

На правах рукописи

Беляева Татьяна Александровна

**МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ КВАДРАТУРНОЙ
ПОМЕХИ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ
RR-ТИПА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2009

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

Научный руководитель	Некрасов Яков Анатольевич, кандидат технических наук
Официальные оппоненты	Ландау Борис Ефимович, доктор технических наук Шевцова Екатерина Викторовна, кандидат технических наук
Ведущая организация	ОАО «Авангард»

Защита состоится 25 декабря 2009 года 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 24 ноября 2009 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 (ММГ). ММГ представляет собой микроэлектромеханическую систему – интегрированное устройство с размерами в диапазоне от нескольких микрометров до миллиметров, которое объединяет в себе механические и электронные компоненты. ММГ является датчиком угловой скорости. Зарубежной промышленностью выпускаются ММГ тактического класса точности с уровнем шума $0,01^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ и уже созданы прототипы ММГ навигационного класса точности с уровнем шума ниже $0,001^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$. Гироскопы этого типа обладают целым рядом достоинств: малые габариты и масса, во много раз меньшие, чем у любого другого гироскопа, низкое энергопотребление и стоимость датчиков, высокая надежность и способность работать в условиях вибрации и перегрузки. Сочетание уникальных показателей сразу по многим параметрам позволяет данным приборам служить средством как для улучшения характеристик и возможностей имеющихся разработок, так и для воплощения новых, конструкторских идей. Сигнал, получаемый с гироскопа, может быть использован для повышения точности и надежности систем позиционирования и навигации, для стабилизации подвижных систем автомобилей, самолетов, роботов, антенн и промышленного оборудования, для ввода данных в портативные компьютеры и во многих других областях. Анализ рынка микромеханических систем показывает устойчивый рост производства и продаж микромеханических инерциальных датчиков.

Метрологические характеристики ММГ во многом зависят от особенностей конструкции и качества изготовления его чувствительного элемента (ЧЭ), который включает в себя подвижную массу (ПМ), закрепленную на основании с помощью упругого подвеса, и систему электродов для измерения и управления положением ПМ. Управление ПМ и выделение сигнала, пропорционального измеряемой угловой скорости осуществляется в ММГ с помощью электроники. Она обеспечивает возбуждение колебаний ПМ вокруг первичной оси подвеса, измерение обусловленных действием ускорения Кориолиса колебаний ПМ вокруг вторичной (ортогональной к первичной) оси, а

так же синхронное детектирование сигнала, пропорционального вторичным колебаниям. Однако в ММГ на синхронный детектор поступает не только сигнал, обусловленный ускорением Кориолиса, но и ортогональный к нему, называемый квадратурной помехой. В ММГ квадратурная помеха может на 5 и более порядков превышать величину его порога чувствительности. Поэтому на протяжении последнего десятилетия одной из основных проблем, препятствующей улучшению точностных характеристик ММГ, в мировой практике является подавление квадратурной помехи, о чем свидетельствуют публикации ведущих специалистов в этой области (Geen J., Geiger W., Clark W., Shkel A.). Актуальность задачи радикального уменьшения квадратурной помехи в ММГ не снижается, а наоборот возрастает, поскольку требования к точности ММГ растут

Россия до 2000г. практически не участвовала не только в производстве, но и в разработке ММГ. Одними из первых к работам по созданию ММГ в России приступили ЦНИИ “Электроприбор”, ЗАО “Гирооптика”, Раменское РПКБ, а так же ряд технических университетов СПб ГУАП, МИЭТ, ТРТУ и др. В основу конструкции ММГ, разработанного под руководством проф. Л.П.Несенюка в ЦНИИ “Электроприбор”, положена схема RR-типа. Этой конструкции так же присуща квадратурная помеха. Решение проблемы подавления квадратурной помехи приведет к увеличению процента выхода годных ЧЭ и повышению класса точности гироскопа.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка научно обоснованных методов измерения и компенсации квадратурной помехи и их апробация на серии изготовленных образцов чувствительного элемента.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- исследовано современное состояние и выявлено наиболее перспективное направление в разработке методов подавления квадратурной помехи;
- показано, что основным условием для уменьшения порога чувствительности ММГ является снижение в нем уровня квадратурной помехи;

- на основе математического моделирования и экспериментальной проверки проведены исследования влияния квадратурной помехи на работу гироскопа и проанализирована ее зависимость от внешних параметров;

- обоснован выбор коэффициента перекрестной жесткости в качестве характеристики квадратурной помехи в ММГ RR–типа и предложен новый метод его определения;

- разработаны новые методы компенсации квадратурной помехи, как в канале обработки выходной информации, так и в канале управления чувствительным элементом;

- получено выражение передаточной функции по огибающей для цепи из последовательно соединенных резонансного контура и синхронного детектора для двух режимов работы ММГ (при сведенных резонансных частотах и расстройке этих частот более 3%);

- проведено математическое моделирование работы контуров компенсации помехи, оценена эффективность работы предлагаемых методов;

- получена уточненная математическая модель вторичного контура ММГ, позволяющая учитывать наличие в нем квадратурной помехи, а так же контура ее компенсации в канале управления чувствительным элементом;

- проведена экспериментальная проверка работоспособности методов компенсации квадратурной помехи, подтверждающая их эффективность.

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. Выявлено существенное влияние квадратурной помехи на точностные характеристики ММГ RR-типа.

2. Предложен новый метод определения коэффициента перекрестной жесткости, характеризующего квадратурную помеху, отличительной особенностью которого является инвариантность к расстройке резонансных частот подвеса.

3. Предложены методы компенсации квадратурной помехи для ММГ RR-типа, отличающиеся наличием в цепи обратной связи канала вторичных колебаний корректирующего звена на несущей частоте.

4. Получена математическая модель ММГ RR-типа, позволяющая учитывать ограничения на амплитуду вторичных колебаний и влияние момента, компенсирующего квадратурную помеху, на резонансные свойства подвеса по оси вторичных колебаний.

Практическая ценность:

1. Разработанный инвариантный к частотной расстройке метод определения коэффициента перекрестной жесткости позволил упростить процедуру измерения квадратурной помехи.

2. Разработаны структурные схемы и схемные решения, позволяющие реализовать предложенные методы компенсации помехи в системе управления ММГ.

3. Разработанные системы компенсации квадратурной помехи позволили снизить требования к уровню квадратурной помехи в ЧЭ, тем самым повысив выход годных ЧЭ.

4. На основе уточненной математической модели выработаны рекомендации по выбору резонансных частот подвесов, учитывающие способ подавления квадратурной помехи.

5. Экспериментально показана возможность реализации ММГ разомкнутого типа с добротностью контура вторичных колебаний более 100.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и докладывались: на VII, VIII, IX, XI конференциях молодых ученых (ЦНИИ “Электроприбор”, СПб, 2005-2009г.); на XXV конференции памяти Н.Н.Острякова (ЦНИИ “Электроприбор”, СПб, 2006 г.); на XII международной студенческой олимпиаде по автоматическому управлению “Baltic Olympiad” (СПБИТМО, СПб, 2006 г.); на международном симпозиуме по гироскопическим технологиям (Германия, Карлсруэ, 2007г.); на выездной школе-семинаре молодых ученых (ЦНИИ “Электроприбор”, СПб, 2007 г.).

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

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц, в тексте имеется 111 рисунков, 4 таблицы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований свойств квадратурной помехи и ее влияния на точностные характеристики ММГ RR-типа.
2. Компенсационный метод определения коэффициента перекрестной жесткости.
3. Методы компенсации квадратурной помехи для ММГ RR-типа.
4. Уточненная математическая модель ММГ RR-типа.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показано, что наибольшее влияние на порог чувствительности ММГ оказывает наличие в нем квадратурной помехи, возникающей из-за технологических погрешностей изготовления ЧЭ. Микромеханическая часть объекта управления представляет собой два высокочастотных резонансных звена, которые принято называть контурами первичных и вторичных колебаний. Расстройка собственных резонансных частот составляет около 3%.

Чтобы учесть наличие квадратурной помехи в математической модели ММГ, выбрано следующее ее описание:

$$\begin{bmatrix} J_z & 0 \\ 0 & J_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_z & 0 \\ 0 & d_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_z & k_{xz} \\ k_{zx} & k_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2J_z\Omega \\ -2J_x\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где J – момент инерции, d , k – коэффициенты демпфирования и механической жесткости подвеса, α , γ – колебания ПМ, Ω – угловая скорость, k_{zx} , k_{xz} – коэффициенты перекрестной жесткости, индексами z и x обозначаются соответственно оси первичных и вторичных колебаний.

Из публикаций известно, что величина $k_{zx} \frac{\alpha}{2J_x \dot{\alpha}}$, характеризующая уровень квадратурной помехи, может составлять $3,5 \cdot 10^3$ /с что на порядки превышает другие погрешности датчика, например, порождаемые перекрестными связями в электронике, прямым возбуждением вторичных колебаний и т.д.

Структурная схема, соответствующая вторичному контуру ММГ, представлена на рис.1.1.

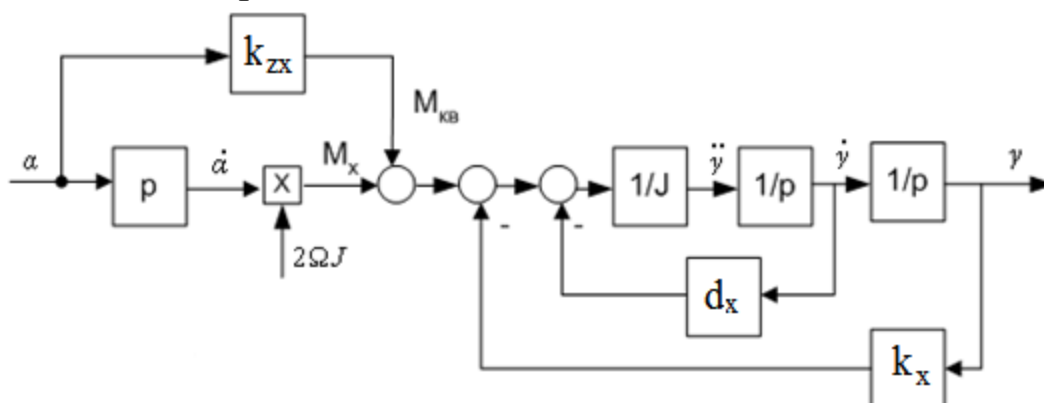


Рис.1.1 Структурная схема вторичного контура с учетом квадратурной помехи

На основании уравнения 1.1 при отсутствии измеряемой угловой скорости $\Omega = 0$, выражение, описывающее квадратурную помеху, имеет вид:

$$\gamma_{\text{КВ}} = |W_x(p)|_{p=j\omega_1} k_{zx} \alpha, \quad (1.2)$$

где $W_x(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$ – передаточная функция контура вторичных колебаний, ω_1 – частота первичных колебаний.

Из выражения (1.2) следует, что амплитуда квадратурной помехи зависит от механического коэффициента усиления $K_m = |W_x(p)|_{p=j\omega_1}$, от амплитуды первичных колебаний и коэффициента k_{zx} .

На основе исследований работы контура вторичных колебаний ММГ сделан вывод о том, что наличие в нем квадратурной помехи препятствует увеличению K_m . Например, при величине квадратурной помехи, равной $1000^\circ/\text{с}$, K_m ограничен значением 10. При отборе образцов ЧЭ с квадратурной помехой ниже $100\text{-}150^\circ/\text{с}$ в гироскопе удастся повысить величину K_m до 30-40 и получить шумы в нем на уровне $0,05^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$. Если предположить, что эти шумы датчика определяются шумами преобразователя емкость-напряжение (ПЕН), то для снижения шумов ММГ до $0,01^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ потребуется увеличение K_m до уровня 150-200, что возможно только при величине квадратурной помехи $50^\circ/\text{с}$ и ниже. Таким образом, необходимо более чем 10-кратное подавление квадратурной помехи.

Проведенный обзор методов подавления квадратурной помехи позволил сделать вывод о том, что наибольшей эффективностью обладают методы подавления помехи в канале управления ЧЭ. При этом

необходимо применять не индивидуальную настройку датчиков, а разнообразные варианты систем подавления квадратурной помехи.

Во второй главе показано, что уровень квадратурной помехи изменяется от образца к образцу ЧЭ. Приведена методика пересчета напряжения на выходе ПЕН, пропорционального квадратурной помехе, в угловую скорость. Получено, что уровень квадратурной помехи может достигать величины $1000^\circ/\text{с}$ и превышать полезный сигнал, пропорциональный измеряемой угловой скорости в 10^5 .

В диссертационной работе исследовано влияние квадратурной помехи на такие характеристики ММГ, как масштабный коэффициент и динамический диапазон.

Исследования проводились путем математического моделирования с учетом нелинейности емкостного датчика и при колебаниях ПМ вокруг выходной оси вида:

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{пол}} \cos(\omega_1 t) + \gamma_{\text{кв}} \sin(\omega_1 t), \quad (2.1)$$

где $\gamma_{\text{пол}}, \gamma_{\text{кв}}$ - углы отклонения ПМ под действием моментов Кориолиса и квадратурного соответственно. Результаты моделирования показали, что наличие в ММГ квадратурной помехи может приводить к изменению масштабного коэффициента датчика до 40%.

На основе результатов расчета, полученных с использованием программного пакета ANSYS, и результатов экспериментальной проверки в разрабатываемом датчике выявлено наличие эффекта, приводящего к скачкообразному изменению положения ПМ (электростатическое “залипание”), возврат которого в исходное положение происходит только при значительном снижении напряжения на электродах. На основании этих исследований звено ограничения по перемещению в математической модели дополнено зоной с релейным переключением. Допустимые отклонения величины γ определяются:

$$\gamma_{\text{доп}} = \gamma_{\text{эз}} - \gamma_{\text{кв}} \cdot K_{\text{м}}, \quad (2.2)$$

где $\gamma_{\text{эз}}$ – значение угла, соответствующее скачкообразному изменению положения ПМ. При этом на механический коэффициент накладывается дополнительное ограничение:

$$K_{\text{м}} < \frac{\gamma_{\text{эз}}}{\gamma_{\text{кв}}}. \quad (2.3)$$

Для исследований свойств квадратурной помехи разработаны методики экспериментов, результаты проведения которых:

- подтвердили линейную зависимость между амплитудами квадратурной помехи и первичными колебаниями ПМ;
- выявили зависимость амплитуды квадратурной помехи от температуры ЧЭ, изменение которой составляет 0,05% на 1°С;
- показали, что наибольшее влияние на амплитуду и фазу квадратурной помехи оказывает изменение резонансной частоты вторичного контура, что при совпадении резонансных частот подвеса может приводить к срыву колебаний и невозможности увеличения механического коэффициента усиления.

Результаты проведенных исследований показали, что измерение квадратурной помехи по выходному напряжению позволяет лишь косвенно оценить ее истинную величину. Это обусловлено необходимостью учета ее зависимости от K_m , который в свою очередь зависит от ряда факторов (резонансных частот первичного и вторичного контуров, напряжения на электродах), от амплитуды первичных колебаний α . Было установлено, что в ряде экспериментальных образцов ММГ уровень квадратурной помехи настолько велик, что измерить ее невозможно вследствие возникновения электростатического “залипания”, такие образцы ЧЭ идут на отбраковку.

На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что целесообразно характеризовать квадратурную помеху не уровнем пропорционального ей напряжения, а коэффициентом перекрестной жесткости k_{zx} . Для определения коэффициента k_{zx} разработан новый метод, заключающийся в ведении дополнительных связей между каналами первичных и вторичных колебаний ММГ, которые создают компенсирующий момент. При $\gamma=0$ на неподвижном основании, сформированный момент равен $-k_{zx}\alpha$. При известной величине компенсирующего момента и амплитуды первичных колебаний, может быть определена величина k_{zx} . Показана инвариантность предложенного метода к расстройке собственных частот первичного и вторичного контуров ММГ.

В третьей главе анализируется работа синхронного детектора (СД), входящего в канал обработки выходного сигнала ММГ, при сдвиге фазы опорного сигнала на величину $\Delta\varphi$. Выходной сигнал СД может быть представлен в виде:

$$U_{\text{СД}} = U_{\text{пол}}(t) \cos(\Delta\varphi) + U_{\text{кв}}(t) \sin(\Delta\varphi), \quad (3.1)$$

где $U_{\text{пол}}(t), U_{\text{кв}}(t)$ – напряжение, пропорциональное полезной составляющей и квадратурной помехе соответственно, $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг, вносимый при формировании сигналов. Из этого выражения видно, что смещение и дрейф нуля ММГ в значительной степени определяются величиной квадратурной помехи. При величине квадратурной помехи $1000^\circ/\text{с}$ и изменении $\Delta\varphi$ в пределах $0,05^\circ$ дрейф нуля может составлять $1^\circ/\text{с}$.

В диссертации решена задача предварительного понижения уровня квадратурной помехи на несколько порядков непосредственно на выходе ПЕН до поступления сигнала на СД. Блок-схема системы компенсации помехи, поясняющая ее принцип действия, приведена на рис.3.1.

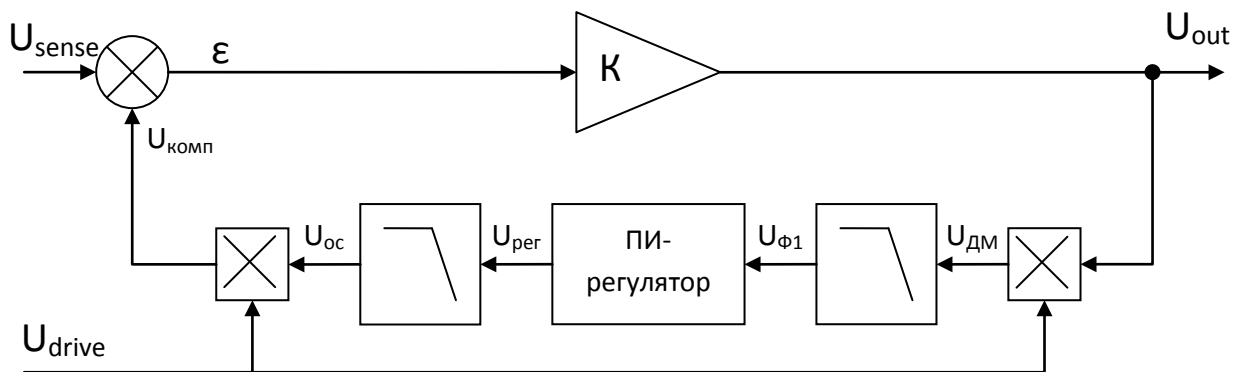


Рис.3.1 Блок-схема системы компенсации квадратурной помехи

Исследования работы системы (рис. 3.1) показали, что обратная связь в ней не оказывает влияния на полезный сигнал, ортогональный квадратурной помехе, который проходит на выход устройства, усиленный в K раз. Показано, что анализировать эту систему на несущей частоте можно, пользуясь методами устойчивости линейных систем. Работоспособность контура вне зависимости от уровня квадратурной помехи подтверждается результатами моделирования и экспериментальной проверки в составе макета ММГ, работающего с расстройкой резонансных частот более 3%, при этом обеспечивается подавление помехи не менее чем в 100 раз.

Блок-схема вторичного контура ММГ, в котором реализована компенсация квадратурной помехи в канале управления ЧЭ, представлена на рис.3.2.

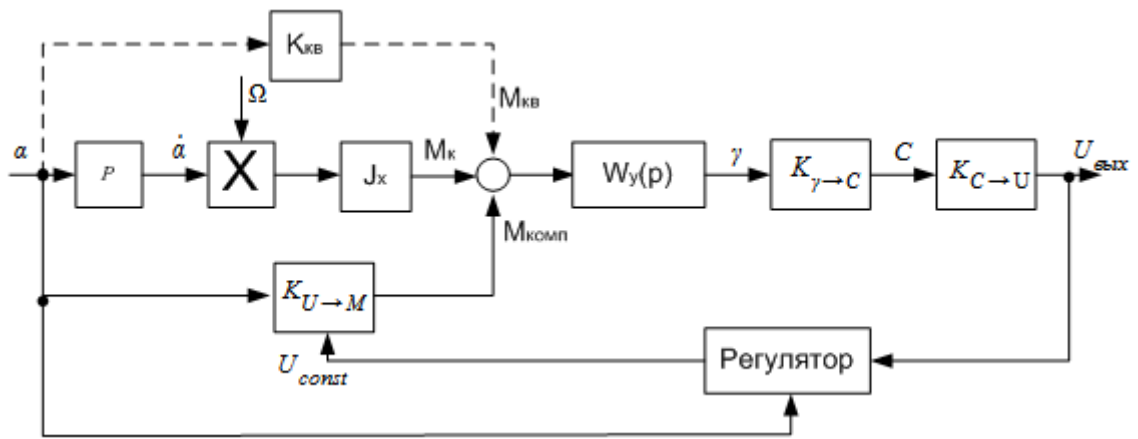


Рис.3.2 Блок-схема контура вторичных колебаний

Для создания момента на уровне ЧЭ используются датчики момента (ДМ), образованные электродами канала вторичных колебаний. Для двух типов электродных структур, разработано два метода компенсации помехи.

Первый метод основан на использовании самого ротора в качестве модулятора, это достигается за счет того, что электроды ДМ частично находятся над зубцовыми зонами ПМ (для возбуждения первичных колебаний используется гребенчатый двигатель) и при ее колебаниях вокруг оси первичных колебаний часть площади, находящейся под этими электродами изменяется. В этом случае компенсирующий момент записывается в виде:

$$M_{\text{комп}} = 2\varepsilon_0 \frac{k\alpha_0 U^2 \cos(\beta)}{d^2} \sin(\omega_1 t), \quad (3.2)$$

где d – зазор между ПМ и основанием, U – управляющее напряжение, ε_0 – диэлектрическая постоянная, β – угол между линией действия момента и осью вторичных колебаний.

Для формирования напряжения, подаваемого на электроды ДМ, может быть использована схема (рис.3.1) без модулятора. Необходимым условием для стабильной работы контура является обеспечение точного совпадения фаз опорного и детектируемого сигналов. Работа датчика с нулевой расстройкой частот аналогична его работе с расстройкой более чем на 3%, необходимо лишь обеспечить фазовый сдвиг опорного сигнала на 90° , что является простой технической задачей. При работе в режиме нулевой расстройки, предъявляются жесткие требования к системе стабилизации разности частот.

ММГ представляет собой систему автоматического управления с амплитудной модуляцией, характеристики которой изменяются

периодически во времени, что существенно усложняет их математический анализ.

В работе получена эквивалентная передаточная функция (ПФ) по огибающей последовательно включенных линейного стационарного динамического звена с ПФ $W_x(p)$ и синхронного идеального демодулятора. Показано, что эта ПФ для квадратурной помехи при условии работы датчика в низкочастотном диапазоне при ненулевой расстройке и при совпадении резонансных частот подвеса может быть соответственно представлена в виде:

$$W_{ог1}(p) = \frac{K_0}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (3.3)$$

$$W_{ог2}(p) = \frac{K_0}{T p + 1}, \quad (3.4)$$

где K_0 – коэффициент усиления, T – постоянная времени звена, которые изменяются в зависимости от расстройки частот. Оценка устойчивости замкнутой системы проводилась по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутого контура, представленного на рис.3.4.

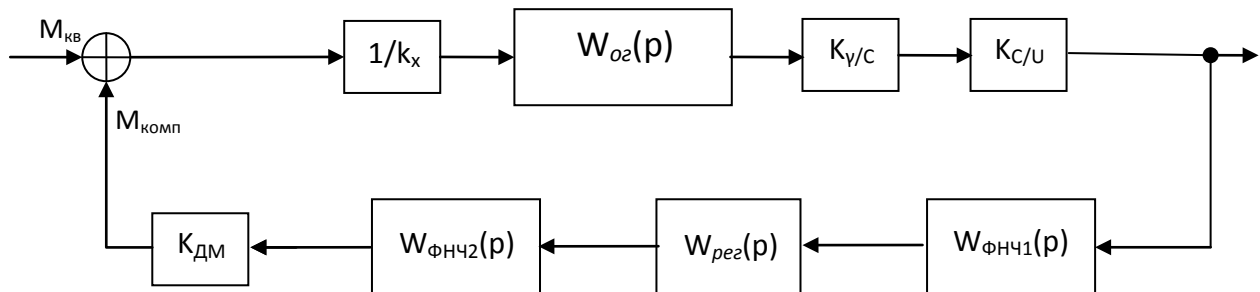


Рис.3.3 Контур вторичных колебаний

Выражение передаточной функции разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{p.c.}(p) = \frac{1}{k_x} W_{ог}(p) K_{\gamma/c} \cdot K_{c/u} W_{ФНЧ1}(p) W_{рег}(p) W_{ФНЧ2}(p) K_{ДМ}, \quad (3.5)$$

где $K_{\gamma/c}$, $K_{c/u}$, $K_{ДМ}$ – коэффициенты преобразования емкостного датчика, ПЕН и ДМ вторичного контура, соответственно; $W_{рег}(p)$, $W_{ФНЧ}(p)$ - передаточные функции регулятора и фильтров нижних частот, используемых в контуре.

Второй метод компенсации помехи в канале управления ЧЭ разработан для электродной структуры, не обеспечивающей модуляцию компенсирующего сигнала ввиду отсутствия изменения площади ПМ. В

этом случае, необходимо, чтобы на ДМ, расположенные по оси вторичных колебаний, поступал переменный во времени сигнал, совпадающий по частоте и амплитуде с сигналом квадратурной помехи. Основной трудностью при формировании компенсирующего момента этим способом, является точное определение фазы компенсирующего напряжения. Для решения этой проблемы предложена структура регулятора, изображенного на рис.3.4.

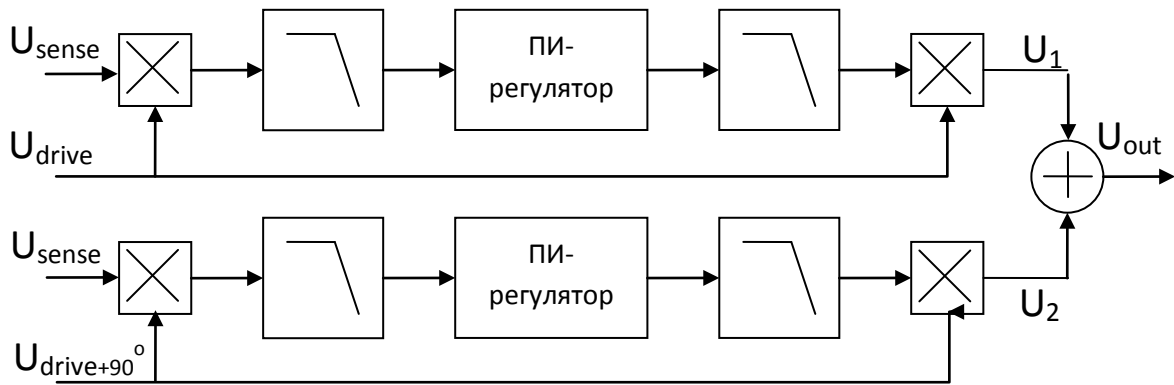


Рис.3.4 Структурная схема регулятора

Такая структура регулятора обеспечивает разложение сигнала, пропорционального квадратурной помехе, на две ортогональные составляющие. Тогда, выражение для компенсирующего момента может быть записано в виде:

$$M_{\text{комп}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S \left(2U_0 \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \right)}{2d} l, \quad (3.6)$$

где U_1, U_2 – переменные составляющие управляющего напряжения, U_0 – постоянное напряжение, l – плечо действия электростатической силы.

Анализ структуры (рис.3.4) показал, что при работе с сигналом на несущей частоте регулятор выполняет лишь преобразование его амплитуды, не изменяя его фазы.

Проверка работоспособности и устойчивости работы контура при различных условиях проводилась в программном пакете MatLab. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод инвариантен к расстройке частот (рис.3.5). Из рис. 3.5 видно, что вне зависимости от разности частот первичного и вторичного контуров, установившееся значение компенсирующего сигнала не меняется. Предложенный метод обеспечивает устойчивую работу контура вне зависимости от вносимой средствами измерения фазовой задержки сигналов и компенсацию квадратурной помехи любого уровня.

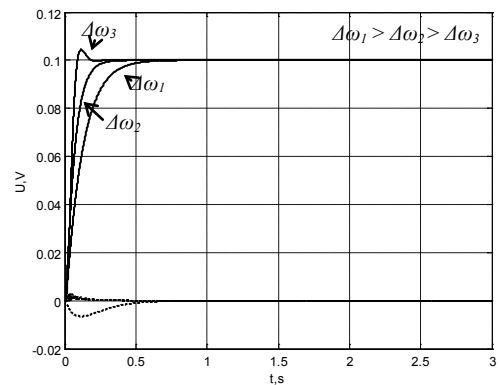


Рис.3.5 ПП формирования управляющих напряжение для различных значений $\Delta\omega$

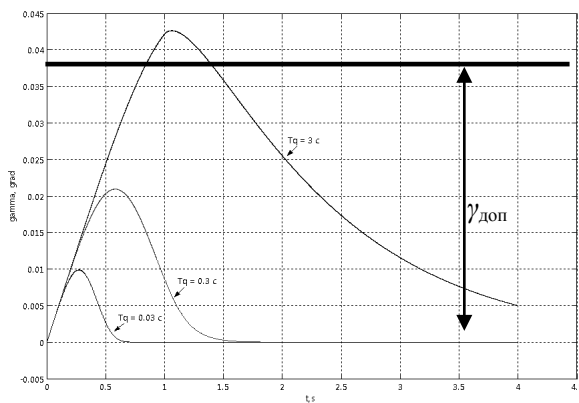


Рис.3.6 Амплитуда вторичных колебаний при разгоне

В работе показано, что система подавления квадратурной помехи должна обеспечивать ограничение вторичных колебаний при разгоне ротора в пределах линейной зоны звена ограничения. Это достигается при выполнении следующего условия:

$$T_{кв} < T_{ген}, \quad (3.7)$$

где $T_{ген}$, $T_{кв}$ – постоянные времени автогенератора и устройства формирования компенсирующего момента. Из рис.3.6 видно, что при выполнении условия (3.7) амплитуда вторичных колебаний при разгоне ПМ изменяется в допустимых пределах.

Проанализировано влияние контура компенсации квадратурной помехи на расстройку частот. Получена зависимость резонансной частоты вторичных колебаний ω_2 от момента, компенсирующего квадратурную помеху:

$$\omega_2(M_{кв}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{J} \left(K_m - k_1 \frac{M_{кв}^2}{A^2} - k_2 A^2 \right)} \quad (3.8)$$

где $k_1 = \frac{2d}{ee_0 S}$, $k_2 = \frac{ee_0 S l^2}{4d^3}$, A – амплитуда переменной составляющей напряжения, формирующего компенсирующий момент $M_{кв}$.

На основе расчетных данных показано, что момент, компенсирующий квадратурную помеху, оказывает существенное влияние на сдвиг резонансной частоты (до 100Гц в разрабатываемом датчике). С учетом этого упрощенное уравнение динамики вторичного контура может быть записана в виде:

$$J_x \ddot{\gamma} + d_x \dot{\gamma} + (k_x + k(M_{KB})) \gamma = 2J_x \Omega \dot{\alpha}, \quad (3.9)$$

из которого следует, что в математическую модель вторичного контура ММГ необходимо ввести дополнительную связь (рис.3.7).

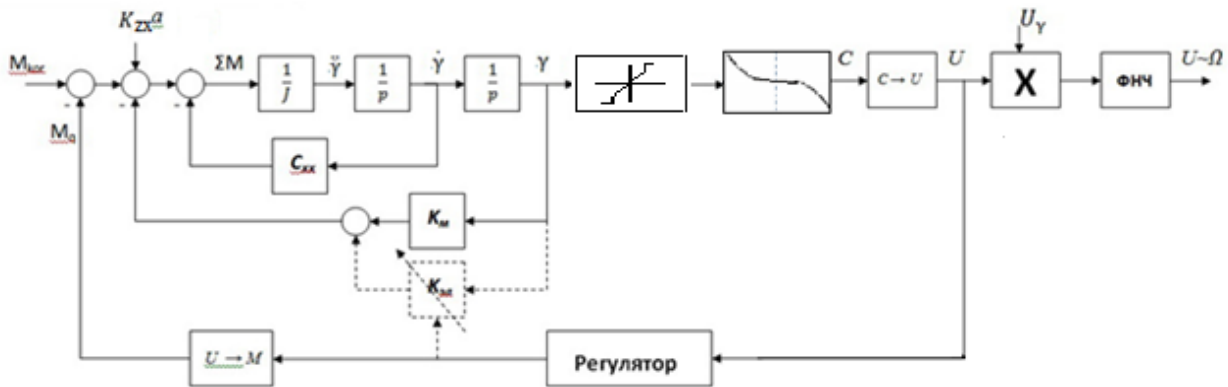


Рис.3.7 Блок-схема контура вторичных колебаний

Численная оценка эффективности предложенного метода показала, что весь расчетный диапазон подавления помехи перекрыт.

Анализ различных способов формирования компенсирующих квадратурную помеху моментов показал, что управление с одинаковым изменением постоянной и переменной составляющих оказывается наиболее эффективным с точки зрения достижения максимального уровня компенсации помехи при минимальном влиянии на резонансную частоту вторичных колебаний.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие выводы предыдущих глав. Объектом исследования является макет ММГ, в состав систем управления которого входит разработанный контур компенсации квадратурной помехи, реализованный в среде MatLab (рис.4.1).

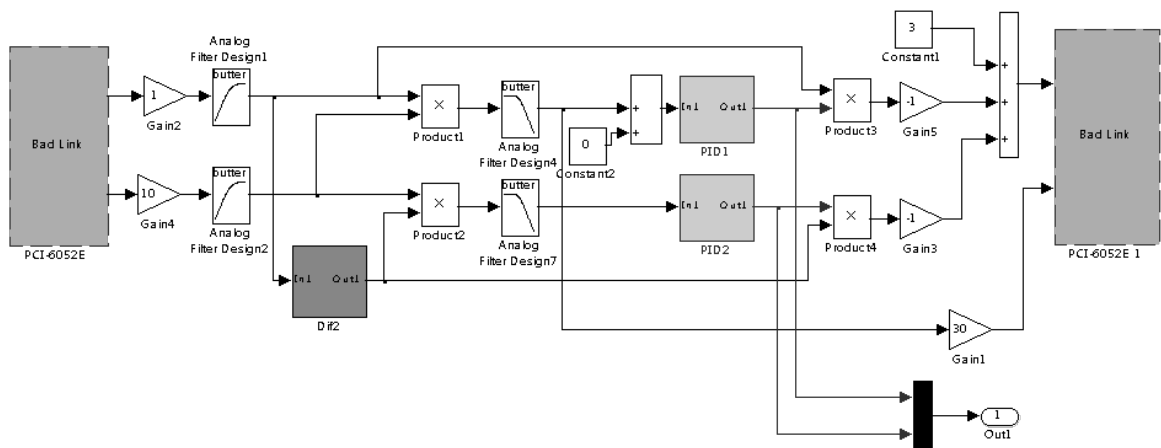


Рис.4.1 Simulink-модель контура компенсации квадратурной помехи

Результаты экспериментов показали, что:

- предложенный метод подавления квадратурной помехи в канале управления ЧЭ работоспособен и обеспечивает компенсацию помехи в 100% рабочих образцах ММГ;
- разработанный метод подавления квадратурной помехи инвариантен к расстройке частоты;
- сделан правильный выбор математической модели вторичного контура ММГ, учитывающей наличие квадратурной помехи, а, следовательно, и правильный выбор коэффициента перекрестной жесткости для определения помехи;
- реализация предложенного метода в электронную часть ММГ позволит уменьшить постоянное смещение выходного напряжения датчика практически до нуля, исключить уход ММГ в зависимости от изменения температуры ЧЭ, увеличить крутизну выходной характеристики датчика не менее чем на порядок, а так же снизить порог чувствительности до $0,01\text{ }^{\circ}/\text{с}$.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выявлено существенное влияние квадратурной помехи на точностные характеристики ММГ RR-типа, исследована ее зависимость от температуры ЧЭ и режимов работы ММГ.
2. Разработан инвариантный к частотной расстройке метод определения коэффициента перекрестной жесткости, который позволяет упростить процедуру измерения квадратурной помехи.

3. Разработаны методы автоматической компенсации квадратурной помехи для ММГ RR-типа, обеспечивающие увеличение выхода годных ЧЭ, а так же возможность работы гироскопа со сведенными резонансными частотами подвеса.

4. Получена уточненная математическая модель ММГ RR-типа, позволяющая учитывать ограничения на амплитуду вторичных колебаний и влияние момента, компенсирующего квадратурную помеху, на резонансные свойства подвеса по оси вторичных колебаний.

5. Проведена экспериментальная проверка макета ММГ с реализованными в нем методами компенсации квадратурной помехи. Показана возможность реализации ММГ разомкнутого типа с добротностью контура вторичных колебаний более 100 и порогом чувствительности на уровне 0,01 %/с.

Опубликованные работы по теме диссертации

1. Беляева Т.А., Некрасов Я.А. 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.

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

3. Микромеханический гироскоп вибрационного типа. Патент № 2301970 С1, Россия / Беляева Т.А., Некрасов Я.А., 2006г

4. Способ определения коэффициентов перекрестных жесткости и демпфирования подвеса микромеханического гироскопа и микромеханический гироскоп, в котором реализован данный способ. Патент № 2346239 С1, Россия / Беляева Т.А., Некрасов Я.А., 2009 г.

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

6. Andreeva T.A. Quadrature Error Reducing Circuit In Micromechanical Gyroscope. // 11th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad 2006), Saint-Petersburg, Russia. – pp.158-161.

7. Андреева Т.А., Некрасов Я.А. Система подавления квадратурной помехи в выходном сигнале микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением. - Материалы VII конференции молодых ученых. - СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2006.- С. 175-180.

8. Андреева Т.А., Беляев Я.В. 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.

9. Беляева Т.А., Багаева С.В. Проектирование высокоточного ММГ // Навигация и управление движением. - Материалы IX конференции молодых ученых. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2007г. – С.295-300.

10. Беляева Т.А. Способы подавления квадратурной помехи в микромеханических гироскопах // Навигация и управление движением. - Материалы XI конференции молодых ученых. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2009г.