

На правах рукописи

**Беляев Яков Валерьевич**

**МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПОРОГА  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ГИРОСКОПА**

Специальность 05.13.01. – «Системный анализ, управление и обработка информации»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2010

Работа выполнена в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» –  
Государственный научный центр Российской Федерации

Научный руководитель	Некрасов Яков Анатольевич, кандидат технических наук
Официальные оппоненты	Лукьянов Дмитрий Павлович, доктор технических наук
	Пономарев Валерий Константинович, кандидат технических наук
Ведущая организация	ФГУП "НИИ прикладной механики им. акад. В.И. Кузнецова"

Защита состоится 30 декабря в 14 часов на заседании диссертационного совета ДС 411.007.01 при ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» по адресу: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Автореферат разослан 26 ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Колесов Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Развитие современной микроэлектроники привело к появлению нового класса инерциальных датчиков – микромеханических гироскопов, которые представляют собой интегрированные устройства с размерами в несколько миллиметров, объединяющие в себе механические и электронные компоненты. Микромеханический гироскоп (ММГ) является датчиком угловой скорости.

В настоящее время на рынке ММГ, который приближается к \$1 млрд., присутствуют только зарубежные компании Analog Devices, Melexis, VTI, Bosch, Murata, SDI, MEMSense, Inven Sense, ST Microelectronics с гироскопами потребительского класса точности стоимостью менее \$100 и имеющими плотность шума от  $0,02^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$  и выше. На рынке ММГ более высокой точности пока еще нет такой жесткой конкуренции. Исследования и разработки ММГ тактического класса точности (с плотностью шума ниже  $0,01^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$ ) сосредоточены в университетах и крупных фирмах, ориентированных на военное применение, таких как Honeywell (США), Thales (Франция). Поэтому значительная часть результатов этих работ отсутствует в открытой печати, а доступ к ряду диссертационных работ, например, в Университете Беркли (США), ограничен. Однако, как показывает анализ, проведенный фирмой Yole в 2010 г., прецизионные ММГ будут востребованы и на рынке гражданской продукции.

Снижение плотности шума до уровня  $0,005^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$  открывает возможность использования ММГ в системах и приборах курсоуказания, основанных на измерении скорости вращения Земли. Такие ММГ, обладающие узкой полосой и малым порогом чувствительности, могут быть использованы в робототехнике и системах управления движением.

В России инфраструктура по разработке и изготовлению микромеханических датчиков начала формироваться с 2001 года. Одними из первых к работам по созданию ММГ в России приступили

ЦНИИ “Электроприбор”, ЗАО “Гирооптика”, Раменское РПКБ, а так же ряд технических университетов: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Московский институт электронной техники, Тульский государственный университет и др. В стране создается сеть дизайн-центров по разработке широкого спектра систем на кристалле и специализированных заказных интегральных схем.

Исследования, проводимые в ЦНИИ “Электроприбор”, позволили создать ММГ с плотностью шума на уровне  $0,02-0,05^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ . На основании оценки его механического порога чувствительности, равного  $0,003^\circ/\text{с}$  при полосе пропускания 20 Гц, можно полагать, что еще не все потенциальные возможности разработанного чувствительного элемента (ЧЭ) реализованы. Наличие технологических погрешностей изготовления ЧЭ и зависимость его параметров от изменения внешних факторов негативно сказываются на точностных характеристиках ММГ. Поэтому решение ряда задач, направленных на понижение порога чувствительности одного из наиболее сложных типов микромеханических датчиков, является актуальным.

**Целью** настоящей диссертационной работы является разработка научно обоснованных методов снижения порога чувствительности микромеханического гироскопа за счет использования систем управления в контуре первичных и вторичных колебаний гироскопа, определение параметров ЧЭ как объекта управления, их апробация на образцах чувствительного элемента.

Применение на практике результатов работы позволит создать отечественный ММГ с порогом чувствительности  $0,01^\circ/\text{с}$  и ниже.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- исследовано современное состояние и выявлены наиболее эффективные способы уменьшения порога чувствительности ММГ с измерительным каналом разомкнутого типа;

- предложена методика расчета характеристик электродных структур ЧЭ методом конечных элементов с учетом краевых эффектов;
- проведены экспериментальные исследования электродной структуры по предложенным методикам для определения параметров ЧЭ и рабочих режимов;
- показана и экспериментально проверена возможность увеличения амплитуды первичных колебаний;
- рассмотрена структура системы управления ММГ с пониженным порогом чувствительности, включающая в себя системы возбуждения первичных колебаний, демпфирования, подавления квадратурной помехи и автоматической подстройки разности резонансных частот подвеса (АПРЧ);
- проведен анализ способов выделения сигнала, функционально зависящего от разности резонансных частот подвеса;
- для выделения сигнала, зависящего от разности резонансных частот, предложено использовать тестовое воздействие в виде модулированного квадратурного момента;
- для формирования тестового воздействия и выделения сигнала, зависящего от разности резонансных частот, предложена структура системы, моделирование которой проведено с помощью программ Simulink и Pspice;
- проведено математическое моделирование ММГ в режиме работы со сведенными резонансными частотами, оценена эффективность работы систем управления и их влияние на порог чувствительности ММГ;
- проведены полунатурные экспериментальные исследования с помощью модели систем управления в среде Simulink, работающей в реальном режиме времени совместно с ЧЭ, подтверждающие эффективность предложенных методов уменьшения порога чувствительности ММГ.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории управления, теоретической механики, теории электростатического поля,

электрических цепей, аналоговой схемотехники, математического анализа и компьютерного моделирования.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

1. Разработан метод снижения порога чувствительности ММГ за счет введения в контур управления вторичными колебаниями системы автоматической подстройки частот с использованием амплитудно-модулированного тестового квадратурного сигнала.

2. Предложен новый способ снижения порога чувствительности электроники ММГ с ЧЭ, изготавливаемым по технологии кремний на изоляторе, отличающийся наличием дополнительных электрических связей между элементами ЧЭ.

3. На основе расчетов методом конечных элементов предложена методика определения уточненных характеристик емкостных датчиков угла и момента, отличающаяся возможностью учета краевых эффектов и конструктивных особенностей электродной структуры.

4. Обоснована возможность увеличения амплитуды первичных колебаний ПМ ММГ RR-типа на основе анализа уточненных характеристик емкостных датчиков угла и момента и экспериментальных исследований работы системы возбуждения первичных колебаний.

5. Разработаны новые методики определения рабочего режима и параметров ЧЭ при резонансной настройке и выбранной амплитуде первичных колебаний, основанные на использовании явления электростатического залипания и квадратурной помехи в качестве тестового сигнала.

7. Получена уточненная математическая модель одномассового ММГ RR-типа, отличающаяся наличием дополнительных связей, отражающих работу автоматической системы подстройки резонансных частот.

**Практическая ценность:**

1. Разработан набор макросов в среде ANSYS для расчета методом конечных элементов основных характеристик электродных структур ЧЭ

ММГ RR-типа, который позволяет определить для любой конфигурации электродов значение емкостей, сил, моментов и отрицательных жесткостей в зависимости от углов поворота подвижной массы и приложенных напряжений.

2. Предложен метод формирования тестового воздействия, позволяющий при незначительной доработки существующих систем подавления квадратурной помехи выделять сигнал, пропорциональный разности резонансных частот подвеса.

3. Разработаны структурные схемы и схемные решения, позволяющие реализовать предложенные методы формирования тестового воздействия и автоматическую подстройку резонансных частот в системе управления ММГ.

4. Показано, что использование системы автоматической подстройки резонансных частот позволяет существенно уменьшить порог чувствительности ММГ за счет увеличения его механического коэффициента усиления.

5. Показана возможность реализации ММГ разомкнутого типа с добротностью контура вторичных колебаний более 100 с разностью частот близкой к нулю.

6. Предложенные методики, основанные на использовании явления электростатического залипания и квадратурной помехи в качестве тестового сигнала, позволяют за время менее 30 с. определять параметры ЧЭ, рабочие напряжения на электродах, необходимые для резонансной настройки, а так же проводить отбраковку ЧЭ.

7. Предложенная уточненная модель ММГ с системами управления может быть использована для исследования параметров и характеристик ЧЭ и ММГ.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались и докладывались: на международной, всероссийской и VII, VIII, IX, XI, XII конференциях молодых ученых (ЦНИИ “Электроприбор”, СПб, 2005-2010г.);

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, среди которых 4 патента, 2 статьи в журналах из перечня ВАК.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 129 страниц, в тексте имеется 84 рисунка, 7 таблиц.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методы снижения порога чувствительности ММГ RR-типа
2. Научно-техническое обоснование увеличения амплитуды первичных колебаний.
3. Методика определения рабочего режима и параметров чувствительного элемента ММГ.
4. Уточненная математическая модель одномассового ММГ RR-типа.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту. Основной материал диссертации распределен по четырем главам.

**В первой главе** рассмотрена конструкция ЧЭ ММГ RR-типа, состоящая из электродов и подвижной массы (ПМ), закрепленной с помощью торсионов на основании (рис.1). Электроды, за счет которых осуществляется измерение углов поворота ПМ, формируют емкостные датчики угла (ДУ). Электроды, за счет которых формируются электростатические моменты, действующие на ПМ, образуют емкостные датчики момента (ДМ). ДМ и ДУ являются элементами систем управления ММГ, характеристики которых необходимо определять с учетом нелинейностей, сложной конфигурации электродов и угловых перемещений.

Уравнения динамики ПМ в матричном виде с учетом технологических погрешностей и наличия внешних воздействий имеют вид:



$$\begin{bmatrix} J_z & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_z & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & d_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_z & k_{zx} \\ k_{xz} & k_x - k_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_z \\ M_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & 2J_x\Omega \\ -2J_z\Omega & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $J_z, J_x, d_z, d_x, k_z, k_x$  – моменты инерции, коэффициенты демпфирования и механических жесткостей подвеса по оси первичных и вторичных колебаний соответственно;  $k_{xz}, k_{zx}$  – коэффициенты перекрестных жесткостей;  $k_\gamma$  – электрическая жесткость;  $\alpha, \gamma$  – углы поворота ПМ вокруг оси первичных и вторичных колебаний соответственно,  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость,  $M_z, M_x$  – моменты, действующие на ПМ по оси первичных и вторичных колебаний соответственно.

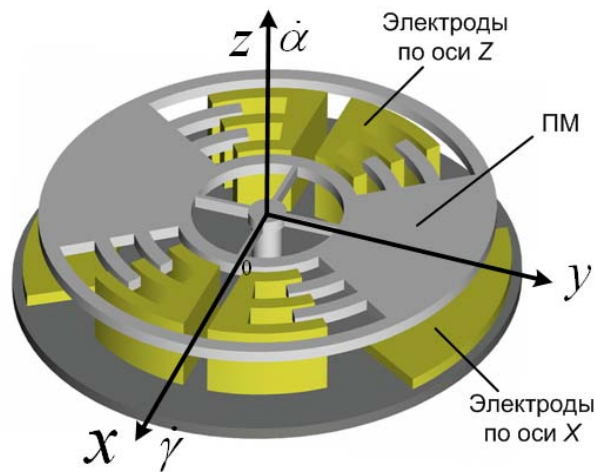


Рисунок 1 – Конструкция ЧЭ ММГ

Из выражения (1) следует, ЧЭ ММГ в качестве объекта управления может быть представлен в виде двух последовательно соединенных резонансных звеньев.

Частота собственных колебаний резонансного звена по оси вторичных колебаний зависит от разности механической жесткости  $k_x$  и электрической жесткости  $k_\gamma$ :

$$\omega_2 = \sqrt{(k_x - k_\gamma(U))/J_x} = \sqrt{\left(k_x - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 C(\gamma)}{\partial \gamma^2} U^2\right) / J_x}, \quad (2)$$

где  $C(\gamma)$  – зависимость емкости от угла поворота ПМ, исследуемая в работе;  $U$  – напряжение, приложенное к соответствующему электроду.

Принцип действия ММГ заключается в измерении перемещений ПМ вокруг оси  $x$  на частоте первичных колебаний, вызванных действием момента Кориолиса, с механическим коэффициентом усиления (МКУ)  $K_M$ , определяемым из выражения:

$$K_M(\omega_2) = \left( \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}\right)^2 + \frac{\omega_2^2}{Q_{ЭКВ}^2 \omega_1^2}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – собственные резонансные частоты подвеса по осям  $z$  и  $x$ ,  $Q_{ЭКВ}$  – эквивалентная добротность вторичного контура. Для случая, когда  $\omega_2 = \omega_1$ , значение  $K_M$  достигает максимума, равного  $Q_{ЭКВ}$ .

Одной из точностных характеристик ММГ является порог чувствительности  $\Omega_{\min}$ , определяемый двумя некоррелированными составляющими: порогом чувствительности механики  $\Omega_{\min M}$  и порогом чувствительности электроники  $\Omega_{\min Э}$ :

$$\Omega_{\min} = \sqrt{\Omega_{\min M}^2 + \Omega_{\min Э}^2}. \quad (4)$$

Значения  $\Omega_{\min M}$  и  $\Omega_{\min Э}$  могут быть определены из выражений:

$$\Omega_{\min M} = \frac{1}{\alpha K_M} \sqrt{\frac{k_B T \omega_2}{2 J_\alpha \omega_1}}, \quad (5)$$

$$\Omega_{\min Э} = \frac{d_0^2 \alpha_1 C_{ПАР} U_{Ш}}{\alpha U_{ПИТ} K_M} \sqrt{f_{П}}, \quad (6)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура ПМ;  $f_{П}$  – полоса пропускания входных каскадов электроники ММГ;  $d_0$  – зазор между электродами;  $U_{ПИТ}$  – напряжение питания;  $U_{Ш}$  – уровень шума в электронных блоках;  $C_{ПАР}$  – паразитная ёмкость.

Из анализа выражений (5) и (6) следует, что для уменьшения порога чувствительности необходимо увеличивать амплитуду первичных колебаний, величину МКУ, уменьшать паразитные связи в электродной структуре и уровень шума в электронных блоках.

На основе анализа литературных источников сформулированы основные задачи, решение которых обеспечит возможность снижения порога чувствительности в исследуемом ММГ на порядок. Среди основных задач можно выделить: анализ электродной структуры ММГ с целью получения их характеристик, уменьшение паразитных связей, обеспечение требуемых режимов работы датчика за счет использования систем управления. Определена структура системы управления ММГ с пониженным порогом чувствительности, в состав которой должны входить системы демпфирования вторичных колебаний, автоматического подавления квадратурной помехи (основной погрешности ММГ) и автоматической подстройки разности резонансных частот подвеса.

Во второй главе представлены результаты анализа работы ДУ и ДМ исследуемого ЧЭ. На основе использования конечноэлементного анализа в среде Ansys разработана методика определения их основных характеристик для электродов сложной конфигурации с учетом краевых эффектов.

Рассчитанные по предложенной методике зависимости емкости, электростатического момента и электрической жесткости от угла поворота ПМ для гребенчатой электродной структуры с высотой зуба 60 мкм и толщиной 14 мкм приведены на рисунке 2.

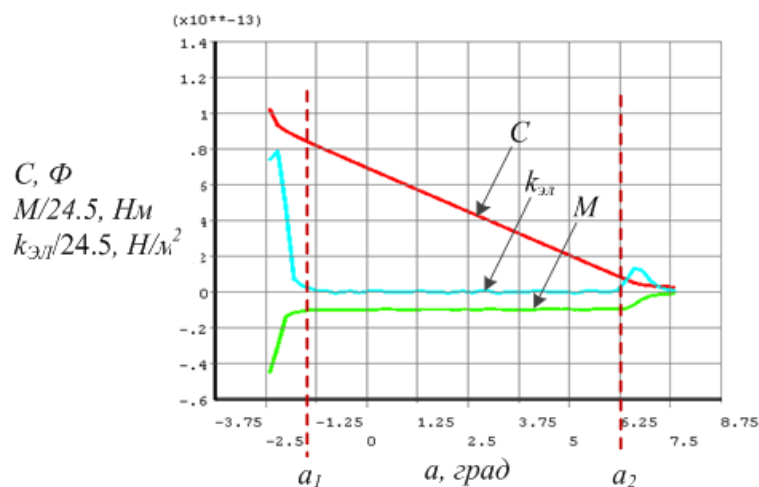


Рисунок 2 - Рассчитанные зависимости  $C(\alpha)$ ,  $M(\alpha)$ ,  $k_э(\alpha)$

Определен диапазон изменения угла поворота ПМ, составляющий от  $-1,3^\circ$  до  $6,25^\circ$ , при котором обеспечивается линейность рассчитанных зависимостей. С учетом конструктивных особенностей электродной структуры исследуемого ММГ сделан вывод о возможности увеличения амплитуды первичных колебаний с  $1,5^\circ$  до  $3^\circ$  за счет удаления стопоров, ограничивающих движение ПМ.

Результаты экспериментальных исследований двадцати образцов ЧЭ по предложенной методике подтвердили работоспособность ММГ с увеличенной амплитудой первичных колебаний до  $3^\circ$ . Анализ этих результатов показал, что искажение формы измеряемых сигналов о перемещении ПМ определяется нелинейностью характеристик емкостного датчика из-за наличия краевых эффектов, а влияние нелинейностей сил упругости в торсионах подвеса несущественно.

Увеличение амплитуды первичных колебаний в два раза позволило уменьшить порог чувствительности ММГ в два раза.

На основе анализа электродной структуры по оси вторичных колебаний определено влияние электростатического залипания на допустимое значение МКУ:

$$K_M \leq \frac{\gamma_{MAX} - \gamma_3}{\sqrt{\gamma_\Omega^2 + \gamma_{KB}^2}}, \quad (7)$$

где  $\gamma_{MAX}$  – максимальный угол поворота ПМ (определяется зазором между ПМ и электродами);  $\gamma_3$  – угол поворота, соответствующий электростатическому залипанию;  $\gamma_\Omega$  – угол поворота ПМ, вызванный действием момента Кориолиса;  $\gamma_{KB}$  – угол поворота ПМ, обусловленный действием квадратурного момента.

Угол  $\gamma_3$  определяется из равенства моментов механической и электростатической сил на основе выражения:

$$\gamma_3 = \frac{U_3}{k_{ДУ}k_{ПЕН}} = \frac{1}{k_{ДУ}k_{ПЕН}} \sqrt{2k_x y \left( \frac{\partial C}{\partial y} \right)^{-1}}, \quad (8)$$

где  $k_{ДУ}$ ,  $k_{ПЕН}$  – коэффициенты передачи ДУ и преобразователя “емкость-напряжение” (ПЕН).

Значение напряжения  $U_3$ , соответствующее электростатическому залипанию, также может быть определено из зависимости, полученной экспериментально путем измерения напряжения на выходе ПЕН по оси вторичных колебаний при подаче на ДМ линейно меняющегося напряжения управления.

Полученная таким образом экспериментальная зависимость для нескольких образцов ЧЭ приведена на рисунке 3.

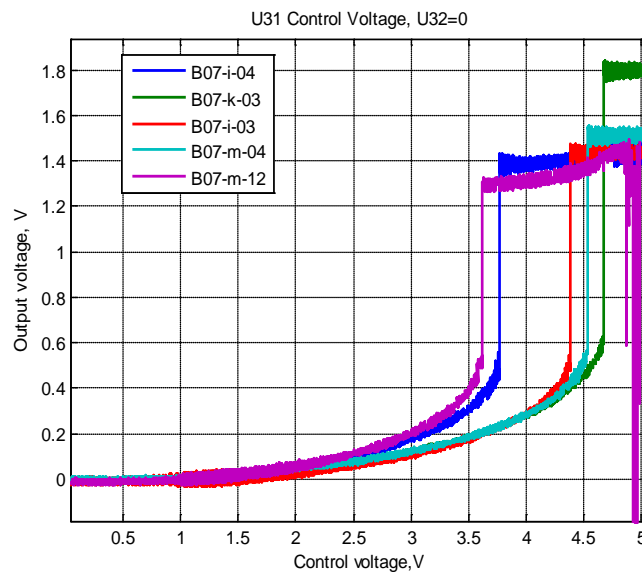


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость напряжения  $U_{ПЕН}$  от напряжения управления

Скачкообразное изменение напряжения  $U_{ПЕН}$  на рисунке 3 соответствует равенству моментов механической и электростатической сил. Величина напряжения  $U_3$  определяет максимально допустимое напряжение, прикладываемое к ДМ для формирования управляющих моментов.

На основе анализа явления электростатического залипания предложена методика оценки технологических погрешностей изготовления ЧЭ ММГ: перекосов ПМ и разброса величин зазоров от образца к образцу, что может быть использовано для отбраковки ЧЭ.

В работе рассмотрена эквивалентная электрическая схема электродной структуры ЧЭ с учетом всех паразитных связей, анализ

которой позволил предложить способы снижения емкостных паразитных связей  $C_{ПАР}$  в 2-4 раза за счет увеличения толщины слоя оксида кремния в 4 раза и введения дополнительного соединения основания и крышки кристалла ЧЭ с общим выводом источника питания. Предложенное решение внедрено в новой партии ЧЭ и позволило уменьшить порог чувствительности электроники в 4-8 раз.

**В третьей главе** проанализировано влияние формы напряжения возбуждения первичных колебаний на выходной сигнал ПЕН вторичного контура. Фрагменты спектра сигнала на выходе ПЕН вторичного контура при релейном и линейном управлении приведены на рисунках 4а и 4б, из сравнения которых видно, что для исключения влияния системы возбуждения на выходной сигнал требуется использовать линейный закон управления амплитудой первичных колебаний.

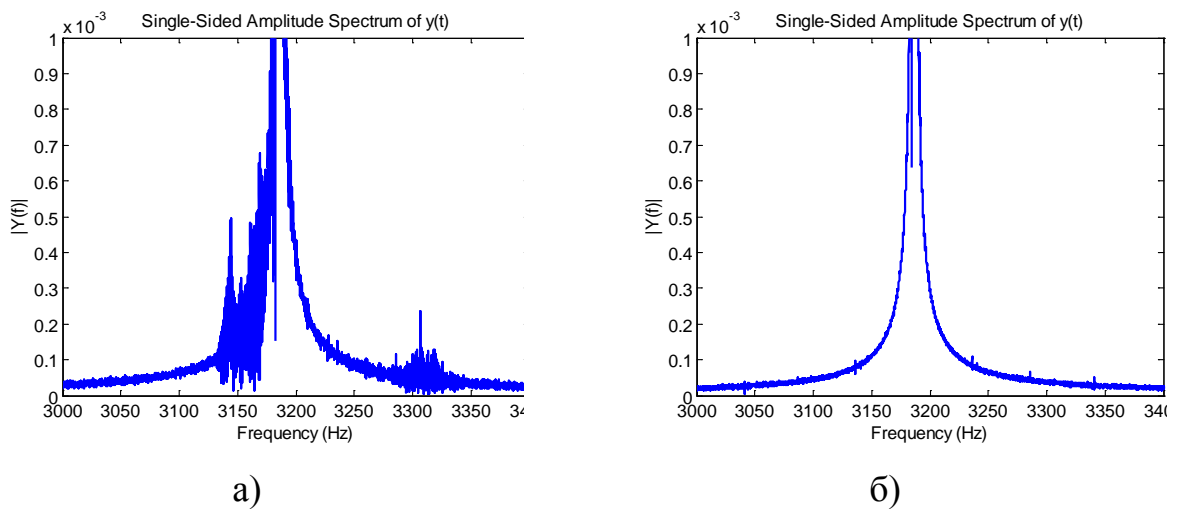


Рисунок 4 - Фрагмент спектра сигнала  $U_{ПЕН2}$  для системы с:  
а) релейным и б) линейным управлением

На основе этого предложено использовать систему возбуждения первичных колебаний с изменяемой структурой, сочетающую в себе преимущества релейных и линейных систем (рис.5).

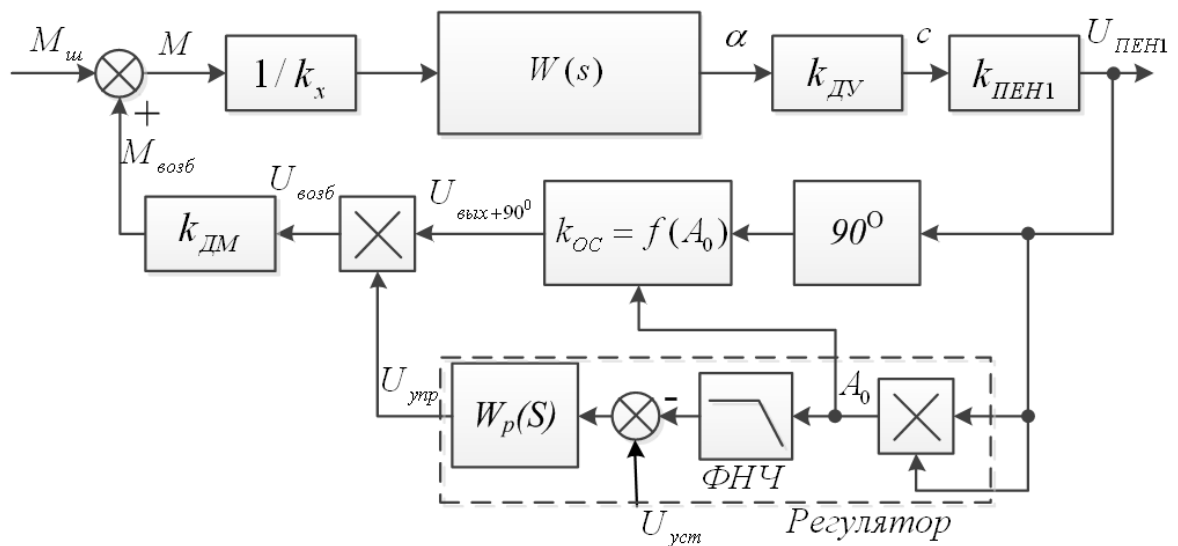


Рисунок 5 - Блок-схема ММГ с системой возбуждения с изменяемой структурой

Сформулированы основные требования к такой системе:

1. Время переходного процесса (ПП) возбуждения колебаний ПМ до заданной амплитуды не должно превышать 1,5 с.
2. Величина перерегулирования ПП должна составлять не более 1% от установившегося значения.
3. Должен быть обеспечен линейный закон управления амплитудой первичных колебаний в установившемся режиме работы.

Для системы, представленной на рисунке 5, напряжение возбуждения, подаваемое на ДМ ЧЭ, должно иметь следующий вид:

$$U_{возб} = \begin{cases} U_{нмт}, & \text{если } \dot{\alpha} > 0 \\ -U_{нмт}, & \text{если } \dot{\alpha} < 0 \end{cases}, \text{ если } A_0 < \theta U_{нмт}, \quad (9)$$

$$k_{ОС} k_{ДЧ} k_{ПЕН1} A_0 \sin(\omega_1 t + 90^0) U_{упр}, \text{ если } A_0 \geq \theta U_{нмт},$$

где  $\theta$  - коэффициент, определяемый быстродействием системы подавления квадратурной помехи.

Оптимизация регулятора системы возбуждения осуществлялась в среде Simulink по заданным требованиям к ПП возбуждения первичных колебаний. Работоспособность этой системы с требуемыми характеристиками подтверждена экспериментально. Использование

предложенной структуры системы возбуждения первичных колебаний позволило существенно уменьшить уровень шума на выходе ПЕН по оси вторичных колебаний.

Обеспечение заданной полосы пропускания ЧЭ и уменьшение добротности вторичного контура осуществляется за счет введения корректирующего звена в систему демпфирования вторичных колебаний. В работе определена передаточная функция (ПФ) корректирующего звена системы демпфирования и проанализировано влияние его параметров на частотные характеристики ММГ с помощью моделирования в среде PSpice с учетом точных моделей дискретных элементов.

Анализ частотных характеристик замкнутой системы демпфирования показал, что при выборе постоянных времени корректирующего звена, близких к постоянной времени объекта управления, имеет место изменение резонансной частоты вторичных колебаний.

Величина квадратурной составляющей выходного сигнала в исследуемом ММГ может превышать полезный сигнал в  $10^5$  раз. Для уменьшения этой составляющей используется система подавления квадратурной помехи. Особенностью работы этой системы для ММГ с пониженным порогом чувствительности является необходимость стабилизировать амплитуду помехи на заданном уровне с целью дальнейшего ее использования в системе АПРЧ.

Предложена методика определения параметров ЧЭ и рабочего режима при резонансной настройке и выбранной амплитуде первичных колебаний с использованием остаточной квадратурной помехи в качестве тестового сигнала. Данная методика позволяет за время менее 30 сек определить:

1. Зависимость значения эквивалентной добротности вторичного контура от коэффициента передачи корректирующего звена системы демпфирования.

2. Амплитуду квадратурной помехи.



3. Фазовые сдвиги сигнала на выходе ПЕН по оси вторичных колебаний, вносимые корректирующим звеном системы демпфирования и электроникой.

4. Номинальное значение разности резонансных частот по формуле:

$$\Delta\omega = \sqrt{\left(k_x - \frac{\partial^2 C(\gamma)}{\partial \gamma^2} U_{yn}^2\right) / J_x} - \omega_1. \quad (10)$$

5. Максимальное значение эквивалентной добротности вторичного контура, при котором возможна автоматическая подстройка разности частот.

6. Значение управляющих напряжений для различных режимов работы ММГ.

**В четвертой главе** проведен анализ способов выделения сигнала, функционально зависящего от разности резонансных частот подвеса. Предложено в качестве тестового воздействия использовать амплитудно-модулированный квадратурный сигнал. Показано, что зависимость выходного напряжения, пропорционального разности частот, имеет монотонный характер и определяется выражением:

$$U_{\Delta\omega}(t) = \frac{K_M k_{ДУ} k_{ПЕН}}{4} A_{КВ} A_T, \quad (11)$$

где  $A_{КВ}$ ,  $A_T$  – амплитуды тестового и квадратурного сигналов соответственно.

Для формирования тестового воздействия с амплитудой  $A_T$  предложены методы формирования момента для двух типов электродных структур.

Определена структура системы АПРЧ (рис.6) и выполнено моделирование в среде PSpice подсистемы формирования и выделения тестового воздействия, с помощью которого подтверждена возможность выделения сигнала, пропорционального разности частот.

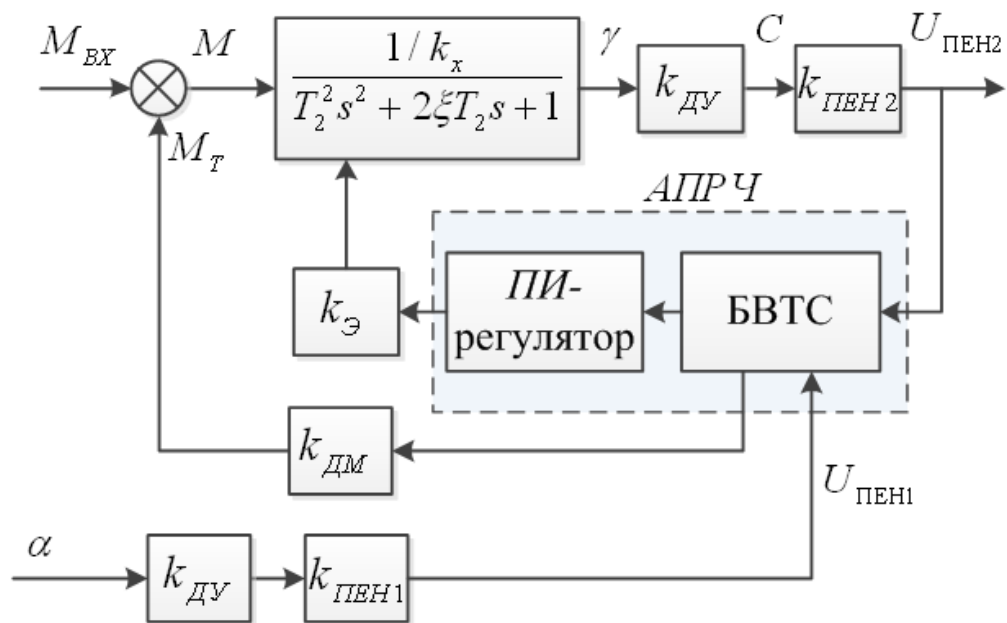


Рисунок 6 – Блок-схема системы АПРЧ  
 БВТС – блок выделения тестового сигнала

Анализ нелинейной системы АПРЧ, в состав которой входит несколько умножителей, проводился на основе методов теории управления для линейных систем за счет осуществления перехода к эквивалентной ПФ по огибающей. Выражение ПФ определено по виду переходного процесса реакции системы на ступенчатое изменение напряжения:

$$W_{\mathcal{E}}(s) = \frac{Q_{\mathcal{E}}^2 k_{\text{ДМ}} k_{\text{ДУ}} k_{\text{ПЕН}} k_{\Phi 1} k_{\Phi 2}}{T_{\mathcal{E}}^2 s + 2\xi_{\mathcal{E}} T_{\mathcal{E}} s + 1} e^{-s\tau}, \quad (12)$$

где  $T_{\mathcal{E}}$  – постоянная времени эквивалентной ПФ,  $\tau$  – время запаздывания.

Для синтеза регулятора и оценки устойчивости использовался метод анализа логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) разомкнутой системы, вид которых показан на рисунке 7.

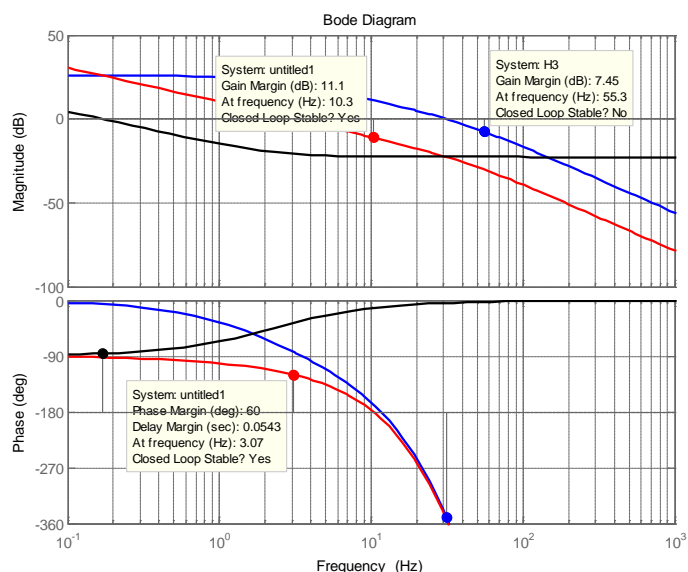


Рисунок 7 – ЛЧХ разомкнутой системы

Анализ ЛЧХ, представленных на рисунке 7, позволяет сделать вывод о том, что замкнутая система АПРЧ устойчива с запасом устойчивости по амплитуде и фазе 10 дБ и 60° соответственно.

Получена уточненная математическая модель ММГ RR-типа с дополнительными связями системы АПРЧ:

$$\begin{cases} J_z \ddot{\alpha} + d_z \dot{\alpha} + k_{zv} \gamma + k_z \alpha = M_z + 2J_z \Omega \dot{\gamma}, \\ J_x \ddot{\gamma} + d_x \dot{\gamma} + k_x \gamma = -k_{xz} \alpha - 2J_z \Omega \dot{\alpha} - \sum_{i=1}^m (k_{xi}(U_i) \gamma) + k_{kb} \alpha + k_d \dot{\gamma} + A_T \sin(\omega_T t) \alpha, \\ k_{xi}(U_i) = \frac{\partial^2 C_i(\gamma)}{\partial \gamma^2} U_i^2, \end{cases} \quad (13)$$

где  $A_T$  и  $\omega_T$  – амплитуда и частота тестового воздействия;  $U_i$  – напряжения управления на  $i$ -ом электроде;  $m$  – количество используемых электродов для управления положением ПМ по оси вторичных колебаний;  $k_{kb}$  – коэффициент, определяемый системой подавления квадратурной помехи;  $k_d$  – коэффициент, определяемый системой демпфирования.

Блок-схема канала вторичных колебаний с дополнительными связями приведена на рисунке 8.

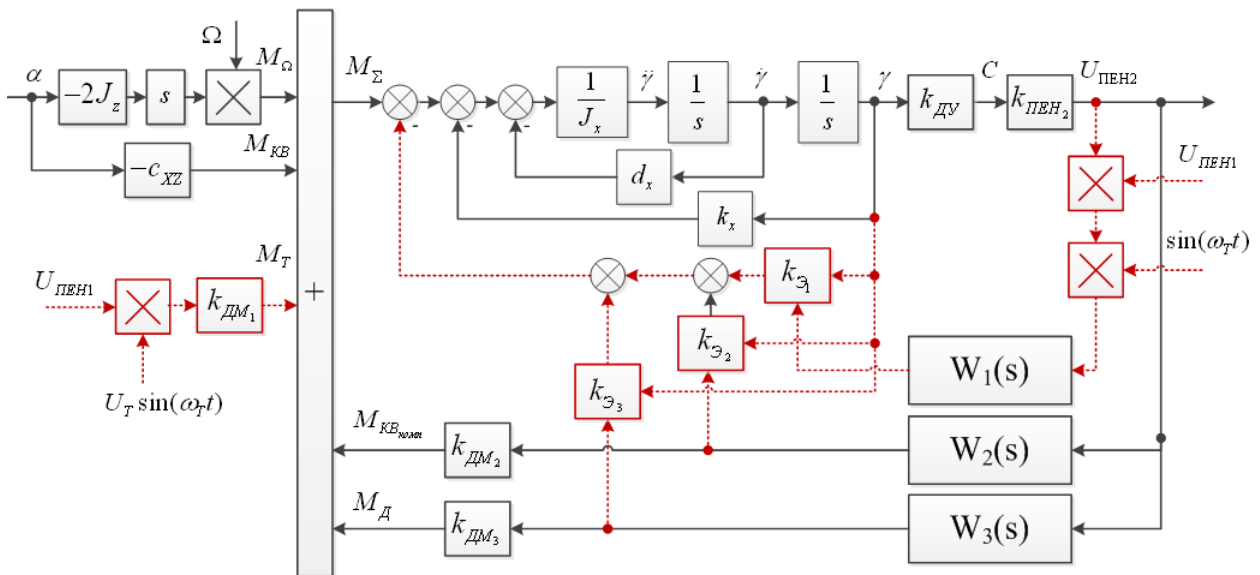


Рисунок 8 - Блок-схема канала вторичных колебаний  
 $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$ ,  $W_3(s)$  – ПФ корректирующего звена систем АПРЧ,  
 подавления квадратурной помехи и демпфирования вторичных колебаний

На основании уточненной математической модели создана полная модель ММГ в среде Simulink, состоящая из системы возбуждения первичных колебаний, системы демпфирования вторичных колебаний, системы управления амплитудой квадратурной помехи, системы АПРЧ и системы выделения полезного сигнала.

С помощью математического моделирования ММГ с системами управления показана возможность уменьшения порога чувствительности на порядок и более за счет введения в контур управления вторичными колебаниями предложенной системы автоматической подстройки частот.

Проведены полунатурные экспериментальные исследования прототипа ММГ с реализованными системами управления в среде Simulink, работающими в режиме реального времени, подтверждающие эффективность предложенных методов снижения порога чувствительности ММГ.

Реакция ММГ с системой АПРЧ с эквивалентной добротностью 300 на изменение угловой скорости основания с  $0^\circ/\text{с}$  до  $0,05^\circ/\text{с}$  с шагом  $0,01^\circ/\text{с}$  приведена на рисунке 9.

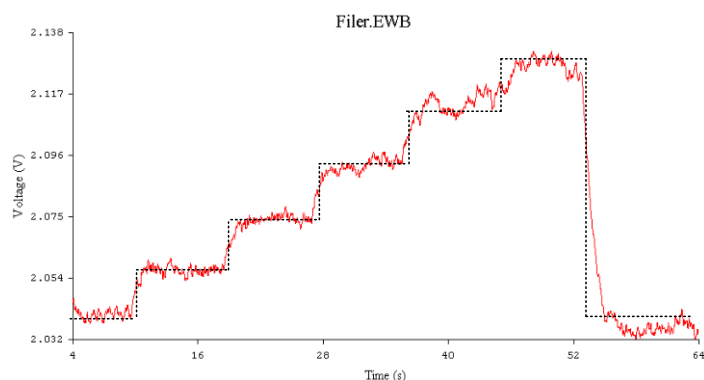


Рисунок 9 – Реакция ММГ на изменение угловой скорости

Характеристики созданного в ЦНИИ “Электроприбор” датчика “ММГ1” приведены в таблице 1 (столбец 1). Оценка потенциальных значений точностных характеристик “ММГ1”, полученная из предположения использования в датчике комплекса предложенных решений по снижению порога чувствительности, представлена в таблице 1 (столбец 2). Характеристики ММГ, полученные из анализа экспериментальных результатов прототипа ММГ, приведены в таблице 1 (столбец 3).

Таблица 1 – Характеристики ММГ

Характеристика	ММГ1 $K_M=35$	ММГ1 $K_M=140$	Прототип ММГ $K_M=300$
Порог чувствительности механический $\Omega_{\min M}, [^\circ/c]$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,45 \cdot 10^{-4}$
Порог чувствительности электроники $\Omega_{\min Э}, [^\circ/c]$	$50 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Плотность шума, $[^\circ/c/\sqrt{Гц}]$	$50 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Случайное блуждание угла, $[^\circ/\sqrt{ч}]$	4,1	0,25	0,18
Масштабный коэффициент, $[B/^\circ/c]$	0,01	0,256	2
Динамический диапазон, $[^\circ/c]$	$\pm 100$	$\pm 8.25$	$\pm 2,5$
Полоса пропускания, $[Гц]$	40	10	3

Анализ данных, представленных в таблице 1, подтвердил возможность обеспечения снижения порога чувствительности на порядок и более за счет использования в ММГ предложенных решений.

### **Заключение**

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод снижения порога чувствительности ММГ RR-типа за счет введения в контур управления вторичными колебаниями системы автоматической подстройки частот, что позволяет увеличением механического коэффициента усиления понизить порог чувствительности на порядок.

2. Предложены способы уменьшения паразитных связей в ЧЭ, изготавливаемом по технологии кремний на изоляторе, что позволяет понизить порог чувствительности электроники ММГ в 4-8 раз.

3. На основе расчетов методом конечных элементов предложена методика определения уточненных характеристик емкостных датчиков угла и момента ЧЭ.

4. Обоснована возможность увеличения амплитуды первичных колебаний ПМ, что позволяет понизить порог чувствительности ММГ в 2 раза.

5. Предложена новая структура системы управления одномассовым ММГ, включающая в себя системы автоматической подстройки разности частот, демпфирования и подавления квадратурной помехи в контуре вторичных колебаний.

6. Разработаны методики, позволяющие за время менее 30 сек определить основные параметры ЧЭ и рабочие режимы ММГ при резонансной настройке.

7. Получена уточненная математическая модель одномассового ММГ RR-типа, отражающая работу системы автоматической подстройки резонансных частот.

### **Опубликованные работы по теме диссертации**

1. Беляев Я.В., Некрасов Я.А. и др. Электрические схемы емкостных датчиков микромеханического гироскопа RR-типа // Научное приборостроение, том 8, №1, 2008г. – С.91-97.

2. Беляев Я.В., Некрасов Я.А. и др. Подавление квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR-типа с помощью электродов, расположенных над зубцовой зоной / Гироскопия и навигация №1(60), СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2008г. – С.82-90.

3. Belyaev J.V., Nekrasov J.A., Belyaeva T.A. Quadrature Error Reducing Methods in an RR-type Micromechanical Gyroscope // Symposium Gyro Technology 2007, Karlsruhe, Germany. - pp.2.1-2.10.

4. Беляев Я.В. Повышение точности микромеханического гироскопа за счет сведения резонансных частот // Навигация и управление движением. - Материалы XI конференции молодых ученых. - СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009.- С.343-350.

5. Беляев Я.В., Андреева Т.А. Исследование влияния квадратурной помехи на работу микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением. - Материалы VIII конференции молодых ученых. - СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007.- С. 97-100.

6. Беляев Я.В., Багаева С.В., Моисеев Н.В. Методики определения основных характеристик чувствительного элемента микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением. - Материалы VIII конференции молодых ученых. - СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007.- С. 112-117.

7. Беляев Я.В., Некрасов Я.А. Микромеханический гироскоп // Патент № 2282 151 от 10.03.2005г.

8. Беляев Я.В., Некрасов Я.А. Способ измерения зазора между электродами и подвижной массой микромеханического устройства и устройство для его реализации // Патент № 2338997 от 13.07.2006г.

9. Беляев Я.В., Некрасов Я.А., Моисеев Н.В. Микромеханический гироскоп // Патент № 2347190 от 17.07.2007г.

10. Беляев Я.В., Некрасов Я.А., Моисеев Н.В. Микромеханический гироскоп вибрационного типа // Патент RU 2370733 03.07.2008г.