

Некрасов Яков Анатольевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СЪЕМА
ИНФОРМАЦИИ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ГИРОСКОПАХ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2007

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Проблемы создания микромеханических гироскопов (ММГ) многогранны. В настоящее время важнейшими и наиболее сложными являются задачи точного съема информации в ММГ, заключающегося в измерении с помощью емкостных датчиков очень малых амплитуд углов вторичных колебаний, несущих информацию об измеряемой угловой скорости.

За рубежом работы над созданием ММГ начались с 1990 г. в Драйперовской лаборатории (США). В настоящее время ММГ выпускается серийно рядом фирм, среди которых можно выделить Analog Devices, Honeywell (США) и Bosch (ФРГ). Объем продаж ММГ в 2006 г. достиг 0,4 млрд. долларов США.

Несмотря на то, что в России исследования в этой области начались с десятилетним опозданием, в отечественной литературе уже имеется значительное число публикаций по тематике создания ММГ в журналах *Навигация и Приборостроение*, *Нано- и Микросистемная техника*, *Приборостроение (Изв ВУЗов)*, изданы монографии под ред. Распопова В.Я. и Чаплыгина Ю.А. Проводятся исследования и разрабатываются ММГ в *ЗАО Гирооптика*, *МИЭТ*, *ГУАП*, *ИПМ РАН*. Из зарубежных исследовательских центров необходимо отметить *Университет Беркли* (США), *ИМИТ* (ФРГ). Автор хотел бы особенно выделить публикации зарубежных исследователей и ученых Geen J.A., Ward P, Clark W.A. , Shkel A.

В рамках проводимых в ЦНИИ “Электроприбор” НИР и ОКР под руководством д.т.н. Л.П.Несенюка Евстифеевым М.И. и Унтиловым А.А. были разработаны конструкции микромеханической части ММГ и вакуумированный кремниевый модуль (ВКМ) для ММГ RR-типа, в котором ротор совершает угловые колебательные движения вокруг двух осей. Разные модификации ВКМ успешно изготавливаются фирмой *Tronic's* (Франция) для ЦНИИ “Электроприбор” по технологии «кремний на изоляторе» (Silicon On Insulator – SOI).

Было изготовлено более 1000 экземпляров ВКМ, проведен большой объем экспериментальных исследований для выявления факторов, влияющих на точность ММГ, разработаны методы и найдены решения, позволяющие по-

высить точность съема информации в ММГ до уровня 0,01 - 0,05 °/с, а в перспективе и до уровня 0,001 – 0,005 °/с, и начать разработку специализированной интегральной схемы (ASIC) для него.

При значительном опережении зарубежными странами России в области микромеханики возможности использования зарубежного опыта в разработках ЦНИИ “Электроприбор” оказались весьма ограниченными, так как публикации по этой теме носят либо фрагментарный характер (сосредоточены в основном в описаниях патентов) и посвящены по большей части описанию конструкции ММГ, либо являются недоступными для российских исследователей. Это объясняется тем, что за рынок ММГ (на нем Россия пока присутствует только в качестве покупателя) ведется жесткая борьба, ММГ повышенной точности относятся к изделиям двойного назначения, публикации о которых носят ограниченный характер.

Пока только пионеру разработок ММГ Драйперовской лаборатории удалось создать кремниевый ММГ с характеристиками, достаточными для его использования в высокоточном оружии. Совместными усилиями с фирмой *Honeywell* уровень шума этого ММГ был понижен до 0,001 - 0,003 °/с/√Гц, для этого потребовалось около 10 лет исследований и разработок, при которых изменения касались только системы съема информации, включающей в себя электродную структуру и электронику, и практически не затрагивали микромеханическую часть.

В связи с этим, в первую очередь является необходимым проведение исследований, направленных на повышение точности системы съема в ММГ.

В данной диссертации **поставлено целью** разработать методы и научные основы методик расчета и проектирования высокоточных систем измерения перемещения ротора ММГ *RR*-типа и их элементов, обеспечивающих значительное повышение точности измерения угловых скоростей с помощью ММГ.

Для того, чтобы получить точность ММГ близкую к 0,01°/с, необходимо с помощью емкостных датчиков измерять колебания его ротора с погрешностью на уровне 0,1А° во всем диапазоне изменения амплитуд этих колебаний при достаточно высоком уровне помех и наличии паразитных емкостей, превосходящих измеряемые изменения емкостей на несколько порядков. Эта за-

дача усложняется и тем, что ММГ является элементом массового изготовления, стабильность и воспроизводимость его параметров должны обеспечиваться по возможности без дорогостоящих операций измерения и подстройки, несмотря на относительно большие технологические допуски на величину межэлектродных зазоров в емкостных датчиках.

Требования к чувствительности систем съема информации в ММГ на два и более порядка превосходят достигнутый к началу 90-х годов уровень чувствительности емкостных датчиков прецизионных электростатических подвесов, применяемых в самых точных электростатических гироскопах, которые в России были разработаны под руководством А.С. Анфиногенова и Б.Е. Ландау.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо было решить последовательность задач, которые сформулированы ниже.

1. Получение точной зависимости емкости датчика выходного канала ММГ от угла поворота ротора и межэлектродного зазора на основе решения трехмерной задачи электростатики.

2. Создание методики компенсации нелинейности зависимости емкости от угла поворота ротора и уменьшения влияния межэлектродного зазора на характеристики емкостного датчика.

3. Разработка эффективных методов подавления квадратурной помехи в ММГ *RR*-типа.

4. Разработка схемотехнических принципов построения преобразователей емкость – напряжение для двухканальных емкостных датчиков с общим подвижным электродом, нечувствительных к влиянию паразитных емкостей между проводящим основанием и нанесенными на нем через изолирующий слой неподвижными электродами.

5. Разработка методов уменьшения уровня помех и паразитных связей между элементами ВКМ.

6. Оценка правильности методик расчета путем сопоставления расчетных данных, результатов математического и компьютерного моделирования и экспериментальных данных, полученных при испытании ВКМ с разработанными аналоговыми схемами на дискретных элементах.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи в работе использовались методы и аппарат теоретической механики, теории электрических цепей, теории автоматического управления, аналоговой схемотехники, теории графов, математического анализа и компьютерное моделирование.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Методика определения функциональных зависимостей межэлектродных емкостей от угла поворота ротора и геометрических параметров электродов, методика расчета величин момента и коэффициента отрицательной жесткости в электродной структуре ММГ *RR*-типа, основанная на числовом решении трехмерной задачи электростатики

2. Методика алгоритмической линеаризации характеристики емкостного датчика с плоскими электродами для ММГ *LL*- и *RR*-типа и обеспечения инвариантности крутизны этих датчиков от межэлектродного зазора.

3. Методы подавления квадратурной помехи в ММГ *RR*-типа, заключающиеся в формировании компенсирующего момента или электрических сигналов.

4. Анализ эффектов, выявляемых на максимально полной эквивалентной электрической схеме электродной структуры ММГ *RR*-типа, в которой учтены паразитные связи между электродами через слои кремния и оксида кремния.

5. Метод пространственного разделения измерительных сигналов в ММГ, реализуемый с помощью трансрезистивных усилителей, и создания на основе этого метода многоканальных преобразователей емкость – напряжение для многокоординатных микромеханических датчиков.

6. Методы уменьшения паразитных связей между элементами ВКМ и шумов, заключающиеся во введении дополнительных элементов в ВКМ, увеличении толщины слоя диэлектрика под электродами, параметрической оптимизации схемы преобразователя емкость – напряжение.

7. Результаты моделирования работы узлов ММГ с помощью программ *PSPICE* и *MATLAB* и экспериментальные данные, полученные при испытаниях ММГ на основе ВКМ с аналоговыми электронными блоками на дискретных элементах.

Новыми научными результатами являются:

- метод расчета характеристик электродной структуры ММГ *RR*-типа, основанный на числовом решении трехмерной задачи электростатики;
- методика оценки паразитных электрических связей в ММГ, выполняемых по технологии кремний на изоляторе, основанная на разработанной эквивалентной электрической схеме ММГ *RR*-типа, и методы уменьшения влияния этих связей на точность ММГ;
- новые апробированные схемы многоканальных преобразователей емкость – напряжение и методики их расчета, примеры моделирования для этого класса схем;
- алгоритмы преобразования выходных сигналов преобразователей емкость – напряжение, нахождение путей реализации этих алгоритмов;
- построение моделей узлов ММГ в программах *Simulink* и *PSPICE*.
- обоснование структуры комплексной системы проектирования систем съема данных ММГ *RR*-типа, основанной на разработанных методах, алгоритмах и схемах.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что в ней:

- созданы двухканальные преобразователи емкость – напряжение с разрешающей способностью на уровне 10-20 аттофарад ($1\text{аФ} = 10^{-18}\text{ Ф}$), которые уже используются в стендовой аппаратуре для проверки ВКМ и в ММГ с цифровой и аналоговой электроникой на дискретных элементах и обеспечивают разрешающую способность ММГ на уровне $0,02^\circ/\text{с}$;
- разработаны методы построения двухканальных преобразователей емкость-напряжение, которые используются при создании ASIC ММГ;
- выработаны рекомендации по изменению конструкции в части технологии изготовления деталей ВКМ (изменена конфигурация электродов и технология изготовления крышки, с учетом влияния емкостных датчиков изменены резонансные частоты подвеса ротора).

Апробация работы и публикации. По теме диссертации имеется 27 опубликованных работ, из них одна монография, две статьи в научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК, 3 доклада на международных

конференциях, один доклад на всероссийской конференции, 4 на отраслевых конференциях, 4 авторских свидетельства и 13 патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, списка использованной литературы. Объем диссертации - 125 страниц, 84 рисунка и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе на основании анализа описаний работы ММГ *RR*- и *LL*-типа, приводимых в зарубежных источниках, составлена его структурная схема (рис.1). Микромеханическая часть на ней представлена в виде двух резонансных звеньев, при этом первое охвачено положительной обратной связью (ПОС) и в нем возникают автоколебания, а второе – отрицательной обратной связью (ООС). На рисунке обозначены: γ , α – углы поворота ротора по осям первичных и вторичных колебаний, $W_z(p)$, $W_x(p)$ - передаточные функции подвесов ротора по осям Z и X , $ДУ_z$, $ДУ_x$, $ДМ_z$, $ДМ_x$ – соответственно датчики угла и момента по этим осям, Дем – демодулятор, Ω – измеряемая угловая скорость, φ – сдвиг фазы выходного напряжения $ДУ_z$, a_k – кориолисово ускорение, J_x , K_x , K_z – кинетический момент инерции ротора и коэффициенты жесткости подвеса. Обратные связи в ММГ формируются с помощью емкостных датчиков перемещения и момента. Возможные паразитные связи, влияние окружающей среды (температура, вибрация, удары и т.д.) и технологических разбросов показаны на схеме пунктирными линиями. В процессе проектирования ММГ влияние этих связей и факторов необходимо учитывать или предусматривать средства их подавления.

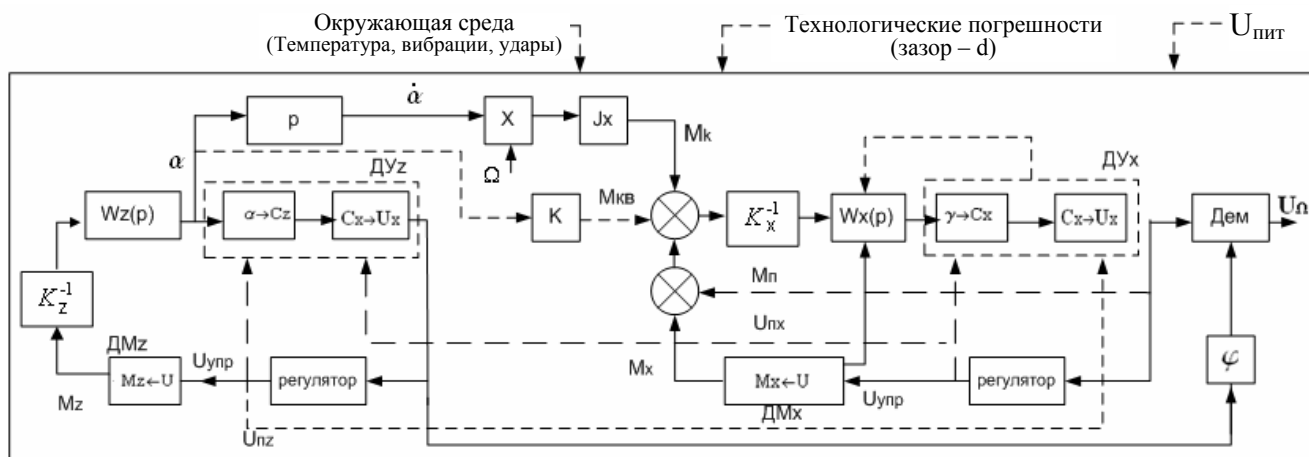


Рис.1. Структурная схема ММГ

Влияние внешних механических воздействий на ММГ рассматривалось в работах Евстифеева М.И., Унтилова А.А., Лестева А.М. Компенсация и стабилизация температуры оказались, как показали исследования, проведенные при участии автора, эффективными (температурный дрейф может быть уменьшен на порядок и более).

Анализ влияния технологических разбросов и ряда паразитных электрических, механических и электростатических связей на работу ММГ в отечественных работах практически не рассматривался. На основе анализа известных конструкций зарубежных ММГ *RR*-типа можно сделать заключение, что для повышения точности применялись такие средства как:

- подавление или исключение квадратурной помехи (за счет сил электростатического поля с помощью дополнительных электродов, введения обратной связи по сигналу емкостного датчика или использования двухмассовой структуры ММГ);
- гальваническая развязка каналов преобразования сигналов в ММГ, достигаемая за счет использования технологии изолирующих канавок, применения диэлектрика в качестве подложки;
- пространственное разнесение электродов гребенчатого двигателя и емкостного датчика перемещений ПМ по оси вторичных колебаний;
- стабилизация разности собственных частот подвеса ротора;
- использование разнополярных напряжений на электродах датчика момента и симметричное расположение их относительно электродов датчика угла.

Большинство этих приемов не были известны к началу разработки ВКМ, и их реализация требовала изменения технологии, поэтому в первоначальной конструкции ВКМ (рис.2) они не были учтены.

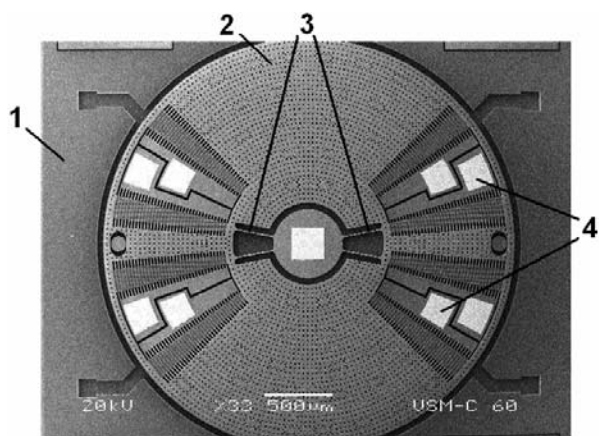


Рис. 2. SEM-фотография ротора ВКМ

Собственно кремниевый модуль выполняется с использованием двух кремниевых пластин, на одной из которых 1 сформированы: диск 2 на торсионном подвесе (3- торсионы) и статоры 4 емкостных датчиков для системы возбуждения первичных колебаний. Емкостные двигатели - датчики момента - имеют

гребенчатую электродную структуру. На второй пластине (рис.3) сформированы электроды датчиков угла и момента канала вторичны колебаний. Обе пластины свариваются между собой и помещаются в вакуумированный корпус, образуя ВКМ.

Автором были разработаны методики экспериментального определения подвижности ротора ММГ по выходной оси и таких параметров ВКМ, как собственные частоты подвеса, межэлектродные емкости и уровень квадратурной помехи (амплитуда γ при $\Omega = 0$), типовые значения которых представлены в табл. 1.

Таблица.1 Параметры ВКМ

Собственная частота подвеса, Гц		Добротность подвеса		Емкость электрод-ротор (паразитная емкость), пФ		Квадратурная помеха, град
Ось Z	Ось X	Ось Z	Ось X	Ось Z	Ось X	
3200	3000	$(5-7) \cdot 10^5$	$(0,5-1) \cdot 10^5$	2 (1,7)	4,5 (70)	0,01

Во второй главе проведен анализ двух типов электродных структур, применяемых в ММГ RR-типа: гребенчатой и с плоскими электродами. Анализ проведен на основе аналитических выражений и по численным расчетам,

выполненным с применением метода конечных элементов. Параллельно проверена возможность использования полученных результатов в ММГ *LL*-типа.

Для гребенчатой структуры по критерию линейности зависимости емкости от угла поворота и независимости от него создаваемого момента определен минимальный угол перекрытия между зубцами структуры (который оказался в три раза меньше реализованного в ВКМ).

Показано, что для разности емкостей ΔC дифференциального емкостного датчика с этой структурой электродов справедливо выражение

$$\Delta C = \frac{C_1 + C_2}{\gamma_0} \Delta \gamma, \quad (1)$$

где C_1, C_2 - межэлектродные емкости датчика, $\Delta \gamma$ - угол поворота ротора, γ_0 - угол перекрытия между электродами при $\Delta \gamma = 0$. Предложено для исключения зависимости выходного сигнала датчика от зазора измерять величины $C_1, C_2, \Delta C$ и по ним определять $\Delta \gamma$. Этот же алгоритм может быть распространен и на гребенчатые электродные структуры с поступательным перемещением подвижного электрода.

Для электродной структуры с поворачивающимся на угол α электродом, когда электроды имеют форму сегмента круга, найдены значения емкостей C для разных величин зазора d между электродами и угла α . Эти значения находились двумя методами: с помощью программы Ansys и из выражения:

$$C = 2\varepsilon \cos(\alpha) \int_0^\psi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{r}{d + r \sin(\alpha) \cos(\alpha)} dr d\theta. \quad (2)$$

С возрастанием зазора сходимость результатов расчета, полученных разными методами, возрастает, что объясняется уменьшением влияния краевых эффектов, которые не учитывались при выводе выражения (2).

Для полученного расчетным путем семейства кривых в качестве аппроксимирующей функции была выбрана функция вида:

$$C(\alpha) = \frac{C(0)}{1 + b\alpha + c\alpha^2}. \quad (3)$$

Погрешность аппроксимации этой функцией не более 1%.

На основании аналитического выражения для $C(\alpha)$ получены выражения для разности емкостей $\Delta C(\alpha)$ дифференциального емкостного датчика, вели-

чины момента M , создаваемого парой электродов при наличии между ними напряжения U , и вносимой этой парой отрицательной электрической жесткости C_ε :

$$\Delta C(\alpha) = C_1(\alpha) - C_2(\alpha) = C(\alpha) - C(-\alpha); \quad (4)$$

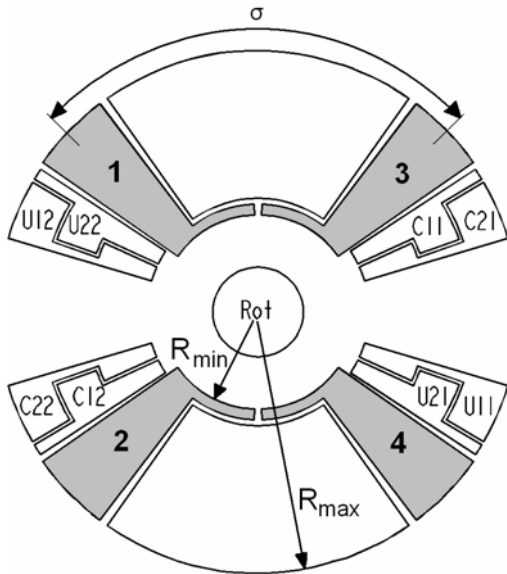


Рис. 3. Схема расположения электродов канала вторичных колебаний

$$M = \frac{U^2}{2} \frac{dC(\alpha)}{d\alpha}; \quad (5)$$

$$C_\varepsilon = \frac{U^2}{2} \frac{d^2C(\alpha)}{d\alpha^2}. \quad (6)$$

Полученные соотношения позволяют оценивать влияние напряжений возбуждения датчика угла на ротор и собственную частоту по оси вторичных колебаний. Зависимость $\Delta C(\alpha)$ нелинейна, однако отношение

$$\frac{C(\alpha)}{C_1(\alpha)C_2(\alpha)} \quad (7)$$

является линейной функцией α . Поэтому дополнительные измерения величин $C_1(\alpha)$, $C_2(\alpha)$ позволяют формировать линейную зависимость выходного сигнала от угла α . Использование такого способа линеаризации в дифференциальных емкостных датчиках, в которых подвижный электрод движется по нормали к неподвижным, как это имеет место в ММГ LL -типа, позволяет исключить и зависимость выходного сигнала от зазора.

На основе расчета сил электрического поля, действующих на ротор при расположении электрода над зубцовой зоной, показано, что в электродной структуре на рис. 3 создается момент M_c , синфазный с первичными колебаниями ротора. При одинаковых напряжениях (U_1) на одной паре электродов 1, 2 амплитудное значение этого момента может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta M_\Sigma = \varepsilon \frac{(R_{\max}^2 - R_{\min}^2)(R_{\max} + R_{\min})(D + 2d_3)}{6(D + d_3)} \left(\frac{U_1}{d}\right)^2 \cos\left(\frac{\sigma}{2}\right) \gamma_0, \quad (8)$$

где d_3 – межзубцовый зазор; D – ширина зуба.

При подаче напряжения U_1 на другую пару электродов (3, 4) фаза момента M_z изменяется на 180° . Эта электродная структура позволила в некоторых образцах ММГ полностью компенсировать квадратурную помеху. Статистический анализ показывает, что такая электродная структура позволяет компенсировать квадратурную помеху в 30% образцов ВКМ при напряжении $U_1 < 6В$.

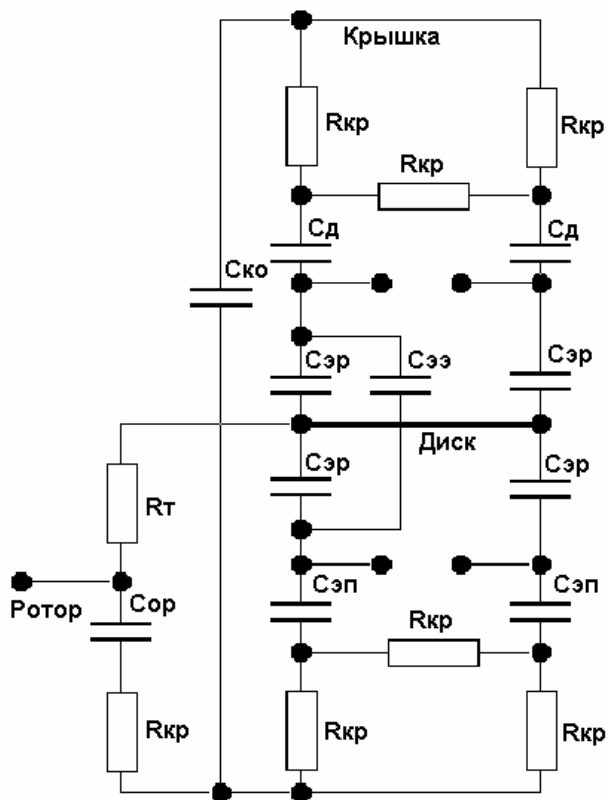


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема электродной структуры ВКМ

в схему добавлены конденсаторы C_d , емкость которых не меняется при перемещениях ротора. Эти емкости связаны между собой через проводящий кремний. Эта связь отражена в виде резисторов $R_{кр}$. В схеме также учтены сопротивления торсионов R_t , паразитная емкость между опорой и основанием $C_{ор}$ и паразитная емкость между крышкой и опорой $C_{ко}$ по слоям металлизации, используемым для сварки этих деталей ВКМ. Паразитные емкости между электродами через вакуумный промежуток обозначены $C_{эз}$.

Паразитные емкости C_d , $C_{эп}$ могут быть рассчитаны как емкости для конденсатора с плоскопараллельными электродами. А для определения межэлектродных паразитных связей были экспериментально определены импе-

Эквивалентная электрическая схема электродной структуры ВКМ может быть представлена в виде соединения 12 конденсаторов с общим электродом, которым является проводящий ротор (рис.4). При учете паразитных емкостей она выглядит сложнее и содержит 30 конденсаторов. На рис.4, чтобы не загромождать схему, показаны только электроды одного датчика угла и одного датчика момента по осям первичных и вторичных колебаний. Между двумя проводниками (электрод и проводящий кремний основания или крышки) находится диэлектрик (оксид кремния). Поэтому помимо конденсаторов, которые образованы ротором и электродами, в

дансы между некоторыми выводами от электродов ВКМ. При соединении с общим выводом источника питания выводов от наружных поверхностей кремниевых пластин эквивалентные межэлектродные емкости уменьшались примерно на порядок.

Дополнительным средством уменьшения межэлектродных и паразитных емкостей является увеличение толщины слоя диэлектрика. По согласованию с фирмой *Tronics* в новой партии ММГ эта толщина будет увеличена в 4 раза, что по оценкам, приводимым автором в гл. 3, может повысить разрешающую способность ММГ во столько же раз.

В третьей главе определены пути создания преобразователей емкость – напряжение (ПЕН) фемто- и аттофарадной точности для ММГ, выполненного по технологии SOI, при использовании которой паразитные емкости на порядок превосходят емкости между ротором и электродами.

На основе анализа применяемых в электростатических подвесах преобразователей обоснован выбор варианта схемы преобразования изменений емкости в электрический сигнал, в котором на электроды поступает напряжение, а измеряемым параметром является ток. В такой схеме паразитные емкости C_p , присоединенные к электродам, не влияют на измеряемый ток. В ММГ могут измеряться изменения тока на частоте первичных колебаний или на частоте переменного напряжения.

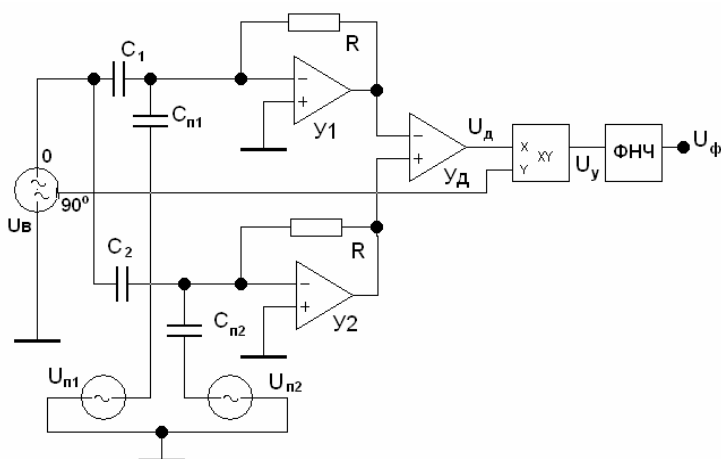


Рис. 5. Двухканальный преобразователь емкость – напряжение

В последнем случае достигается повышение крутизны преобразования до величин порядка 10^6 А/Ф. С учетом полученной в гл. 2 крутизны емкостного датчика $3,9 \cdot 10^{-10}$ Ф/рад изменения тока через электроды при перемещениях ротора, соответствующие порогу чувствительности ММГ, оказываются

меньше 10^{-11} А. Помехи на входе ПЕН от напряжений на электродах датчиков момента при этом могут быть на уровне 10^{-7} А. Для преобразования малых изменений тока в напряжение и подавления помех в схеме ПЕН применен

дифференциальный трансрезистивный усилитель (ДТУ), выполненный по схеме на рис.5. Использование операционных усилителей (ОУ), подключенных к электродам, обеспечивает пространственное разделение измеряемых токов. Подавление помех на частотах, отличающихся от частоты возбуждения датчиков угла (частота источника U_B), достигается в ПЕН применением синхронного детектора на перемножителе и фильтре низкой частоты (ФНЧ). Показано, что порог чувствительности (ΔC) этой схемы ПЕН может быть определен из выражения:

$$\Delta C \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{U_{ш}}{U_B} C_n, \quad (9)$$

где C_n – паразитная емкость, присоединенная к электроду, $U_{ш}$, U_B – соответственно напряжение шума на входе операционного усилителя, и напряжение между электродами. Для исключения резонансного усиления шумов целесообразно в схеме на рис.5 применять ОУ с передаточной функцией

$$W(p) = K \frac{(1 + \tau p)}{(1 + T p)}, \quad (10)$$

где $\tau \approx RC_{п}$.

Вариант ПЕН, показанный на рис. 5, используется в стендовой аппаратуре в фирме *Tronics* для проверки параметров ВКМ, в ММГ с цифровой и аналоговой электроникой. Модификация этого ПЕН предложена для исполнения в виде интегральной схемы (ASIC), приведены результаты моделирования работы ПЕН в программе *PSPICE*.

В главе проведен анализ схем двухканальных ПЕН на основе выпускаемых за рубежом интегральных схем (ИС) для одноканальных дифференциальных емкостных датчиков типа MS3110 и на основе зарядовых усилителей (ЗУ). В схемах с ИС MS3110 использовалось частотное разделение токов, поступающих на входы этих ИС через электроды датчиков угла ДУ_x и ДУ_z. Показано, что при применении ЗУ необходимо использовать либо точную взаимную компенсацию паразитных сигналов за счет применения разнополярных напряжений, поступающих к датчикам момента, или формировать эти напряжения на частоте, равной половине собственной частоты подвеса по оси Z.

В четвертой главе рассмотрена возможность уменьшения помех в ММГ за счет оптимизации работы системы возбуждения первичных колебаний на резонансном звене $Wz(p)$, построенной как типичная схема автогенератора со схемой автоматического регулирования (АРУ) амплитуды колебаний. Приведены результаты ее математического моделирования в программах *Simulink* и *PSPICE*, и экспериментальной проверки схемы, выполненной с применением аналоговых ИС. Модель резонансного звена для программы *PSPICE* была построена на *LCR*- элементах и ОУ. Для обеспечения независимости амплитуды первичных колебаний ротора от зазора и собственной частоты подвеса ротора по оси *Z* рекомендовано использовать алгоритм нормирования сигнала ДУ, описанный в гл. 2, а в АРУ вводить сигнал с выхода звена дифференцирования. Экспериментальная проверка показала, что за счет подстройки вносимого сдвига фазы сигнала в системе возбуждения первичных колебаний напряжение на электродах гребенчатого двигателя в установившемся режиме может быть снижено до 50мВ.

При выделении сигнала, пропорционального измеряемой угловой скорости, квадратурная помеха может рассматриваться как аддитивная, а изменение амплитуды (A_z) первичных колебаний как мультипликативная помехи.

Исследование работы ВКМ на “выбеге” и при разных амплитудах первичных колебаний показало, что в ВКМ составляющая сигнала квадратурной помехи пропорциональна амплитуде первичных колебаний. Это позволяет осуществлять компенсацию за счет индивидуальной подстройки. На основе известных методов подавления этих видов помех предложены схема подавления сигнала квадратурой помехи и способ уменьшения влияния изменения амплитуды первичных колебаний в ММГ.

При большом уровне квадратурной помехи для уменьшения дрейфа нуля ММГ целесообразно перед демодулятором ввести схему ее автоматической компенсации. Приведены результаты моделирования системы выделения сигнала с такой схемой в программах *Simulink* и *PSPICE*, которые совпали с результатами экспериментальной проверки.

При подавленной в выходном канале ММГ аддитивной составляющей, мультипликативная помеха может быть подавлена за счет деления выходного сигнала демодулятора на величину, пропорциональную амплитуде первич-

ных колебаний, т.е. на сигнал, который выделяется в схеме АРУ. Основное достоинство этого способа заключается в том, что еще при малых амплитудах первичных колебаний появляется возможность получить выходной сигнал ММГ с номинальной крутизной и уменьшить время готовности ММГ.

На стенде фирмы *Acutronic* проверена работа ММГ на основе ВКМ и аналоговой электроники. Результаты сравнительных испытаний по определению порога чувствительности отечественного и зарубежного (ADXRS150) образцов ММГ приведены на рис. 6. На графике изменений выходного сигнала ММГ четко видны скачки напряжения, соответствующие изменениям угловой скорости на $0,05^\circ/\text{с}$. Видно, что уровень шума в 2-3 раза ниже скачков напряжения, что позволяет оценить порог чувствительности этого ММГ как близкий к желаемому уровню $0,01^\circ/\text{с}$.

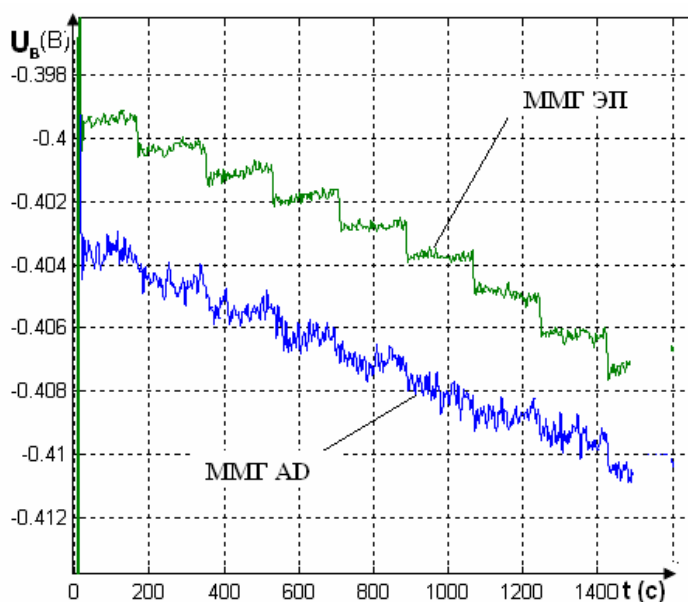


Рис. 6. Выходной сигнал ММГ

В главе приведена методика проектирования системы съема информации ММГ, в которой использованы разработанные методы расчета и технические решения по повышению точности ММГ *RR*-типа, изготавливаемого по технологии *SOI*, полученные в диссертационной работе. Приведен вариант схемы этой системы с блоками, реализующими алгоритмы нормирования сигналов и подавление аддитивной и мультипликативной помех. Эти

технические решения защищены патентами РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации формулируются следующим образом:

1. Созданы основы комплексной методики проектирования систем измерения перемещения ротора в ММГ *RR*-типа, которая включает в себя:

- рекомендации по выбору конфигурации электродной структуры и конструкции микромеханической части ММГ;
- методику расчета характеристик этой структуры;

- апробированные схемы многоканальных преобразователей емкость – напряжение и необходимые расчетные соотношения;
- эффективные алгоритмы преобразования выходных сигналов преобразователей емкость-напряжение, полученные на основе оптимизации отношения «сигнал/шум».

3. Разработано пять модификаций схемы двухканального преобразователя емкость – напряжение (две с частотным разделением сигналов на основе интегральной схемы одноканального преобразователя емкость – напряжение MS3110, три с пространственным разделением сигналов, различающиеся по форме и частоте несущей).

4. Разработана эквивалентная электрическая схема электродной структуры ММГ *RR*-типа, выполненного по технологии SOI, учитывающая паразитные связи между электродами через слои кремния и оксида кремния, и на ее основе оценено влияние этих связей.

5. Разработаны предложения по модификации конструкции ВКМ, обеспечивающие повышение точности ММГ *RR*-типа. Эти предложения включают в себя введение дополнительных электродов над зубцовой зоной ротора для подавления квадратурной помехи, увеличение толщины изоляционного слоя под электродами крышки, заземление (соединение с общим проводом источника питания) слоя металлизации на периметре основания и слоев кремния основания и крышки.

6. На основе оптимизации отношения «сигнал/шум» разработаны алгоритмы преобразования выходных напряжений трансрезистивных усилителей, входящих в состав двухканального преобразователя емкость - напряжение, и схемы на аналоговых элементах, реализующие эти алгоритмы, обеспечивающие работу ВКМ в режиме ММГ.

7. Проведены экспериментальные исследования ММГ с аналоговыми электронными блоками. В результате испытаний получены следующие характеристики ММГ: порог чувствительности $0,02^\circ/\text{с}$, диапазон измеряемых скоростей $150^\circ/\text{с}$.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Некрасов Я.А. Активные электростатические подвесы / Я.А.Некрасов, В.С.Фрезинский.- Л. : ЦНИИ «Румб», 1987.- 112 стр.
2. Попова И.В. Термостатирование микромеханических инерциальных датчиков / И.В.Попова, Н.В.Моисеев, Я.А.Некрасов, А.А.Семенов // Нано- и микросистемная техника, 2001,- № 5.- С.22-24.
3. Некрасов Я.А. Анализ замкнутых систем с резонансными звеньями в программах *PSPICE* и *SIMULINK* : сб. науч. тр. Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде *Matlab*», 2004.-С.1583-1588.
4. Некрасов Я.А. К вопросу выбора преобразователя емкость – напряжение для микромеханического гироскопа / Н.В. Моисеев, Я.А. Некрасов // Микросистемная техника МСТ-2004. Материалы Международной научной молодежной школы- 20-25.09.2004.- С. 94-101.
5. Пешехонов В.Г. Результаты разработки микромеханического гироскопа / В.Г. Пешехонов [и др.] // XII С.-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигац. системам. : сб. науч. тр.- С.-Петербург: ЦНИИ "Электроприбор", 2005.С.
6. Пешехонов В.Г., Результаты разработки микромеханического гироскопа / В.Г. Пешехонов [и др.] // V международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением» : Сборник докладов.- Киев: НТУУ «КПИ», 2005. – С.28-36.
7. Peshekhonov V.G. Development and Test Results of a Micromechanical Disc-shape Gyroscope / V.G. Peshekhonov [et al.] // Symposium Gyro Technology, 2005. – pp.8.0-8.10.
8. Пешехонов В.Г. Результаты разработки микромеханического гироскопа / В.Г. Пешехонов [и др.] // Гироскопия и навигация, 2005. - № 3(50). С.44-51.
9. Некрасов Я.А. Система подавления квадратурной помехи в выходном сигнале микромеханического гироскопа. / Т.А.Андреева, Я.А.Некрасов // VII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением»: сб. докл. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006. - С.175-181.

10. Некрасов Я.А. Подавление квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе с помощью электродов, расположенных над зубцовой зоной / Т.А. Андреева, С.В. Багаева, Я.В. Беляев, Я.А. Некрасов : доклад на 25 конференции памяти Н.Н.Острякова, 2006.

11. А.с. № 866761. Устройство подавления квадратурной помехи в усилителе следящей системы / Некрасов Я.А. (СССР), 1981.

12. А.с. № 1045716. Способ измерения смещения подвешиваемого тела в активном электрическом подвесе и активный электрический подвес для реализации данного способа / Некрасов Я.А. (СССР), 1983г.

13. А.с. № 1223714. Способ измерения смещения подвешиваемого тела и активный электрический подвес для его осуществления / Я.А. Некрасов, К.В.Степанов, Г.Г.Ярощук (СССР), 1985г

14. А.с. № 1353073. Активный электрический подвес / Я.А. Некрасов, В.Н.Щербаков, Г.Г.Ярощук (СССР), 1985г.

15. Патент 2244271 РФ, МПК⁷ G 01 H 11/06. Способ контроля качества изготовления микромеханических устройств / Моисеев Н.В., Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ЦНИИ “Электроприбор” ; заявл. 13.05.2003 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1. – 7 с. : ил.

16. Патент 51233 РФ, G 01 P 9/04. Устройство управления гребенчатым двигателем микромеханического датчика с резонансным подвесом дискового ротора / Моисеев Н.В., Некрасов Я.А. Уткин Д.А. ; заявитель и патентообладатель ЦНИИ “Электроприбор” ; заявл. 28.05.2004 ; опубл. 27.01.2006.

17. Патент 2272994 РФ, МПК G 01 C 19/56. Микромеханический гироскоп / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2004129010/28 ; заявл. 01.10.2004 ; опубл. 27.03.2006, Бюл. № 9. – 9 с. : ил.

18. Патент 2274833 РФ, МПК G 01 C 19/56. Устройство преобразования сигналов микромеханического гироскопа вибрационного типа / Моисеев Н.В., Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2004129009/28 ; заявл. 01.10.2004 ; опубл. 20.04.2006 , Бюл. № 11. – 8 с. : ил.

19. Патент 2279634 РФ, МПК G 01 C 19/56. Микромеханический гироскоп / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Элек-

троприбор” - 2004129017/28 ; заявл. 01.10.2004 ; опубл. 10.07.2006, Бюл. № 19. – 9 с. : ил.

20. Патент N 2282149 РФ, МПК G 01 C 19/56. Двухканальное устройство измерения перемещений подвижного проводящего тела / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005107603/28; заявл. 10.03.2005 ; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 9 с. : ил.

21. Патент 2282150 РФ, МПК G 01 C 19/56. Устройство управления гребенчатым двигателем микромеханического датчика / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005107604/28 ; заявл. 10.03.2005 ; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.

22. Патент 2282151 РФ, МПК G 01 C 19/56. Микромеханический гироскоп / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005107602/28 ; заявл. 10.03.2005 ; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.

23. Патент 2282152 РФ, МПК G 01 C 19/56. Устройство преобразования сигналов микромеханического гироскопа вибрационного типа / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005110265/28 ; заявл. 30.03.2005 ; опубл. 20.08.2006 , Бюл. № 23. – 8 с. : ил.

24. Патент 2289100 РФ, МПК G 01 C 19/56 Способ измерения угловой скорости и микромеханический гироскоп для его реализации / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005131912/28 ; заявл. 11.10.2005 ; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34. – 17 с. : ил.

25. Патент 2289789 РФ, МПК G 01 C 19/56. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - 2005130466/28 ; заявл. 23.09.2005; опубл. 20.12.2006, Бюл. № 35. – 8 с. : ил.

26. Патент 2296301 РФ, МПК G 01 C 19/56. Способ измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси вторичных колебаний и устройство для реализации данного способа / Некрасов Я.А. ; заявитель и патентообладатель ФГУП “ЦНИИ “Электроприбор” - № 2005130467/28 ; заявл. 23.09.05; опубл. 27.03.07, Бюл. № 9. – 11 с. : ил.

27. Заявка 2006102652/28 РФ, МПК G 01 C 19/56. Микромеханический гироскоп вибрационного типа / Некрасов Я.А., Андреева Т.А. –заявл.20.01.06. Решение о выдаче патента на изобретение от 18.12.06.

