

На правах рукописи

УДК 629.7.05

Косторной Андрей Николаевич



## **КОЛЬЦЕВОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Акционерном обществе «Инерциальные технологии «Технокомплекса»

Научный руководитель: Коновалов Сергей Феодосьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Меркурьев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Черноморский Александр Исаевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных комплексов систем ориентации и навигации, ФГБОУ ВПО «МАИ (НИУ)»

Ведущая организация: ПАО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА», г. Арзамас

Защита диссертации состоится «3» октября 2018 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «        » августа 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.141.19  
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

К современным гироскопическим приборам предъявляются требования по малой массе, габаритным размерам, энергопотреблению, низкой стоимости, производство которых позволит использовать групповые технологии, обеспечивающие выполнение целевой функции с заданной точностью.

Начиная с 1960-х годов, начались научно-технические работы в области разработки миниатюрных датчиков и исполнительных устройств различного назначения на основе кремния. Проведение исследований по созданию специальных материалов и технологий микроэлектроники позволило разработать миниатюрные конструкции на одном кристалле, объединяющем чувствительные элементы, преобразующие и электронные компоненты. Широкий спектр этих датчиков относят к классу микроэлектромеханических систем (МЭМС).

МЭМС, в частности гироскопы и акселерометры, относятся к классу инерциальных датчиков, диапазон применения которых очень широк. С 1990-х годов они нашли применение в медицине и гражданской промышленности – автомобилестроении, роботостроении и т.д. В последующем, микромеханические приборы получили применение в изделиях военной техники и до сих пор спрос на МЭМС продолжает расти. На данный момент потребность в МЭМС очень велика: от подушек безопасности и антиблокировочных автомобильных устройств до интегрированных со спутниковыми навигационными системами малогабаритных инерциальных навигационных систем, обеспечивающих определение параметров ориентации и навигации летательных аппаратов, надводных и подводных аппаратов, наземных транспортных средств. Активное развитие микромеханических технологий, расширение области применения, большой объем проводимых исследований позволили значительно увеличить объём мирового рынка МЭМС и в 2017 году достигнуть 21 млрд. долл. Также были значительно улучшены точностные характеристики, в частности, нестабильность нулевого сигнала достигла уровня  $0,1 \dots 10$  °/час.

Среди российских предприятий и институтов, работающие над созданием МЭМС, необходимо отметить: АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса», ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Гирооптика», филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». Среди зарубежных фирм-разработчиков известны: «Murata Manufacturing Co., Ltd.» (Япония), «Honeywell, Inc.» (США), «Analog Devices, Inc.» (США), British Aerospace Systems and Equipment (BASE) (Великобритания), «Silicon Sensing Systems Ltd.» (Англия), «MTMirosystems CO.,Ltd.» (Китай). В целом, создание ММГ в РФ находится на этапе разработки опытных образцов и мелкосерийного производства.

В настоящее время в АО «ИТТ» разработан и выпускается твердотельный вибрационный кольцевой микромеханический гироскоп (КМГ). В ходе выполнения диссертационной работы и проведения серийного освоения были значительно улучшены параметры гироскопа, в частности, нестабильность нулевого сигнала прибора была уменьшена с 20...30 °/час до 3...7 °/час, тренд нулевого сигнала и температурная чувствительность были уменьшены более чем в 10 раз.

Для решения задачи улучшения характеристик КМГ необходимо было проведение тщательного анализа конструкции гироскопа, анализ используемых технических решений и использование математического моделирования. Были проанализированы параметры, характеризующие точностные и другие характеристики гироскопа.

Одним из параметров, характеризующем точность прибора, является дрейф волновой картины в запуске. Для уменьшения дрейфа волновой картины необходимо минимизировать потери энергии в колебательной системе. Эти потери возникают из-за механических напряжений и конструктивных дефектов, возникающих при изготовлении чувствительного элемента (ЧЭ – кольцо с упругими поддерживающими перемычками (ламелями) и напыленными на его поверхность обмотками), приводя к уменьшению его добротности. Увеличение точности КМГ препятствует то, что уменьшение только одной погрешности не приведет к желаемому результату. Тем самым необходим комплексный подход к решению данной проблемы. Необходимо учитывать не только влияние технологических и конструктивных дефектов, но и влияние газовой среды на работу прибора.

Повышению точностных характеристик КМГ в условиях широких температурных и механических воздействий посвящена данная диссертационная работа. Поэтому развитие и создание КМГ в РФ с нестабильностью нулевого сигнала не более 10 °/час является актуальной задачей. Актуальность работы также связана с развитием технологии информационных, управляющих, навигационных систем и микросистемной техники.

**Цель диссертации** заключается в повышении точностных характеристик КМГ за счет выявления причин ошибок и их устранения путем введения новых конструктивных и технологических решений. Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. Проведен анализ технологических факторов, влияющих на точностные характеристики КМГ в заданном диапазоне температур [-60 °С...+60 °С].
2. Создана методика снижения расщепления собственной резонансной частоты методом лазерной абляции в области центрального сечения кольца.
3. Определено влияние газового демпфирования на характеристики КМГ и проведен расчет рабочего диапазона давлений.
4. Установлено влияние технологических факторов на параметры ЧЭ и причины возникновения деформации ламелей, которые передают механические напряжения на кольцо ЧЭ, проведен численный анализ их влияния на точность КМГ.

## **Методы исследований**

Для решения поставленных задач в работе использовались методы и аппарат теоретической механики, теории колебаний, цифровой обработки информации, методы численного моделирования, технологические и конструкторские методы.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

1. Разработана оригинальная методика балансировки кремниевого кольцевого ЧЭ методом лазерной абляции, позволяющая снизить расщепления собственной частоты по второй форме колебаний от 30 Гц до 0,01 Гц.

2. Найдено критическое давление газовой среды для данной конструкции ЧЭ, при котором достигается отсутствие скачкообразного изменения амплитуды колебаний, несимметричности АЧХ ЧЭ, появления второго резонансного пика на АЧХ ЧЭ при изменении температуры внешних воздействий.

3. Проведены теоретические и экспериментальные оценки изменения синфазной и квадратурной составляющей сигнала, а также влияния толщины осаждаемого материала и подложки, имеющие разные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), на дрейф нулевого сигнала.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Разработана, апробирована и внедрена в технологический процесс серийного производства КМГ методика и технология балансировки ЧЭ. Изготовлена, настроена и внедрена установка для балансировки ЧЭ.

2. Изучено влияние газовой среды на точностные и динамические характеристики КМГ. Определен рабочий диапазон давления газовой среды, обеспечивающий стабильные выходные характеристики КМГ и повышение точности.

3. Выработанные в диссертации рекомендации внедрены в производстве при серийном изготовлении КМГ в АО «ИТТ»

4. Реализован серийный выпуск КМГ с точностными характеристиками, улучшенными более чем в 3 раза.

**Положения, выносимые на защиту**

1. Уменьшение расщепления собственной резонансной частоты до величины 0,01 Гц (начальная величина может составлять до 30 Гц) достижимо с использованием лазерного удаления материала с определением мест удаления на кольце ЧЭ по формуле, разработанной автором.

2. Вязкость газовой среды негативно влияет на точностные параметры КМГ. Её влияние минимально при давлении ниже 70 мм.рт.ст.

3. Механические напряжения, возникающие при изготовлении ЧЭ, при действии отрицательных температур вызывают увеличение синфазной и квадратурной составляющей выходного сигнала, которые приводят к увеличению дрейфа волновой картины и ухудшению точностных характеристик КМГ.

**Степень достоверности** научных и практических результатов подтверждается сопоставлением аналитических результатов и данных,

полученных в ходе моделирования и расчетов, а также полученных в результате проведенных экспериментальных исследований с опытной партией приборов.

**Внедрение результатов.** Полученные в диссертации результаты внедрены в АО «ИТТ» при разработке и серийном производстве микромеханических гироскопов и приборов на их основе.

**Личный вклад автора** состоит в разработке оригинальной методики лазерной балансировки ЧЭ, позволяющей уменьшить расщепление собственной резонансной частоты, и экспериментальном подтверждении ее эффективности. Автором проведено исследование влияния демпфирования газовой среды на работу КМГ и определение рабочего диапазона давлений. Выявлены причины появления технологических погрешностей изготовления ЧЭ, проведена оценка их влияния на точностные характеристики КМГ, даны рекомендации по их уменьшению, а также выработке новых конструкторских и технологических решений.

#### **Апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2012); научно – техническом семинаре «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы», посвященному 75-летию кафедры ИУ-2 «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Баумана (Москва, 2013); 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2015); XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2017); 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2017).

#### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах, из них 3 статьи в научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК РФ, общим объемом 3,1 п.л.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, в тексте имеется 80 рисунков, 8 таблиц, список литературы содержит 88 библиографических наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, решаемой в диссертации, сформулированы цель и задачи исследований. Изложены научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится описание разработанного при участии автора в АО «ИТТ» КМГ, его конструкция и принцип работы. Представлены наиболее

значимые погрешности и дефекты изготовления ЧЭ, наличие которых приводит к ухудшению точности КМГ. Также указаны возможные пути уменьшения некоторых из них.

Установлено какие ошибки будут возникать при работе сервисной электроники из-за наличия такого дефекта, как расщепление собственной резонансной частоты. Проведен численный модельный расчет механических потерь в конструкции КМГ, возникающие при колебаниях ЧЭ и выявлены наиболее значимые, уменьшение которых приведет к увеличению добротности и точности КМГ.

Внешний вид ЧЭ, условное обозначение напыленных обмоток, электрических осей и вторая форма колебаний представлены на Рис. 1 и 2.

ЧЭ КМГ является тонкий (толщиной  $100 \cdot 10^{-6}$  м) упругий осесимметричный резонатор (кольцо), совершающий изгибные колебания по второй основной форме. Кольцо подвешено на Z-образных упругих элементах (ламели), не оказывающих заметного влияния на изгибные колебания кольца. Кроме того, на поверхности кольца и ламелей напыляются проводники токовых петель, и контактов для внешних выводов ЧЭ, тем самым, конструктивно разделяя кольцо на восемь сегментов. Материалом для проводников служит алюминий. Кольцо ЧЭ с помощью ламелей подвешено в магнитном поле, образованном специальной магнитной системой, состоящей из магнита, верхнего магнитопровода и нижнего магнитопровода, изготовленных из магнитомягкого материала. Магнитная цепь выполнена таким образом, чтобы обеспечить максимальное магнитное поле в зоне расположения кольца резонатора.

Таким образом ЧЭ имеет восемь электрических обмоток. Условно, часть из них являются системой возбуждения (актюаторы и датчики возбуждения: ось X1-Y1), а часть – системой измерения (актюаторы и датчики измерения: ось X2-Y2).

Неидеальности геометрических параметров и (или) материала резонатора, приводящие к нарушению осевой симметрии, влекут за собой ухудшение точностных характеристик. Это связано с тем, что при наличии остаточного дебаланса масс на кольце ЧЭ, неоднородностей и напряжений материала возникает эффект расщепления собственной частоты резонатора.

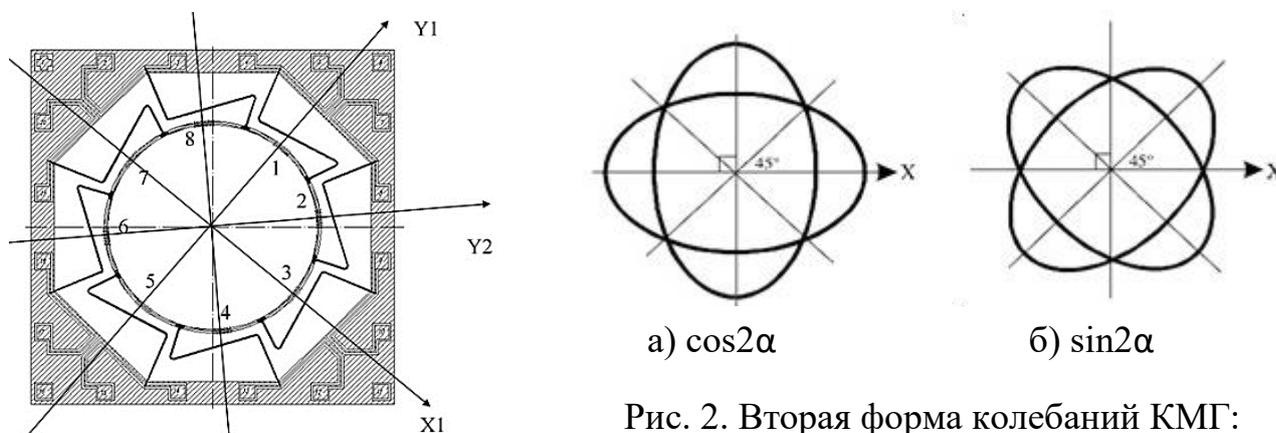


Рис. 1. Внешний вид ЧЭ. Обозначение осей ЧЭ и номера обмоток

Рис. 2. Вторая форма колебаний КМГ: а) под углом  $0^\circ$  ( $\cos 2\alpha$ ) к оси возбуждения; б) под углом  $45^\circ$  ( $\sin 2\alpha$ ) к оси возбуждения при появлении угловой скорости

Также это приводит к появлению квадратурной составляющей сигнала, что негативно сказывается на точности приборов, приводя к ухудшению дрейфа и появлению прецессии волны на неподвижном основании. Величина дрейфа при наличии таких погрешностей может составлять сотни град/час.

**В второй главе** проанализированы причины, приводящие к возникновению расщепления собственной частоты на основе теории Журавлева – Климова. Приведена разработанная оригинальная методика балансировки ЧЭ, описаны результаты экспериментальных работ по определению таких зависимостей, как собственной резонансной частоты, ее расщепления, угла расположения «тяжелой» оси и изменение величины синфазной и квадратурной составляющей выходного сигнала КМГ по каналу измерения от величины удаляемых масс.

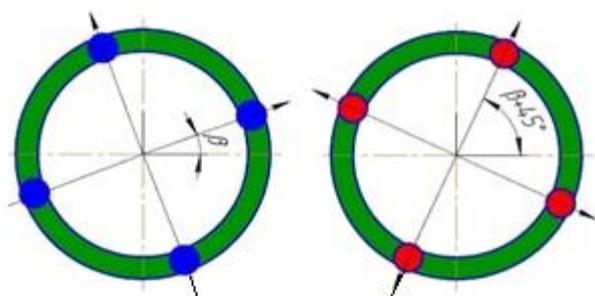
Технологические погрешности, сопутствующие изготовлению кремниевой пластины, её нарезания из слитка кремния, из-за разнотолщинности кремниевой пластины будут вызывать анизотропию упругих и диссипативных свойств материала ЧЭ. Эта анизотропия свойств вызывает расщепление собственной частоты изгибных колебаний:

$$\Delta = f_2 - f_1, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – расщепление собственной частоты, Гц;  $f_1$  – минимальная резонансная частота, Гц;  $f_2$  – максимальная резонансная частота, Гц.

Точность вибрационных гироскопов может быть существенно увеличена благодаря совмещению частот колебаний по двум осям, т.е. при  $\Delta \rightarrow 0$ . Это реализуется путем балансировки ЧЭ методом удаления масс в определенных точках кольца применительно к каждой моде. При балансировке ЧЭ основное внимание следует уделять четвертой гармонике упруго-массового дисбаланса, поскольку эта гармоника вызывает расщепление частоты на порядок больше, чем остальные гармоники массового дефекта.

Удаление материала необходимо производить из области нейтрального сечения кольца, в котором практически нет напряжений от растяжения или сжатия. При этом жесткость кольца изменяться не будет. Для изменения частоты по оси возбуждения необходимо удалять материал массой  $m$  по кольцу с шагом  $90^\circ$  с начальным смещением  $\beta$ , являющимся углом между осевой линией колебаний второй моды и осевой линией резонаторного кольца. Аналогично, для изменения



Удаление материала

Рис. 3. Области удаления материала с поверхности кольца

частоты по каналу измерения, необходимо удалять материал массой  $m$  по кольцу с шагом  $90^\circ$  с начальным смещением  $\beta+45^\circ$ , как показано на Рис. 3.

Чтобы устранить 1 Гц расщепления частоты, надо убрать массу  $m_n = 3,67 \cdot 10^{-11}$  кг.

Так как балансировка резонатора проводится в 4-х ортогональных положениях, то в

одном секторе величина удаляемой массы составит:  $\frac{m_{л}}{4} = 0,92 \cdot 10^{-11} \text{ кг}$ . При этом, в единицах объёма масса удаляемого материала в одном секторе одной лунки составит  $\approx 3,95 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$ . При диаметре лунки  $\approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , её глубина составит  $\approx 60 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

Для определения пространственного расположения формы колебаний резонатора по второй моде используют сигналы датчиков. Пусть напряжение возбуждения подается на актюаторы 1 – 5, а выходной сигнал снимается с датчиков вибрации 2 – 6 – напряжение  $U_2$  и 3 – 7 – напряжение  $U_3$  (см. Рис 1). Уравнения для выходных сигналов  $U_2$ ,  $U_3$  по двум соседним каналам можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_2 \sin(\omega t + \psi_2) = U_2 \cos(\psi_2) \sin(\omega t) + U_2 \sin(\psi_2) \cos(\omega t); \\ U_3 &= U_3 \sin(\omega t + \psi_3) = U_3 \cos(\psi_3) \sin(\omega t) + U_3 \sin(\psi_3) \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_2, U_3$  – амплитуды сигналов двух соседних по кольцу пар датчиков 2-6 и 3-7 соответственно;  $\psi_2, \psi_3$  – фазы сигналов датчиков относительно фазы напряжения возбуждения;  $\omega$  – угловая частота.

Уравнения для определения выходных сигналов датчиков колебаний резонатора будем искать отдельно в виде функций: синфазной составляющей при  $\sin(\omega t)$  и квадратурной составляющей при  $\cos(\omega t)$ .

$$U_i = U_c \cos(2\varphi_i + \varphi_c) \sin(\omega t) + U_s \sin(2\varphi_i + \varphi_s) \cos(\omega t), \quad (3)$$

где  $U_c, U_s$  – амплитуды распределения выходного напряжения по окружности кольца синфазного и квадратурного сигнала;  $\varphi_i$  – угол установки  $i$  – го датчика ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ ), за начало отсчета принимается середина вибратора 1, положительное направление – по часовой стрелке;  $\varphi_c, \varphi_s$  – начальные углы положения распределения амплитуды синфазных и квадратурных колебаний по окружности кольца.

Рассмотрим методику определения параметров уравнения (3). С учетом уравнений (2) и (3) можно записать для датчиков 2 – 6 и 3 – 7:

$$\varphi_2 = 45^\circ \text{ – датчики 2 – 6}$$

$$\begin{aligned} U_2 &= -U_c \sin(\varphi_c) \sin(\omega t) + U_s \cos(\varphi_s) \cos(\omega t); \\ U_2 &= U_2 \cos(\psi_2) \sin(\omega t) + U_2 \sin(\psi_2) \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varphi_3 = 90^\circ \text{ – датчики 3 – 7}$$

$$\begin{aligned} U_3 &= -U_c \cos(\varphi_c) \sin(\omega t) - U_s \sin(\varphi_s) \cos(\omega t); \\ U_3 &= U_3 \cos(\psi_3) \sin(\omega t) + U_3 \sin(\psi_3) \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (5)$$

Приравнивая коэффициенты при  $\sin(\omega t)$  и  $\cos(\omega t)$ , можно определить все необходимые величины ( $\varphi_c$  и  $\varphi_s$ ).

Запишем следующую формулу:

$$\Delta = \frac{K \cdot D \cdot f \cdot A^2}{R_0^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta$  – расщепление резонансной частоты, Гц;  $K$  – номер моды;  $D$  – коэффициент, равный 0,19;  $f$  – резонансная частота, Гц;  $A$  – амплитуда колебания, мкм;  $R_0$  – радиус кольца ЧЭ, мкм.

Формула (6) показывает, какое можно иметь максимальное расщепление резонансной частоты, чтобы была минимальная прецессия гироскопа. Подставив все величины, получим, что для прибора такого типа как КМГ, максимально допустимая величина расщепление частоты должна быть не более 0,14 Гц (разработанная методика балансировки ЧЭ позволяет уменьшить расщепление собственной частоты до величины 0,01 Гц). При такой величине расщепления частоты не будут возникать фазовые ошибки в электронике. На Рис. 4 и 5 представлены осциллограммы одного из отбалансированных ЧЭ.

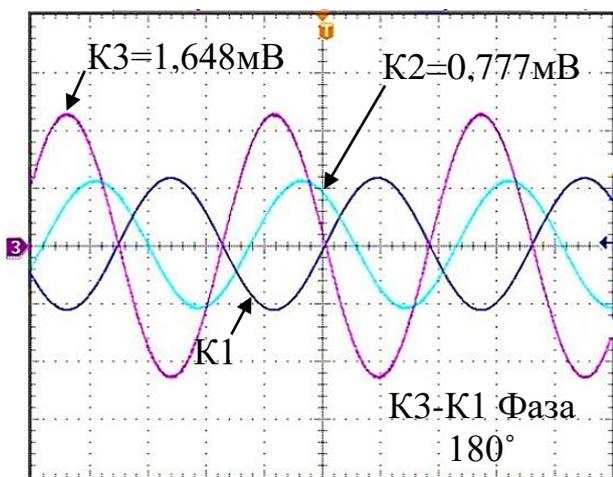


Рис. 4. Выходные сигналы до балансировки

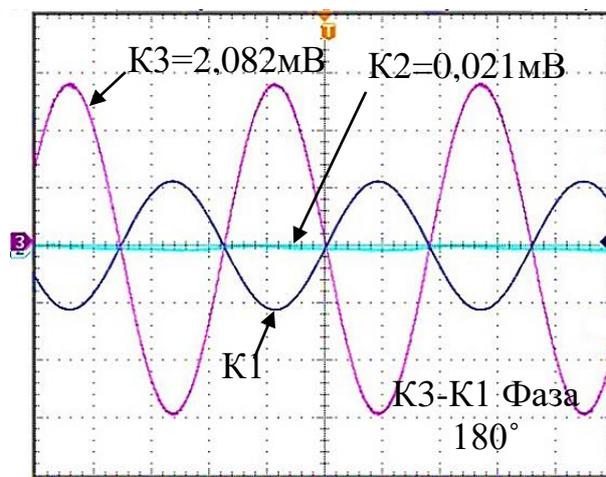


Рис. 5. Выходные сигналы после балансировки

Здесь  $K1$  – опорный сигнал для синхронизации осциллографа,  $K2$  – сигнал по первому каналу ( $\cos 2\alpha$ ),  $K3$  – сигнал по второму каналу ( $\sin 2\alpha$ ). В приведенном примере амплитуда сигнала  $K2$  уменьшилась в 37 раз, с 0,778 мВ до 0,021 мВ. Именно этот канал подвергался балансировке. Наличие такого сигнала до балансировки говорило о большой ошибке по угловой скорости при отсутствии её. По окончании балансировки квадратурная и синфазная составляющая этого сигнала сведены к минимуму, что положительно влияет на повышение точности прибора. Расщепление резонансной частоты после балансировки составляет 0,05 Гц (было 8,1 Гц).

**В третьей главе** приведены результаты исследования по определению зависимостей изменения добротности, резонансной частоты, её расщепления, нулевого сигнала от давления внутрикорпусной газовой среды. Проведены экспериментальные работы по определению температурных напряжений ЧЭ при различных внутрикорпусных давлениях. Определен рабочий диапазон давлений для вакуумирования КМГ. Проведено искусственное старение прибора с целью определения устойчивости внутрикорпусного давления в зависимости от интенсивности газовыделения клеевых соединений и степени герметичности корпуса.

Влияние газовой среды в КМГ объясняется двумя механизмами.

Первый является обычным газовым сопротивлением — при колебаниях кольца ЧЭ молекулы остаточного газа соударяются с ним, в результате чего возникает тормозящая сила, вызывающая потерю энергии упругих колебаний.

Второй механизм связан с течением вязкого газа через зазоры между резонатором и другими элементами конструкции. Этот процесс вязкого трения происходит с фазовым запаздыванием относительно колебаний резонатора. Оба процесса сопровождаются необратимым превращением энергии колебаний в

теплоту. Для определения демпфирующих свойств газовой среды используем изменение добротности ЧЭ. На Рис. 6 представлен экспериментально полученный автором график изменения добротности колебательной системы от давления. Перегибы на этой зависимости из-за того, что с уменьшением давления меняются условия отвода тепла от кольца ЧЭ. Меняется температура или

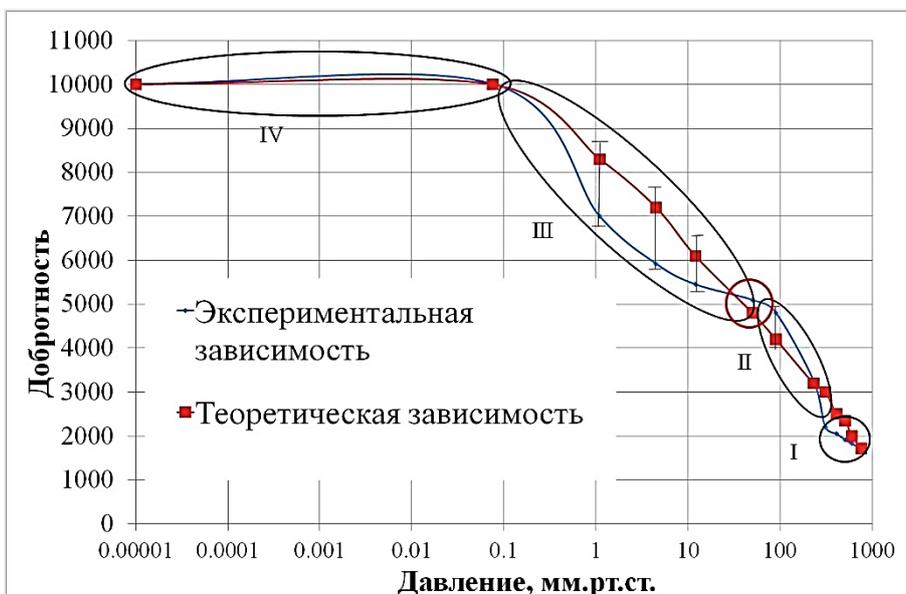


Рис. 6. Зависимость добротности КМГ от давления

распределение температуры на кольце ЧЭ. Все это влияет на добротность. Механизм влияния давления сложный и влияющих процессов может быть несколько, и данная зависимость — это опытный результат для практического использования.

Данный график можно разделить на 4 зоны. Каждая зона характеризуется своей динамикой изменения добротности, резонансной частоты, несимметричностью АЧХ ЧЭ, возможными срывами колебаний, разбалансировкой ЧЭ и наличием второго резонансного пика на АЧХ ЧЭ. На основании выше сказанного рабочим диапазоном для вакуумирования является граничный участок между II и III зонами, ( $50 \pm 20$  мм.рт.ст. при  $Q = 5000 \pm 200$ ). При температуре минус  $60^\circ\text{C}$  добротность возрастёт до 10000 за счет уменьшения термоэластичного демпфирования. При этом расщепление частоты должно быть не более 0,05 Гц, чтобы величина фазового сдвига в канале компенсации внесла минимальную ошибку рассогласования при подавлении квадратурной и синфазной составляющей сигнала. При выбранном диапазоне внутрикорпусного давления были проведены температурные испытания приборов.

В Таблице 1 приведены зависимости расщепления резонансной частоты, добротности и нулевого сигнала. По полученным данным Таблице 1 можно сделать вывод о том, что расщепление резонансной частоты практически не зависит от

изменения температуры для выбранного диапазона вакуумирования. Добротность имеет линейную зависимость изменения от температуры.

Таблица 1.

Зависимость расщепления собственной частоты, добротности и нулевого сигнала от температуры

Температура, °С	$\Delta f$ , Гц	Добротность	Нулевой сигнал, %/сек
-60	0,028±0,005	9680±50	2,6±0,05
-40	0,068±0,005	8300±50	3,5±0,05
-20	0,035±0,005	7180±50	4,2±0,05
0	0,026±0,005	6350±50	5,0±0,05
20	0,050±0,005	5400±50	6,4±0,05
40	0,064±0,005	5170±50	7,9±0,05
60	0,026±0,005	4570±50	9,4±0,05

Вакуумирование приборов позволило уменьшить температурную чувствительность. На Рис. 7 представлены температурные изменения нулевого сигнала прибора при внутрикорпусном давлении 760 мм.рт.ст. (до вакуумирования) и 50 мм.рт.ст. (после вакуумирования).

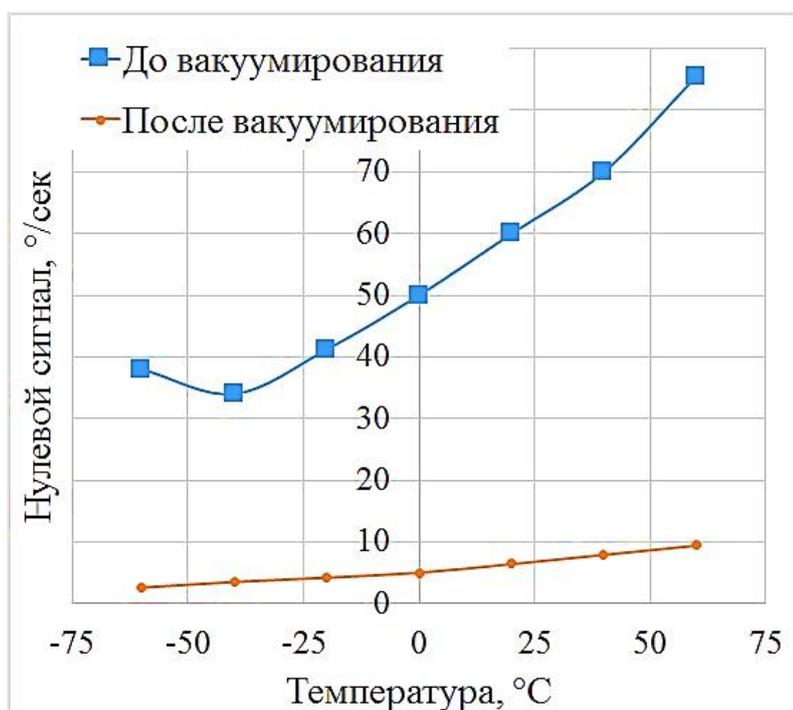


Рис. 7. Изменение нулевого сигнала в диапазоне температур [-60 °С...+60 °С] прибора при внутрикорпусном давлении 760 мм.рт.ст. и 50 мм.рт.ст.

Температурная чувствительность при давлении 760 мм.рт.ст. составляет 1680 °/час/°С, а при давлении 50 мм.рт.ст. — 203 °/час/°С. Уменьшение в 8 раз.

Заключительным этапом исследований являлась проверка устойчивости внутрикорпусного давления в зависимости от интенсивности газовыделения клеевых соединений и степени герметичности корпуса в течении всего срока эксплуатации приборов (≈10 лет). При изготовлении КМГ применяется клей для соединения различных металлических и неметаллических материалов. Основным недостатком клеевых соединений является выделение летучих

компонентов в вакууме, приводящее к ухудшению характеристик вакуумного прибора.

В связи с этим низкое газоотделение является одним из основных технологических требований, предъявляемых к клею, при его использовании в вакуумированных приборах.

Проводя искусственное старение прибора по типовой методике ускоренных испытаний на сохраняемость при хранении, можно симитировать весь срок работы прибора и по замеренной добротности и графику зависимости добротности от давления (Рис. 8) можно оценить уровень внутрикорпусного давления.

По данным Рис. 8 видно, что через 10 лет искусственного старения, добротность в приборе не изменилась (незначительные отклонения связаны с погрешностью определения и расчета). Это говорит о том, что газовыделение используемого клея не влияет на внутрикорпусное давление и не приводит к уменьшению добротности.

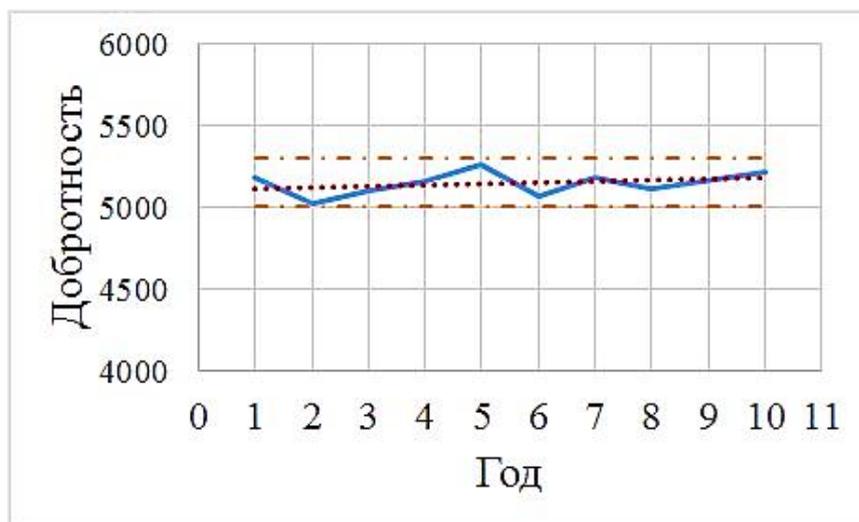


Рис. 8. Изменение добротности от циклов искусственного старения

В четвертой главе рассмотрены дефекты, возникающие при изготовлении ЧЭ и их влияние на его работу. Проведено 3D моделирование и численный расчет влияния этих дефектов на температурные напряжения в конструкции ЧЭ, а также их влияние на величину и погрешность выходного сигнала. Собраны опытные образцы приборов на ЧЭ с уменьшенными дефектами и проведены экспериментальные исследования, направленные на определение их точностных характеристик. Представлены сравнительные характеристики данных приборов.

В силу малых размеров ЧЭ и дефектов материала в процессе изготовления ЧЭ, возникают погрешности, приводящие к отклонению от заданных геометрических размеров. Также при выращивании оксидной пленки на поверхности ЧЭ и неоднородности используемого материала возникают напряжения в материале ЧЭ. Все это приводит к появлению погрешностей, которые в свою очередь приводят к ухудшению точностных характеристик.

Внутренние механические напряжения ( $\sigma_m$ ), возникающие в полупроводниковых структурах ЧЭ, обуславливаются структурными – ( $\sigma_c$ ) и температурными ( $\sigma_T$ ) напряжениями:

$$\sigma_m = \sigma_c + \sigma_T. \quad (7)$$

Структурные напряжения возникают в процессе формирования металлизации, изолирующего слоя; их размер и знак зависят от материала элемента и пластины, условий формирования, структуры материала. В данном случае используется монокристаллический кремний и оксид кремния. Значение и характер температурных напряжений зависят от условий (разницы температур) формирования и эксплуатации ЧЭ, материалов подложки и формируемых слоев, а также конфигурации элементов ЧЭ.

Рассмотрим составляющие механического напряжения для структур ЧЭ:

а) структурные напряжения  $\sigma_c$ :

– для пленочных структур используем формулу Стоуни:

$$\sigma_c = \frac{E_s l_s^2}{6(1-\mu_s)l_f R_C}, \quad (8)$$

где  $l_s$ ,  $l_f$  – соответственно толщины подложки и пленки;  $R_C$  – радиус изгиба структуры;  $d$  – диаметр структуры (подложки);  $\mu_s$  – коэффициент Пуассона подложки;  $E_s$  – модуль Юнга подложки.

Структурные напряжения можно условно считать постоянными во времени и независимыми от температуры эксплуатации. Структурные напряжения релаксируют, но скорость релаксации такова, что на практике ей пренебрегают.

б) термонапряжения  $\sigma_T$ :

В отличие от структурных, термические напряжения напрямую зависят от температуры эксплуатации, поэтому её влияние может привести к деградации параметров или к разрушению кристаллов ЧЭ. Напряжения, возникающие в подложке (Si) и в пленке (SiO<sub>2</sub>), могут быть оценены по формуле:

$$\sigma_{Si}^{max} = \frac{\frac{E_1 h_1^3}{1-\mu_1} + \frac{E_2 [h_2^3 + 3h_2^2(h_1+h_2)]}{1-\mu_2}}{6R h_2 (h_1+h_2)}, \quad \sigma_{SiO_2}^{max} = \frac{\frac{E_1 h_2^3}{1-\mu_2} + \frac{E_1 [h_1^3 + 3h_1^2(h_1+h_2)]}{1-\mu_1}}{6R h_1 (h_1+h_2)}, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус изгиба структуры при термическом напряжении;  $h = h_1 + h_2$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – ТКЛР пленки и подложки соответственно;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $E_1$  и  $E_2$  – толщины и модули Юнга пленки и подложки соответственно. Учитывая, что  $h_1 \ll h_2$ , получаем:

$$\sigma_{Si}^{max} = \frac{2E_2 h_2}{3R(1-\mu_2)} = c_2 \frac{h_2}{R}, \quad \sigma_{SiO_2}^{max} = \frac{E_2 h_2^2}{6R h_1 (1-\mu_2)} = c_1 \frac{h_2^2}{R h_1}, \quad (10)$$

где  $c_1 = 0,29 \cdot 10^5$  МПа и  $c_2 = 1,16 \cdot 10^5$  МПа.

$$R = \frac{1}{6} \frac{h \left[ 3 \left( 1 + \frac{h_1}{h_2} \right)^2 + \left( 1 + \frac{E_1 h_1}{E_2 h_2} \right) \left( \frac{h_1^2}{h_2^2} + \frac{E_2 h_2}{E_1 h_1} \right) \right]}{(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) \left( 1 + \frac{h_1}{h_2} \right)}. \quad (11)$$

Для системы SiO<sub>2</sub>–Si имеем:  $E_1 \approx E_2$ , а  $h_1 = h_{SiO_2} \ll h_2 = h_{Si}$ , при этом (11) может быть значительно упрощена:

$$R = \frac{E_2 h_2^2}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) E_1 h_1}, \quad (12)$$

где  $T_0$  – начальная температура;  $T$  – температура окисления.

Рассчитаем радиус изгиба структуры по формуле (12), используя справочные данные:  $E_1=0,8 \cdot 10^5$  МПа для ( $\text{SiO}_2$ ),  $E_2=1,3 \cdot 10^5$  МПа для ( $\text{Si}$ ),  $\mu_1=0,18$ ,  $\mu_2=0,25$  и, учитывая, что  $h_1 \ll h_2$ ,  $\Delta T=1030$  К, получаем,

$$R \approx \frac{-1 \cdot 10^2 h_2^2}{h_1} \quad (13)$$

Знак минус в (13) указывает на выпуклость композиционной структуры Si –  $\text{SiO}_2$ .

Для  $h_{\text{SiO}_2} = 1 \cdot 10^{-6}$  м и кремниевой пластины толщиной  $h_{\text{Si}} = 380 \cdot 10^{-6}$  м по формуле (13) получим радиус кривизны равный  $|R| \approx 14$  м. Таким образом, при диаметре пластины в 0,1 м максимальное отклонение составляет  $88 \cdot 10^{-6}$  м.

Подставляя (13) в (10), рассчитаем термические напряжения:

$$\sigma_{\text{Si}} = -\frac{c_2 h_{\text{SiO}_2}}{1 \cdot 10^2 h_{\text{Si}}} \approx 3,1 \text{ МПа}, \quad \sigma_{\text{SiO}_2} = -\frac{c_1}{1 \cdot 10^2} \approx -3,0 \cdot 10^2 \text{ МПа.} \quad (14)$$

Исходя из полученных значений механических напряжений для структур системы Si- $\text{SiO}_2$ , можно утверждать, что термонапряжения в окисной пленке – сжимающие, а в подложке – растягивающие.

При производстве ЧЭ в результате применения высоких температур и материалов с разными ТКЛР возникают «прогибы» ламелей, которые представлены на Рис. 9-11. Величина «прогиба» составляет  $\approx 3 \cdot 10^{-6}$  м.



Рис. 9. Область «прогиба» ламели относительно рамки ЧЭ

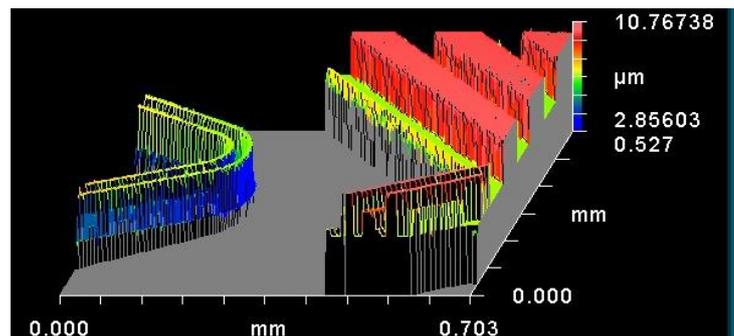


Рис. 10. «Прогиб» части ламели относительно рамки ЧЭ

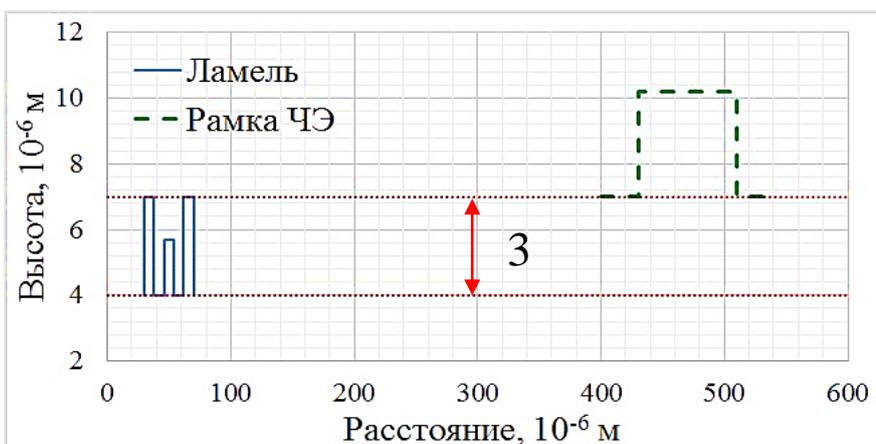


Рис. 11. «Прогиб» части ламели относительно рамки ЧЭ

Проектирование и расчет такой модели ЧЭ показали следующие зависимости. На Рис. 12-13 представлены результаты моделирования действия температуры на конструкцию ЧЭ и возникновение деформаций в структуре ЧЭ. На Рис. 12 представлены деформации ЧЭ при

действии температуры минус 60 °С с «прогибом» ламелей в  $3 \cdot 10^{-6}$  м. Аналогичные деформации кольца ЧЭ и при температуре плюс 60 °С, только кольцо выгибается в другую сторону.

На Рис. 13 представлена модель ЧЭ, у которого при реализации «Bosch» - процесса (процесс глубокого анизотропного травления кремния в плазме высокочастотного индукционного разряда) с помощью установки, на которой изготавливается ЧЭ, при изготовлении допускается отклонение от вертикальности стенок по  $3 \cdot 10^{-6}$  м на сторону при глубине травления в  $100 \cdot 10^{-6}$  м.

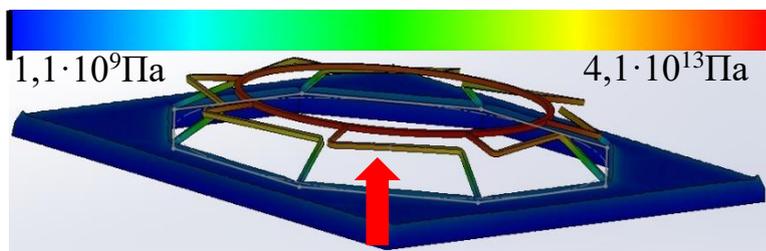


Рис. 12. Деформации резонатора при температуре минус 60 °С. Прогибы ламелей. Перемещение кольца

На Рис. 13 представлены деформации ЧЭ при температуре минус 60 °С с уходом от вертикальности стенок при травлении в  $3 \cdot 10^{-6}$  м. Аналогичные деформации и при температуре плюс 60 °С, только загибы ламелей в

другую сторону. Из Рис. 13 видно, что данный тип погрешности вносит существенные напряжения на ламели, которые в свою очередь передают их на кольцо. Получается такой эффект, когда ламели пытаются вывернуть кольцо внутренней кромкой наружу.

Все перечисленные выше дефекты («прогибы» ламелей и отклонение от вертикальности стенок) на температуре приводят к увеличению на выходе измерительного канала сигнала синфазной и квадратурной составляющей. Стоит отметить, что наиболее сильно эти дефекты проявляются на отрицательных температурах.

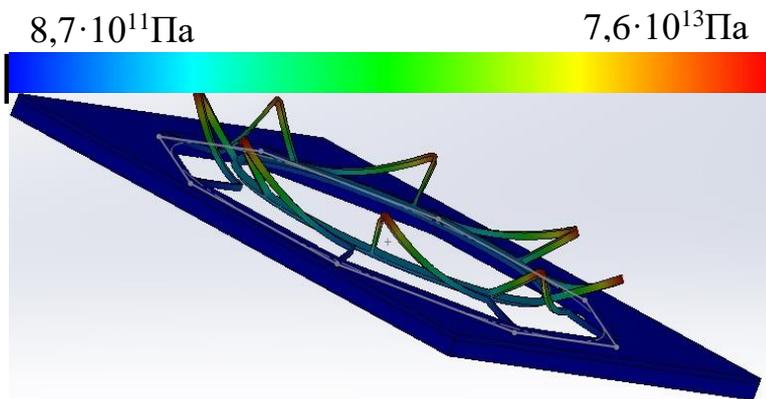


Рис. 13. Деформации резонатора при температуре минус 60 °С. Отклонение от вертикальности стенок. Перемещение ламелей

Чем ниже температура, тем сильнее эффект.

Появление квадратурной составляющей приводит к тренду нулевого сигнала при стабильной температуре в запуске. На Рис. 14, в качестве примера, представлены зависимости выходных сигналов двух опытных КМГ от температуры. Здесь КМГ-1 прибор, имеющий описанные выше дефекты, а КМГ-2 прибор, с уменьшенной величиной дефектов.

На Рис. 15 приведена зависимость тренда нулевого сигнала от температуры опытных КМГ.

На Рис. 15 приведена зависимость тренда нулевого сигнала от температуры опытных КМГ.

В Таблице 2, в качестве примера, представлены сравнительные точностные характеристики КМГ после балансировки, вакуумирования и уменьшения погрешностей в ЧЭ.

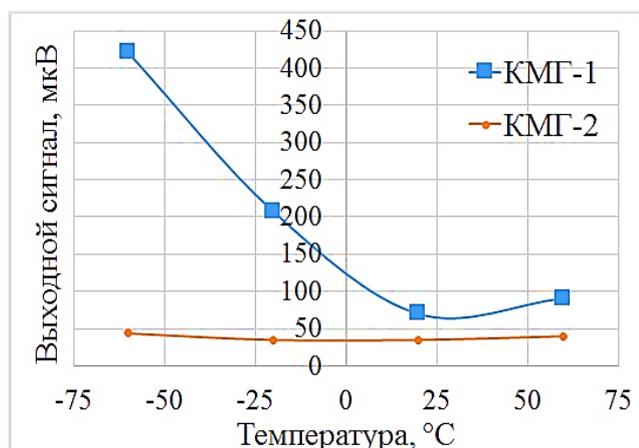


Рис. 14. Выходные сигналы двух опытных КМГ при различных температурах

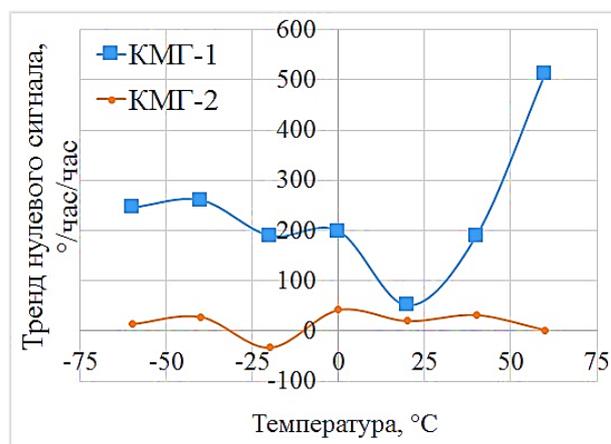


Рис.15. Тренд нулевого сигнала в запуске двух опытных КМГ при различных температурах

Таблица 2.

Параметры КМГ исходного состояния и после уменьшения погрешностей в ЧЭ

№	Наименование погрешности	Требуемые значения	КМГ после балансировки	КМГ после вакуумирования	КМГ после уменьшения погрешностей в ЧЭ
1	Тренд нулевого сигнала	$\leq \pm 80$ °/час/час	$\leq \pm 1200$ °/час/час	$\leq \pm 500$ °/час/час	$\leq \pm 90$ °/час/час
2	Нестабильность нулевого сигнала	$\leq 10$ °/час	15...20 °/час	10...15 °/час	3...7 °/час
3	Температурная чувствительность КМГ	$\leq 150$ °/час /°C	$\leq 2000$ °/час /°C	$\leq 300$ °/час /°C	$\leq 170$ °/час /°C

По данным из Таблицы 2, после вакуумирования видно существенное уменьшение тренда нулевого сигнала в запуске (уменьшение более чем в 2 раза), уменьшение нестабильности нулевого сигнала около 2 раз, а также значительное уменьшение температурной чувствительности прибора более чем в 6 раз. После уменьшения погрешностей в ЧЭ тренд нулевого сигнала уменьшился более чем в 5 раз, нестабильность нулевого сигнала – более чем в 2 раза, чувствительность к температуре – около 2 раз.

В заключительной части диссертации приведены основные результаты исследований, проведенных в рамках диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика лазерной балансировки ЧЭ, позволяющая уменьшить начальное расщепление собственной резонансной частоты кремниевого кольцевого ЧЭ от 30 Гц до 0,01 Гц. Весь процесс балансировки занимает не более 1 часа и может быть легко автоматизирован.

2. Определен необходимый уровень вакуумирования, позволивший повысить точностные характеристики КМГ, а также избежать скачкообразного изменения амплитуды колебаний механической системы и появление второго резонансного пика на АЧХ ЧЭ при действии отрицательных температур.

3. Изучены дефекты, возникающие при изготовлении ЧЭ (отклонение от вертикальности стенок конструкции и «прогибы» ламелей), приводящие к увеличению синфазной и квадратурной составляющих выходного сигнала при действии температуры.

4. Выработаны рекомендации по уменьшению конструктивных и технологических дефектов ЧЭ, уменьшение которых позволило повысить точность КМГ в среднем в 3 раза.

### **Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:**

1. Косторной А.Н., Коновалов С.Ф. Совмещение собственных резонансных частот кольцевого резонатора ММГ. Авиакосмическое приборостроение 2016г. №2. С. 3 -11 (1,125 п.л. / 1,1 п.л.).

2. Косторной А.Н. Влияние погрешностей изготовления на механические свойства и колебания ММГ. Авиакосмическое приборостроение, 2017г. №9. С. 3 -9 (0,875 п.л.).

3. Косторной А.Н. Влияние газовой среды на характеристики микромеханического вибрационного гироскопа. Авиакосмическое приборостроение, 2017г. №11. С. 3 -11 (1,125 п.л.).

4. Косторной А.Н. Исследования, направленные на повышение точностных характеристик микромеханического гироскопа // XLI Академические чтения по космонавтике посвященные памяти С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства: Сборник тезисов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. С. 496 (0,06 п.л.).

5. Косторной А.Н., Саломатин А.К., Соловьёв Ю.В. Совмещение собственных резонансных частот кольцевого резонатора ММГ // Всероссийская научно-техническая конференция Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: Тезисы докладов. М.: ФГУП «ГосНИИАС». 2012. С. 113-114 (0,125 п.л. / 0,1 п.л.).