффициентом передачи датчиков момента в обратной связи за счет использования электродов с большей площадью, при напряжениях управления 6В (график 2) и 8В (график 3). Можно видеть, что диапазон измерения $\pm 10000^\circ/\text{с}$ в ММГ прямого преобразования, достигается при амплитуде первичных колебаний $0,05^\circ$, в ММГ компенсационного типа при напряжении 6В и $\Delta f = 100\text{Гц}$ амплитуда первичных колебаний равна $0,32^\circ$, при напряжении 8В и $\Delta f = 200\text{Гц}$ – $0,6^\circ$.

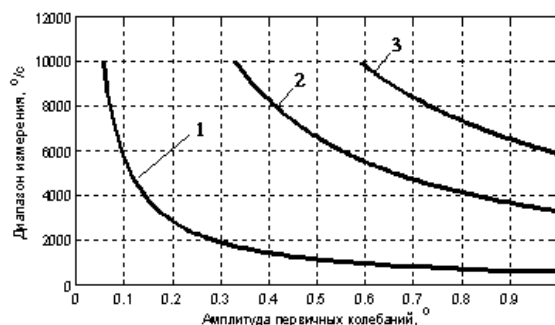


Рис.1 – Зависимость диапазона измерения ММГ от амплитуды первичных колебаний

Предлагаемая в диссертации методика позволяет осуществить расчет оптимальных параметров ЧЭ для обеспечения заданного диапазона измерения с учетом отрицательной электрической жесткости, электродов датчика момента и резонансных частот подвеса.

При синтезе системы управления канала вторичных колебаний ММГ компенсационного типа необходимо обеспечить устойчивость и заданную ошибку стабилизации инерционной массы ЧЭ. Расчеты показали, что для обеспечения ошибки измерения ММГ не хуже $0,003\%$ во всем диапазоне измерения, величина контурного коэффициента усиления должна быть не менее 40000, при этом частота среза замкнутой системы более 40кГц . В этом случае масштабный коэффициент ММГ компенсационного типа и его стабильность определяются только коэффициентом передачи датчика момента в обратной связи, и не зависят от других параметров ЧЭ.

Достижимая величина контурного коэффициента усиления определяется внешними и внутренними факторами. Внешние факторы могут приводить к потере устойчивости замкнутой системы из-за изменения параметров ЧЭ: добротностей, резонансных частот, межэлектродных зазоров. Погрешности изготовления ЧЭ приводят к появлению механических перекрестных связей, приводящих к ошибкам управления. Наличие паразитных электрических связей, свойственных технологии кремний на изоляторе, приводит к прохождению сигналов управления в измерительные каналы, искажению частотных

характеристик ЧЭ.

Во второй главе рассмотрены факторы, оказывающие влияние на работу ММГ компенсационного типа, которые можно разделить на внешние по отношению к ЧЭ и внутренние, вызванные перекрестными связями в ЧЭ, и способы их компенсации. Показано, что к основным внешним воздействиям, приводящим к ошибкам измерения, относятся температурные вибрационные и ударные воздействия. К внутренним факторам относятся: квадратурная и синфазные помехи, электрическая жесткость, паразитные электрические связи и механические перекрестные связи в чувствительном элементе. Температурные воздействия в широком температурном диапазоне $(-40+85)^{\circ}\text{C}$ приводят к изменению добротности каналов первичных и вторичных колебаний до 40%. Изменение размеров ИМ вследствие расширения кремния при изменении температуры приводит к изменению межэлектродного зазора. Проведенные расчеты для ЧЭ с толщиной ИМ, равной 60мкм и зазором 3мкм, показали, что при изменении температуры на 30°C изменение зазора составляет 0.18%. Расчеты были подтверждены экспериментально (Рис.2).

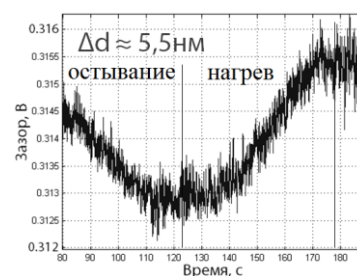


Рис.2 – Изменение зазора от времени при изменении температуры на 30°C

При воздействии ускорений (Рис.3.а), вибрациях (Рис3.б) и ударах изменение зазора Δd происходит из-за перемещения ИМ вдоль оси первичных колебаний Z, определяемое по формуле

$$\Delta d = \frac{ma_0Z}{C_z}, \text{ где } m - \text{ масса ИМ, } a_0Z$$

- действующее ускорение вдоль оси Z, C_z - линейная механическая жесткость вдоль оси Z.

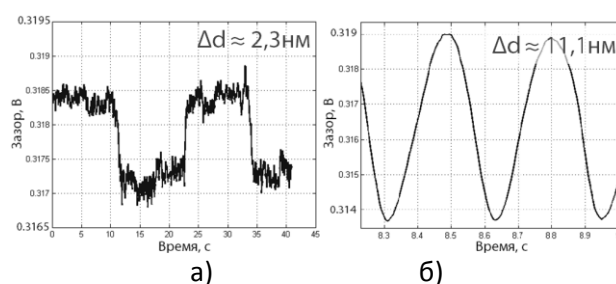


Рис.3 - Экспериментально полученные зависимости сигнала (зазора) от времени при ускорении $\pm g$ (а) и вибрации $\pm 2,5g$ с частотой 3Гц (б)

Анализ структуры ЧЭ показал, что паразитные электрические связи между датчиками угла и датчиками момента в ЧЭ, образуемые элементами R_n, C_{n1}, C_{n2} , приводят к прохождению сигнала управления в каналы измерения, при этом образуется положительная обратная связь, которая искажает частотные характеристики ЧЭ и приводит к потере устойчивости замкнутой системы при

небольших значениях контурного коэффициента усиления. На Рис.4 приведена структурная схема канала вторичных колебаний с учетом паразитных связей.

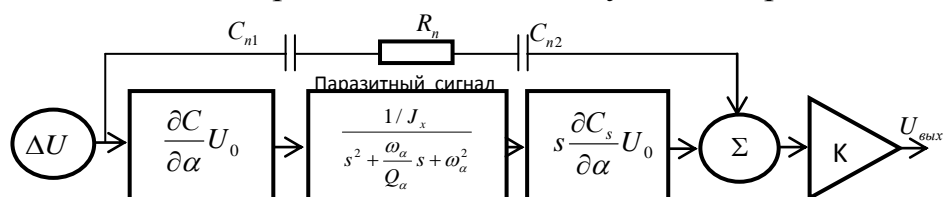


Рис.4 – Структурная схема канала вторичных колебаний с паразитными связями

Автором предлагается способ компенсации паразитных электрических связей при аналоговом управлении за счет формирования напряжения управления вида $U_{1,2} = \pm U_0 + \Delta U \sin(\omega t)$, при котором паразитные сигналы управления не проходят на выход измерительного канала. Другим способом подавления паразитных связей является временное разделение, при котором управление положением ИМ и измерение ее положения осуществляются в разные промежутки времени.

Отрицательная электрическая жесткость $K_{ел}$, используемая для подстройки резонансных частот в гироскопах прямого преобразования, в гироскопе компенсационного типа приводит к зависимости резонансной частоты вторичных колебаний от входной угловой скорости.

$$K_{ел} = \frac{d^2C(\alpha)}{d\alpha^2} U_0^2 + \left[\frac{d^2C(\alpha)}{d\alpha^2} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{2J_z \gamma_o \omega \Omega_y}{K_{ДМ}} \sin(\omega_\gamma t) \right)^2 dt \right] \quad (1)$$

где $K_{ДМ}$ – коэффициент передачи датчика момента, ω_γ - частота первичных колебаний. Можно видеть, что второй член в выражении (1) зависит от входной угловой скорости и определяет среднее значение электрической жесткости за период. При изменении входной угловой скорости в диапазоне $(0-10000)^\circ/c$ изменение резонансной частоты вторичных колебаний, может достигать десятков герц. В диссертации рассмотрен один из способов управления на основе $\Delta\Sigma$ -модуляции, при котором среднее значение электрической жесткости за период остается постоянным и не зависит от входной угловой скорости.

Квадратурный и синфазный моменты на входе канала вторичных колебаний, вызванные технологическими погрешностями изготовления ЧЭ, приводят к отклонению ИМ на угол α на неподвижном основании. Структурная схема чувствительного элемента приведена на Рис.5.

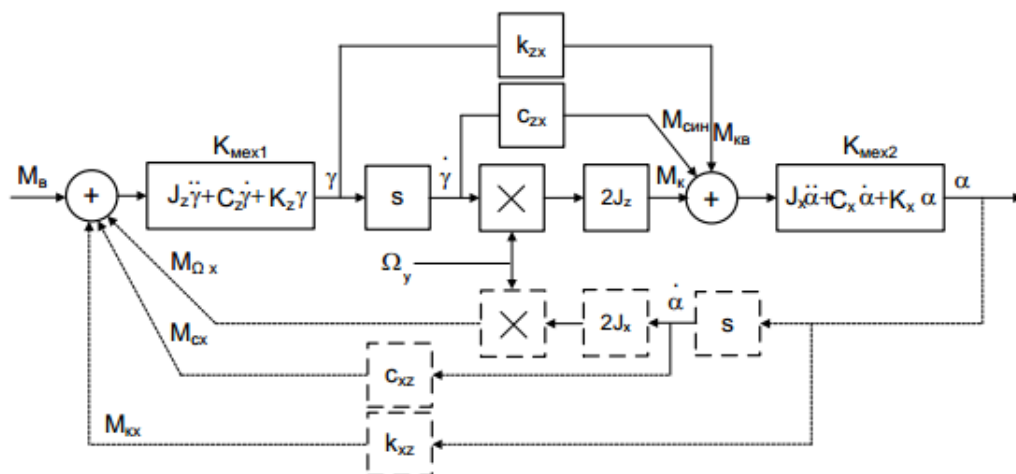


Рис.5 – Структурная схема чувствительного элемента с учетом механических перекрестных связей

В ММГ компенсационного типа при небольших угловых скоростях угол отклонения ИМ мал, и обычно не учитывается. При воздействии больших угловых скоростей из-за конечного значения контурного коэффициента усиления в обратной связи каналов первичных и вторичных колебаний, угол отклонения ИМ в канале вторичных колебаний становится существенным. При ненулевых значениях коэффициентов $c_{xz}, k_{xz}, 2J_x \Omega_y$ на входе канала первичных колебаний возникают паразитные моменты, приводящие к ошибке поддержания заданной амплитуды первичных колебаний.

В третьей главе рассмотрены структура, системы измерения и управления ММГ с расширенным диапазоном. Проведено моделирование работы ММГ при воздействии больших угловых скоростей.

В главе рассмотрена цифровая система управления канала вторичных колебаний экспериментального ММГ, представляющая собой $\Delta\Sigma$ -модулятор четвертого порядка, и приведена методика расчета коэффициентов модулятора.

Для уменьшения влияния изменения межэлектродного зазора датчика момента под действием температуры и вибраций на стабильность масштабного коэффициента ММГ автором предложен способ управления положением ИМ, основанный на управлении по напряженности электрического поля E , при котором момент управления равен $M_{уп} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 S}{(d \pm x)^2} U^2 = \varepsilon_0 E^2$, где S – площадь электродов датчика момента, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, d – межэлектродный зазор, и не зависит от зазора (Рис.6).

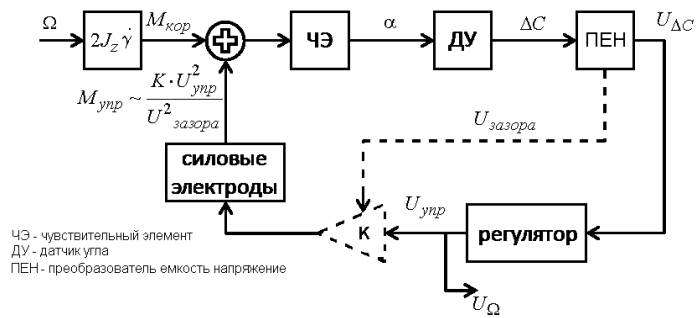


Рис.6 - Структурная схема канала вторичных колебаний ММГ с управлением по напряженности электрического поля

В обратной связи канала вторичных колебаний введено корректирующее звено, коэффициент передачи которого зависит от величины зазора между электродами.

Новая структурная схема преобразователя емкость-напряжение с возможностью измерения зазора приведена на Рис.7. На выходе преобразователя введено корректирующее звено, позволяющее скомпенсировать изменение коэффициента датчика угла в канале первичных колебаний при изменении зазора.

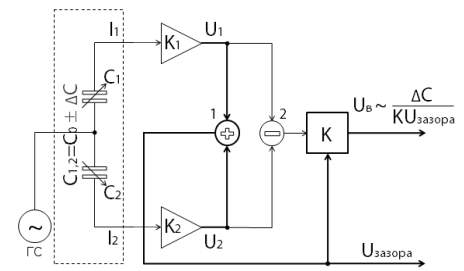


Рис.7 – Структурная схема преобразователя емкость-напряжение с измерением зазора

Сигнал на выходе канала вторичных колебаний $U_{ПЕН2}(t) = (A_{пол}(t) + A_{син}(t)) \cdot \cos(\omega_1 t) + A_{кв}(t) \sin(\omega_1 t)$ содержит информацию об угловой скорости $A_{пол}(t)$, синфазной $A_{син}(t)$ и квадратурной помехах $A_{кв}(t)$. Для выделения полезного сигнала используется синхронная демодуляция, при которой сигнал канала вторичных колебаний умножается на опорный сигнал канала первичных колебаний, и далее, фильтруется с помощью фильтра низких частот. Неточная настройка фазы опорного сигнала приводит к прохождению квадратурной помехи на выход ММГ, которая может быть сопоставима по уровню с входными воздействиями.

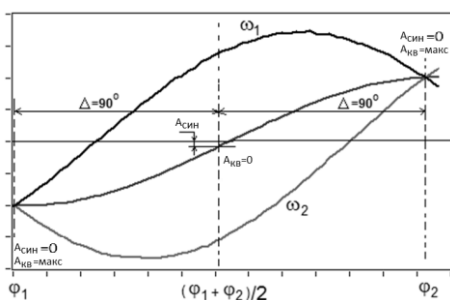


Рис.8 - Зависимость выходного сигнала гироскопа от угловой скорости

Показано, что при наличии синфазного сигнала известные методы настройки приводят к ошибке при определении фазы опорного сигнала демодулятора. Предложенный метод точной настройки фазы опорного сигнала демодулятора поясняется Рис.8. Метод заключается в измерении выходного сигнала ММГ для трех значений угловых скоростей

$\omega_1, 0, \omega_2$ при изменении фазы опорного сигнала в диапазоне $\varphi_1 - \varphi_2$. В точках, где кривые пересекаются, на выход ММГ проходит только квадратурная помеха, а выходной сигнал на неподвижном основании при точной фазе, находящейся в середине интервала между фазами φ_1 и φ_2 , соответствует прохождению синфазной помехи.

На основании уточненной математической модели создана модель ММГ в среде Simulink (Рис.9), состоящая из системы возбуждения первичных колебаний, системы управления на основе $\Delta\Sigma$ -модулятора с компенсацией изменения зазора и системы выделения полезного сигнала.

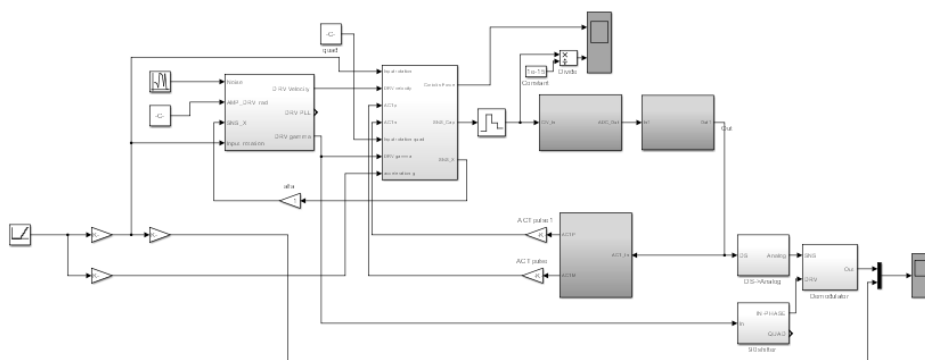


Рис.9 - Simulink модель гироскопа с расширенным диапазоном измерения. Моделирование показало (Рис.10), что при пропорциональном законе управления регуляторов первичных и вторичных колебаний K_{pe1} и K_{pe2} , с увеличением угловой скорости Ω_y и момента M_k , растет ошибка поддержания амплитуды (A_γ) первичных колебаний ε_γ (2), и угол отклонения ИМ α (3).

$$\varepsilon_\gamma = \frac{A_\gamma + K_{mex1}(2J_z \Omega_y \dot{\alpha} + k_{xy} \alpha + c_{xy} \dot{\alpha})}{(1 + K_{mex1} K_{pe1} K_{фанч})}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{M_k \cdot K_{mex2}}{(1 + K_{pe2} K_{mex2})}. \quad (3)$$

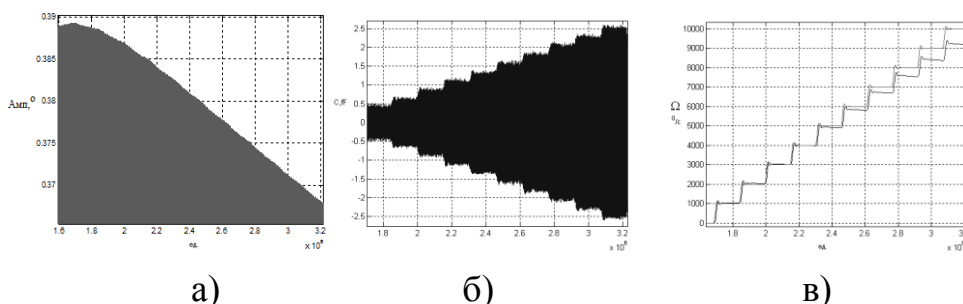


Рис.10 – Зависимости амплитуды первичных колебаний (а), угол отклонения ИМ (б), выходного сигнала и входной угловой скорости (в) от времени при изменении входной угловой скорости от 0 до 10000°/с.

Можно видеть, что с увеличением входной угловой скорости амплитуда первичных колебаний уменьшается, а ошибка стабилизации ИМ в канале вторичных колебаний возрастает. Одним из путей уменьшения ошибок

регулирования, является введение астатизма в контуре первичных колебаний, при котором ошибка поддержания заданной амплитуды стремится к нулю.

Моделирование работы ММГ при воздействии вибраций показало, эффективность предложенного способа управления по напряженности электрического поля.

В четвертой главе приведено описание экспериментального образца ММГ с расширенным диапазоном измерения и результаты экспериментальных

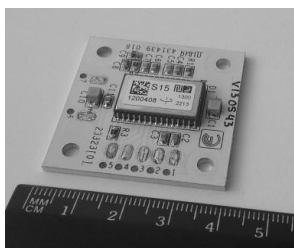


Рис.11 -

Экспериментальный образец ММГ

исследований. ММГ представляет собой печатную плату с установленными на ней микромеханический модулем и пассивными элементами (Рис.11). В корпусе модуля расположены ЧЭ и интегральная схема (ИС). Для расширения диапазона измерения ММГ увеличено напряжение на электродах датчика момента за счет перепрограммирования ИС, уменьшена амплитуда

первичных колебаний, изменена схема соединения электродов ЧЭ с ИС. Внесенные изменения позволили получить ММГ с увеличенным диапазоном измерения в 20 раз, при этом плотность мощности шума ухудшилась только в 2-3 раза, а нестабильность смещения нуля практически не изменилась и составила менее 10°/ч (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики ММГ

Параметр	Экспериментальный образец	Прототип ММГ
Диапазон измерений, °/с	±10000	±450
Нестабильность смещения нуля, °/ч	<10	<10
Спектральная плотность шума, °/с √Гц	0.03	0.005
Полоса пропускания (-3 дБ), Гц	100	100
Нелинейность МК, %	<1	<1
Амплитуда первичных колебаний, °	1	0,32
Напряжение управления, В	4,4	6

Для проведения экспериментальных исследований разработан стенд угловых перемещений, позволяющий задавать угловые скорости вращения в диапазоне 0-15000°/с. На Рис.12 приведены экспериментальные зависимости выходного сигнала ММГ от входной угловой скорости до и после компенсации.

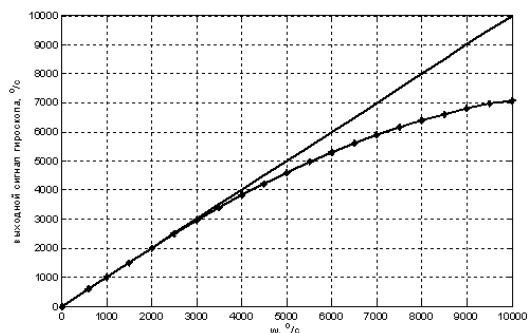


Рис.12 - Выходные сигналы гироскопа до и после компенсации

Можно видеть, что до $3000^\circ/\text{с}$ зависимость выходного сигнала ММГ практически линейна. С увеличением угловой скорости ошибка измерения возрастает, и при $10000^\circ/\text{с}$ достигает значения $3000^\circ/\text{с}$, что соответствует результатам моделирования. Компенсация по угловой скорости с помощью полинома 2-ого порядка позволила уменьшить нелинейность масштабного коэффициента до 1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана уточненная модель ММГ с расширенным диапазоном измерения, учитывающая влияние внешних воздействий и внутренних перекрестных связей на параметры чувствительного элемента

2. Разработаны методы повышения точности ММГ с расширенным диапазоном измерения, основанные на результатах аналитического анализа, моделирования и экспериментальных исследований образцов.

3. Разработаны структуры каналов измерения и управления положением инерционной массы ММГ компенсационного типа.

4. Разработан способ управления положением инерционной массы чувствительного элемента, заключающийся в управлении по напряженности электрического поля в зазоре между силовыми электродами и обеспечивающий нечувствительность масштабного коэффициента ММГ к изменению зазора.

2. Созданы экспериментальные образцы ММГ компенсационного типа с диапазоном измерения $\pm 10000^\circ/\text{с}$, нестабильностью смещения нуля менее $10^\circ/\text{ч}$, и нелинейностью масштабного коэффициента менее 1%. Определены пути дальнейшего улучшения его характеристик.

7. Разработан стенд с диапазоном задаваемых угловых скоростей до $15000^\circ/\text{с}$ и проведены экспериментальные исследования ММГ с расширенным диапазоном измерения.

8. По результатам проведенных исследований разработана лабораторная работа “Исследование характеристик микромеханического гироскопа с расширенным диапазоном измерения”, которая используется в учебном процессе ИТМО в читаемом на факультете КТиУ курсе “Инерциальные чувствительные элементы”

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы из перечня ВАК

1. Моисеев Н.В. Анализ систем управления вторичными колебаниями современных микромеханических гироскопов/Некрасов Я.А.// Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2012. - №7. - С.115-126.
2. Моисеев Н.В. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре/Люкшонков Р.Г.//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. - №4(74). - С.67-72.
3. Моисеев Н.В. Методика определения основных характеристик чувствительного элемента микромеханического гироскопа/Багаева С.В., Беляев Я.В.// Гироскопия и навигация. 2006. - №2(53). - С.92-96.

Публикации в других изданиях

1. Моисеев Н.В. Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы./ В.Г. Пешехонов, М.И. Евстифеев, Я.А. Некрасов, С.В. Павлова//Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. - №19. - С.108-114
2. Моисеев Н.В. Термостатирование микромеханических инерциальных датчиков./ Некрасов Я.А., Попова И.В., Семенов А.А. // Нано- и микросистемная техника, 2001, №5. С.22-24.
3. Моисеев Н.В. Влияние линейных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа ММГ-ЭП1./Некрасов Я.А. Беляев Я.В./ Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Остарякова Санкт-Петербург. 2014. - С.14-19.
4. Моисеев Н.В. Использование измерения параметров ЧЭ для формирования ММГ с автономной компенсацией./Некрасов Я.А., Люкшонков Р.Г.//В сборнике: XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов конференции. Под главной редакцией В.Г. Пешехонова. 2013. – С.138-139.
5. Моисеев Н.В. Температурная оптимизация навигационных приборов в средах MATLAB, LabVIEW, Cosmos./Некрасов Я.А., Беляев Я.В., Уткин Д.А.// Научно-Практический журнал Exponenta Pro. 2003.- №1.- С.54-59.
6. Моисеев Н.В. Температурные испытания ММГ-ЭПТРОН/Некрасов Я.А., Павлова С.В.//В сборнике: Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Остарякова Санкт-Петербург. 2012. - С.14-16.
7. Моисеев Н.В. Система управления вторичными колебаниями компенсационных микромеханических гироскопов. Анализ требований и методов их достижения./Некрасов Я.А.// В сборнике: Материалы XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Остарякова Санкт-Петербург. 2012, с.15-17.
8. Моисеев Н.В. Алгоритмы автономной компенсации влияний внешних воздействий на характеристики микромеханических гироскопов/Люкшонков Р.Г.// В сборнике: Навигация и управление движением. Материалы XIII конференции молодых ученых. 2011. - С.380-386.
9. Моисеев Н.В. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа/ Некрасов Я.А., Павлова С.В., Люкшонков Р.Г.// Сборник материалов XXI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон». 2014. - С.226-235.
10. Моисеев Н.В. Анализ влияния вибраций на работу канала вторичных колебаний компенсационного микромеханического гироскопа/Некрасов Я.А.// Рефераты докладов XXVII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Остарякова Санкт-Петербург. 2010. с.14-16.
11. Моисеев Н.В. Микромеханический гироскоп компенсационного типа на основе специализированной интегральной схемы./ В сборнике: Навигация и управление движением. Материалы докладов XI конференции молодых ученых. 2009. - С.392-399.
12. Moiseev N.V., Specification of some micromechanical gyro characteristics on basis of its design./Bagaeva S.V., Belyaev Y.V. 11th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad BOAC 2006).
13. Moiseev N.V. MemS Gyro vibration immunity and its Measurement with TIRA Shaker/ Pavlova S.V., Nekrasov Y.A.// В сборнике: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTS2 2015 - Proceedings Pisa, Italy. 2015. - pp.1763-1768.
14. Moiseev N.V. Sensitive Element Parameter Measurements In SITU For Forming Self-Compensated MMG/ Nekrasov Y.A., Lyukshonkov R.G.//В сборнике:20th Saint Petersburg International Systems, ICINS 2013 - Proceedings 2013. - pp.167-168.

15. Moiseev N.V. Improving The Performance of The Russian RR-type Mems Gyro/ Nekrasov Y.A., Pavlova S.V., Lyukshonkov R.G.// В сборнике:21th Saint Petersburg International Systems, ICINS 2014 - Proceedings 2014. - pp.285-293.

16. Moiseev N.V. Compensation of MEMS Gyroscope Drift Based on Amplitude Primary Oscillation Measurement/ Nekrasov Y.A., Lyukshonkov R.G., Belogurov A.A.// Inertial Sensors and Systems. Symposium Gyro Technology 2013.

17. Патент № 2 447 402 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Микромеханический гироскоп компенсационного типа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов; патентообладатели Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов. – №2010150707/28; заявл.07.12.2010; опубл. 10.04.2012 ; Бюл. № 10. – 9 с.

18. Патент № 2 471 149 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Микромеханический гироскоп компенсационного типа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов, Р.Г.Люкшонков; патентообладатели Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов, Р.Г.Люкшонков – №2010150708/28; заявл.07.12.2010; опубл. 27.12.2012 ; Бюл. № 36. – 10 с.

19. Патент № 2 393 428 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Микромеханический гироскоп компенсационного типа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – №2008143288/28; заявл.28.10.2008; опубл. 27.06.2010 ; Бюл. № 18. – 8 с.

20. Патент № 2 347 190 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Микромеханический гироскоп вибрационного типа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов, Я.В.Беляев; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – №2007128020/28; заявл.17.07.2007; опубл. 20.02.2009 ; Бюл. № 5. – 9 с.

21. Патент № 2 370 733 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Микромеханический гироскоп вибрационного типа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов, Я.В.Беляев; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – №2008129013/28; заявл.03.07.2008; опубл. 20.10.2009 ; Бюл. № 29. – 10 с.

22. Патент № 2 314 495 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Интерфейсное устройство для микромеханического гироскопа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – №2006115533/28; заявл.02.05.2006; опубл. 10.01.2008 ; Бюл. № 1. – 10 с.

23. Полезная модель № 143781 Российская Федерация, МПК G01C19/56. Интерфейс для микромеханического гироскопа / Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014г.

24. Заявка на способ № 2014154541(087104) Способ настройки фазы демодулятора выходного тракта гироскопа / Н.В.Моисеев, Я.А. Некрасов; завл. 30.12.2014, 2014г.