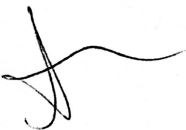


Тарасов Александр Николаевич

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА С СОВМЕЩЕННЫМИ ЧАСТОТАМИ
ВОЗБУЖДЕНИЯ И СЪЕМА**

05.11.03 – Приборы навигации

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'A' followed by a horizontal line that curves upwards at the end.

МОСКВА - 2015

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации.

Научный руководитель: **Черников Сергей Акимович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Меркурьев Игорь Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Черноморский Александр Исаевич,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «МАИ (НИУ)»

Ведущая организация: ЗАО «Инерциальные технологии
«Технокомплекса», г. Раменское

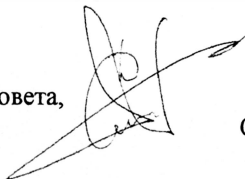
Защита диссертации состоится «28» октября 2015 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



Семеренко Денис Алексеевич

Актуальность работы. Микромеханические вибрационные гироскопы (МВГ) – гироскопы, создаваемые на основе МЭМС технологии, в своих многочисленных реализациях подтвердили целый ряд преимуществ перед традиционными гироскопами (поплавковыми, динамически-настраиваемыми, волоконно-оптическими). К преимуществам МВГ относятся малые габариты, низкое энергопотребление, быстрое время готовности и низкая рыночная стоимость.

Разработка МВГ для космических применений диктуется современной тенденцией миниатюризации космических аппаратов: созданием малоразмерных, микро- и наноспутников, которым требуются системы ориентации и стабилизации, в состав которых входят гироскопы – датчики угловой скорости. Для таких аппаратов первостепенное значение имеют требования не только к габаритно-массовым, энергетическим и стоимостным показателям, но и требования по точности. Для сегмента рынка систем управления орбитальных космических аппаратов необходима разработка МВГ с точностью порядка $10^\circ/\text{час}$.

Что касается рынка микромеханических гироскопов средней и грубой точности (от 100 до $1000^\circ/\text{час}$) применительно к автомобильной промышленности, стабилизации изображений в фото- и видеокамерах, робототехнике и т.п., то следует отметить, что этот рынок перенасыщен. В этом сегменте сильные позиции завоевали фирмы Analog Device, Murata и ряд других.

Среди российских фирм, занимающихся созданием прецизионных МВГ, необходимо отметить фирмы ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ЗАО «Инерциальные Технологии «Технокомплекса», МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Гирооптика», филиал ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова». Однако разработка МВГ в РФ находится на этапе изготовления и исследования опытных образцов и мелких серий.

Одним из средств повышения точности МВГ является использование для выходного канала высокочастотного колебательного контура в резонансном режиме. Применение резонансного режима имеет ряд трудностей, связанных с возникновением погрешности поддержания колебаний в выходном канале и замедленной реакции колебательной системы. По мере приближения к резонансу чувствительность прибора возрастает, а полоса пропускания сужается, становясь вблизи него неприемлемой для практических применений. Помимо перечисленных трудностей, существуют и другие конструктивные и технологические проблемы, усиливаемые резонансом: компенсация квадратурной помехи и снижение (компенсация) влияния нелинейных эффектов. Создание системы управления (СУ) МВГ, обеспечивающей резонансный режим работы с необходимой полосой пропускания и компенсирующей квадратурную помеху и нелинейные эффекты, является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертации является разработка и исследование принципов построения СУ МВГ с резонансным режимом работы, разработка научно-обоснованных методов измерения и компенсации квадратурной помехи, нелинейных эффектов и обеспечение необходимой полосы пропускания.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ схем СУ, на основании которого выбрана схема с раздельным импульсным управлением амплитудами и фазами колебаний МВГ резонансного типа, проведено ее теоретическое описание и осуществлена ее реализация.

2. Разработана математическая модель МВГ, учитывающая физические механизмы основных погрешностей прибора, позволяющая определить на этапе разработки характеристики гироскопа для заданных условий эксплуатации.

3. Создан алгоритм управления МВГ, компенсирующий квадратурную помеху и нелинейные эффекты.

4. Предложены следующие методики:

- модифицированная методика определения рабочих зазоров, исключаяющая влияние паразитных емкостей;
- методика определения квадратурной помехи, позволяющая разделить вклады механической и электронной подсистем МВГ;
- методика определения полосы пропускания с использованием возможностей СУ МВГ по имитации изменения частоты входного сигнала.

5. Экспериментально подтверждена работоспособность схемотехнических решений и достижимость уровня неустойчивости скорости ухода менее $10^\circ/\text{час}$ при полосе пропускания порядка 40 Гц.

Объектом исследования является МВГ с совмещенными частотами возбуждения и съема информации с кремниевым подвесом и емкостными датчиками положения (ДП) и датчиками силы (ДС).

Предметом исследования являются схемотехнические решения МВГ с совмещенными частотами возбуждения и съема информации.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи в работе использовались методы и аппарат теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического управления, цифровой обработки информации, математического анализа и компьютерного моделирования.

Научная новизна работы:

1. Создана математическая модель МВГ, позволяющая на этапе проектирования оценивать точностные характеристики МВГ, учитывающая нелинейность выходного сигнала емкостного моста, нелинейную зависимость характеристики датчика момента от изменения рабочего зазора и неортогональность осей подвеса, которая характеризует квадратурную помеху.

2. Установлена аналитическая зависимость влияния погрешностей исполнения зазоров на точностные параметры МВГ.

3. Разработан и экспериментально подтвержден новый метод определения квадратурной помехи по кривым выбега при свободном движении, возникающей из-за технологических погрешностей изготовления чувствительного элемента (ЧЭ) и неидеальностей системы наблюдения (СН).

Практическая ценность:

1. Предложенный алгоритм управления, обеспечивает компенсацию квадратурной помехи, на порядок уменьшает нелинейность емкостного датчика силы, компенсирует погрешность, вызванную асимметрией зазоров внутренней

и наружной рамок, и снижает уровень фазовых шумов выходного сигнала, что позволяет повысить точность МВГ.

2. Разработанная модифицированная методика определения зазоров в емкостных датчиках исключает влияние паразитных емкостей, за счет чего повышается точность определения величин рабочих зазоров.

3. Разработанная методика определения составляющих квадратурной помехи на выбеге, обеспечивает возможность на этапе производства ЧЭ определять их величины.

4. Предложенная методика определения полосы пропускания с использованием возможности СУ имитировать изменение входной угловой скорости, позволяет определять ее величину без использования скоростного стенда.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием корректных математических приемов, сопоставлением аналитических результатов, данных, полученных в ходе математического моделирования и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертации, используются в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова» в опытно-конструкторских и научно-исследовательских работах при разработках, изготовлении и проведении испытаний микромеханических вибрационных гироскопов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Импульсное управление амплитудами и фазами позволяет поддерживать резонансный режим работы в высокочастотном колебательном контуре МВГ с высокой точностью.

2. Алгоритм управления с компенсацией квадратурной помехи, нелинейности в электростатических датчиках силы и асимметрии зазоров в электростатических датчиках силы обеспечивает требуемые точностные характеристики МВГ для космических применений.

3. Расчетно-аналитическая модель МВГ, учитывающая квадратурную помеху и нелинейности выходного сигнала емкостного моста и элементов СУ, позволяющая оценить характеристики СУ и выходные параметры МВГ, применима на этапе разработки приборов такого типа.

Апробация работы:

Основные положения диссертации докладывались на четырех международных конференциях (на XXII международной конференции по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург, 2015; на XVII международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)», г. Москва, 2011; на международной конференции «Микро- и наноэлектроника 2012», г. Звенигород; на 3-й международной научно-технической конференции «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике. Микроэлектроника и пассивная электронная компонентная база», г. Зеленоград, 2012), на семи научно-технических конференциях (XXVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов «Датчики и системы - 2009», г. Пенза; «Новые материалы и технологии в ра-

кетно-космической технике», Звездный городок, 2011; II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения»), г. Самара, 2011; Молодежная конференция Московского отделения Академии навигации и управления движением, г. Москва, 2011; XIX Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, посвященная 50-летию первого полета человека в космос, г. Москва, 2011; II Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами, г. Москва, 2012; Научно-технический семинар кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2013).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 13-и научных работах, в том числе в трех статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ, общим объемом 2,12 п. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения и списка литературы из 66 наименований. Работа изложена на 190 страницах со 130 рисунками и 31 таблицей в тексте.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе описана конструкция МВГ разработки НИИ ПМ. Основными элементами прибора являются внешняя (канал β) и внутренняя (канал γ) рамки, инерционная масса и торсионы. Внешняя рама используется для съема информации, внутренняя - для возбуждения. Инерционная масса обладает двумя степенями свободы и может поворачиваться на малые углы вокруг осей β и γ . Съём сигналов и управление колебаниями осуществляются с помощью емкостных датчиков, образованных напыленными на стеклянную плату алюминиевыми площадками с одной стороны и кремниевым подвесом с другой. Рабочий зазор составляет 4 мкм. Сборка устанавливается в герметичный вакуумированный корпус. Механический колебательный модуль (МКМ) с составляющими его элементами (корпус, крышка, кремниевый подвес, стеклянная плата, экран, геттер) показан на Рис. 1. Изготавливается МКМ на технологической базе российских предприятий.



Рис. 1. Механический колебательный модуль

Основными конструктивными и технологическими особенностями, определяющими построение СУ, являются: использование электростатических ДП и ДС, поддержание резонанса между колебаниями внутренней и наружной рамок при максимально возможной для данной конструкции и технологии добротности. На основании анализа и макетирования различных схем была выбрана схема с опорным генератором (ОГ) на основе кварцевого резонатора (Рис.2). Номинальные уставки амплитуд колебаний по каналу γ 5,22 дуг. мин., по β - 6 дуг. сек.

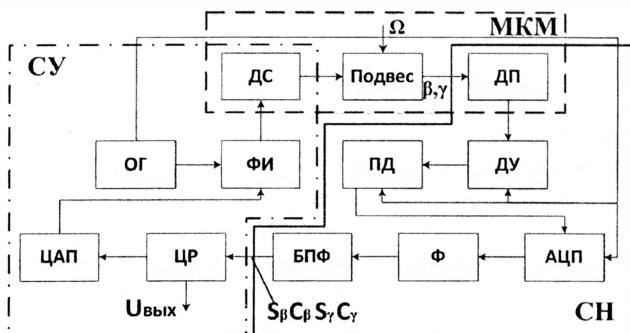


Рис. 2. Функциональная схема МВГ (ДУ – дифференциальный усилитель, ПД – пиковый детектор, Ф – фильтр, БПФ – блок преобразования Фурье, ЦР – цифровой регулятор, ФИ – формирователь импульсов)

По сравнению с существующими схемами СУ в схеме разработки НИИ ГМ реализованы: импульсная регулировка собственной частоты первичных колебаний; стабилизация как амплитуды, так и фазы угла колебаний по осям первичных и вторичных колебаний; линеаризация управляющего момента как подпиранием напряжением (по напряжению), так и обратной функцией (по зазору); способ управления – амплитудно-импульсная модуляция. Для регулировки собственной частоты по оси съема используется управление постоянным напряжением. Для выделения синфазной и квадратурной составляющих колебаний в канале съема информации используется БПФ.

Особенности импульсного управления амплитудами и фазами β и γ на резонансе поясняются на Рис. 3.

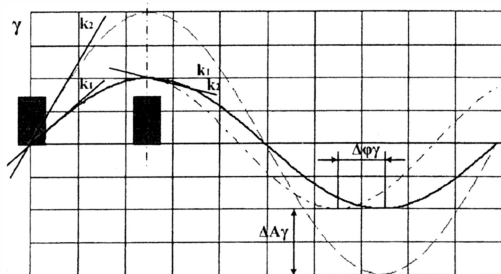


Рис.3. Импульсное управление амплитудой и фазой колебаний

Импульсы, приходящие в моменты максимального отклонения каждой из рамок, управляют фазой, а импульсы, приходящие в моменты прохождения рамками положения равновесия, управляют амплитудой колебаний за счет приращения скорости (изменения наклона касательной k_i).

Особенностью импульсных систем является простота реализации при построении цифровых СУ, малые габариты, малая энергоемкость и высокая надежность, что делает их особенно привлекательными для космических применений. Стабилизация фазы помогает точно удерживать колебания в резонансе и открывает возможность использования высокой добротности колебательной системы. Линеаризация емкостного датчика силы необходима в силу присущей этому датчику нелинейной зависимости характеристики момента как от подаваемого управляющего напряжения, так и от рабочего зазора.

Таким образом, проработка и макетирование различных функциональных схем построения СУ как возбуждения, так и съема позволили выбрать вариант с ОГ, с импульсной регулировкой собственных частот механической платы, с БПФ в канале съема информации.

Во второй главе описан переход от дифференциальных уравнений второго порядка, представляющих движения $\beta(t)$ и $\gamma(t)$ как колебания с частотой возбуждения ω и переменной амплитудой, к уравнениям, описывающим движение МВГ с помощью огибающих амплитуд синусных и косинусных составляющих колебаний рамок. При этом вторыми производными ($\ddot{\beta}, \ddot{\gamma}$) пренебрегается по сравнению с произведениями ($\dot{\beta}\omega, \dot{\gamma}\omega$), что и соответствует медленным изменениям амплитуд. Также предполагается, что переходные процессы огибающих синусных и косинусных составляющих колебаний рамок путем настройки СУ будут представлять собой апериодические процессы.

Линеаризованная модель МВГ, включающая в себя модели подсистем МКМ, СН и СУ, может быть записана в следующем виде:

$$\ddot{\bar{X}}(t) = -\frac{\omega}{2} A_0 \bar{X} + \frac{\omega}{2} B_0 \bar{U}; \quad (1)$$

$$\bar{Y} = C \bar{X} + D \bar{U} + \bar{y}; \quad (2)$$

$$\bar{U} = K_{\Pi} (\bar{Y} - \bar{Y}_0) + K_{\Pi} \int (\bar{Y} - \bar{Y}_0) dt + K_{\Delta} d(\bar{Y} - \bar{Y}_0)/dt, \quad (3)$$

где $\bar{X}$ - вектор состояния системы, состоящий из четверки амплитуд огибающих синусных и косинусных составляющих колебаний рамок $B_c, B_s, \Gamma_c, \Gamma_s$;

$\bar{U} = (U_\beta, V_\beta, U_\gamma, V_\gamma)$ - вектор управления, состоящий из четырех значений амплитуд управляющих импульсов.

$\bar{Y}$ - вектор наблюдения, состоящий из четырех амплитуд электрического напряжения, в первом приближении пропорционален $\bar{X}$. $\bar{Y}_0$ - вектор заданных значений или уставок, а вектор $\bar{y}$ - есть вектор помех.

Далее опишем матрицы состояния подсистем - A_0, B_0, C, D .

Матрица A_0 - собственная матрица механической системы.

$A_0 = \begin{pmatrix} q_\beta & -\varepsilon_\beta & -g_\beta & -\mu_\beta \\ \varepsilon_\beta & q_\beta & \mu_\beta & -g_\beta \\ g_\gamma & -\mu_\gamma & q_\gamma & -\varepsilon_\beta \\ \mu_\gamma & g_\gamma & \varepsilon_\beta & q_\gamma \end{pmatrix}$ Где $q = p/\omega Q$ - коэффициенты демпфирования, p - собственная частота, ω - частота возбуждения, $\varepsilon = p^2/\omega^2 - 1$ - коэффициент расстройки частот, $g = \Delta J \Omega / J \omega$ - гироскопическая составляющая, $\mu = (J_{I_\gamma} / I_{\gamma(\text{в.с.})}) - (I_\gamma - I_\alpha) \Omega_2 \Omega_3 / I_{\gamma(\text{в.с.})} \omega^2$ - квадратурная по-
меха, ϑ - угол, характеризующий неортогональность осей подвеса.

Матрица B_0 в первом приближении определяет меру воздействия на вектор состояния $\bar{X}$ вектора управления $\bar{U}$. Матрица B_0 имеет вид:

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0 & -S & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S \\ 0 & 0 & C & 0 \end{pmatrix}$$

Здесь каждый из коэффициентов S или C есть первая гармоника Фурье разложения системы прямых импульсов (отдельно импульсов управления амплитудой S и отдельно импульсов управления фазой C) с амплитудой напряжения, равной 1. Обозначение S подразумевает синусную составляющую каждой из упомянутых систем, C – косинусную. Основные члены матрицы B_0 выражаются формулами:

$$C = 2 \sum \left(\frac{\eta F l}{2h^2} \right) U_0 4\tau \frac{\sin \pi \tau}{\pi \tau} \cdot \frac{1}{l p^2}, S = C \frac{1 + \delta^2}{(1 - \delta^2)^2} \left[\frac{1}{B} \right], \text{ где } F - \text{площадь ДС, } l - \text{плечо ДС,}$$

τ – ширина импульса управления, U_0 – напряжение линеаризации, $\eta = 8.85 \cdot 10^{-2}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, $\delta = \Delta h / h$ – отношение максимального изменения зазора к его номинальному значению.

Первый член модели СН (2) – матрица C . Первые две компоненты матрицы C , стоящие на главной диагонали, представляют собой крутизну ДП по β , а две следующие – крутизну ДП по γ . СН включает две аналогичные друг другу подсистемы: по оси β и по оси γ . Каждая из них в свою очередь состоит из емкостного измерительного моста с двумя конденсаторами, имеющими подвижные обкладки и цепи обработки сигнала разбалансированного моста для получения составляющих вектора $\bar{Y}$.

Второй член модели СН (2) – матрица D отражает паразитное влияние напряжений $\bar{U}$ управления на вектор $\bar{Y}$ наблюдения.

K_P , K_I , K_D – суть коэффициенты усиления ПИД-регуляторов по каждому из каналов.

Таким образом, имея линеаризованную модель МВГ (1), (2), (3), при допущении, что сдвиги фаз СН малы и стабильны, а СУ справляется с удержанием заданных значений ($B_c \equiv 0$, $\Gamma_c \equiv 0$, $\Gamma_s \equiv \text{const}$), можно записать выражение для синусной составляющей огибающей колебания по оси съема (B_s), несущей полезную информацию: $\dot{B}_s + \frac{\omega}{2Q} B_s = -\frac{\Delta I}{I} \Gamma_s \Omega + \frac{\omega}{2} C_{U\beta} (U_\beta - U_{\beta 0})$. (4)

И в итоге, предполагая, что скорость изменения $\Omega(t)$ мала, получаем выражение, определяющее входную угловую скорость: $\Omega = \Omega_0 + k_n U_\beta$, (5)

$$\text{где } \Omega_0 = \frac{\beta_0}{\gamma_0} \frac{I}{\Delta I} \frac{\omega \sqrt{1 + (2Q\Delta p_\beta / p_\beta)^2}}{Q} \text{ и } k_n = \frac{\eta F l}{2h^2} 4U_0 \frac{4\tau}{\Delta I \gamma_0 \omega} \frac{\sin \pi \tau}{\pi \tau}. \quad (6)$$

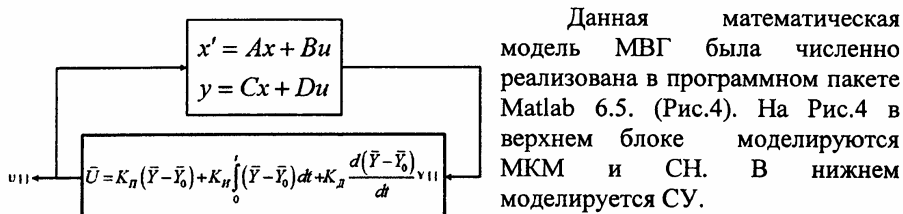


Рис.4. Модель прибора в Matlab 6.5

Каждая из подсистем MBГ была численно промоделирована в разных пакетах: МКМ – в Ansys, СН – в Microcap, при различных внешних воздействиях. Результатом моделирования явились изменения внутренних параметров подсистем, далее эти изменения вводились в общую модель MBГ в Matlab (Рис.5) и там пересчитывались в изменения матриц состояния подсистем. При изменении матриц изменялся выходной сигнал. Далее по изменению выходного сигнала ΔU_{sp} , в соответствии с соотношением для Ω (5), в Mathcad определялись точностные характеристики MBГ.

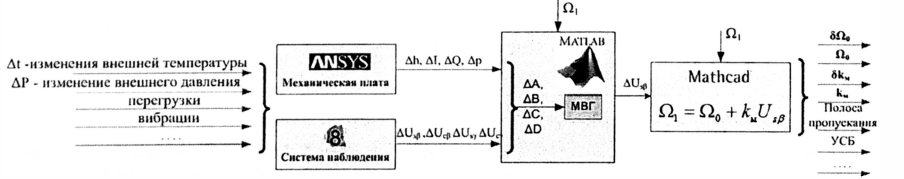


Рис. 5. Структурная схема численного моделирования выходных параметров MBГ

Характеристики, полученные в результате моделирования MBГ, представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Получено при моделировании
Суммарная скорость ухода, °/час	2,9
Шум, определяемый как случайное блуждание, °/√ч	0,016
Погрешность масштабного коэффициента, ppm	1800
Диапазон измерений, °/сек	25
Полоса пропускания частот, Гц	16

В данной главе сделан переход к уравнениям состояния, описывающим динамику огибающих амплитуд синфазной и квадратурной составляющих колебаний MBГ, и получены соотношения, математически описывающие работу подсистем MBГ: МКМ, СН и СУ. Получено выражение, определяющее влияние на масштабный коэффициент и нулевой сигнал параметров MBГ и их изменений от внешних воздействий. Численное моделирование предложенного АУ MBГ показало достижимость заданных точностных параметров.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных измерений характеристик MBГ, проведенных с помощью специально разработанного цифрового блока электроники, подтверждающих работоспособность функциональной схемы (Рис. 2). Отличительной особенностью созданного комплекса цифровой и аналоговой аппаратуры является то, что электроника позволяет: в режиме реального времени получать информацию об амплитуде и фазе колебаний наружной и внутренней рамок и информацию о компенсирующих величинах управляющих напряжений, требующихся для удержания амплитуд и фаз колебаний наружной и внутренней рамок на заданных значениях.

Для определения зазоров и паразитных ёмкостей по каналам β и γ автором была предложена модификация методики по патенту 2338997 РФ:

1. Суть метода заключается в том, что зазор определяется не по постоянной емкости датчика $h = \eta S / (C_{изм} - C_{пар})$, где S – площадь датчика, $C_{изм}$ – измеренная емкость, $C_{пар}$ – паразитная емкость, а по изменению емкости от подаваемого на обкладки датчика постоянного напряжения. При этом определяется коэффициент пропорциональности $r_1 = \Delta C_1 / U_1^2$, где U_1 – подаваемое напряжение, при котором изменение емкости $\Delta C_1 = 0,1 - 0,2$ пФ. Далее зазор рассчитывается по формуле: $h = 1,31 \cdot S / (U_{max}^2 \cdot r_1)$, где U_{max} – напряжение, подаваемое на электрод датчика ДСЗ, соответствующее потере устойчивости равновесия.

Результаты определения зазоров (h) по разработанной методике показали высокий разброс h от экземпляра к экземпляру, до 2,4 мкм по обоим осям. Также у некоторых образцов имеются достаточно большие величины асимметрии зазоров до 0,7 мкм. Результаты определения зазоров были проверены на нескольких разобранных образцах интерферометрическим методом, и получилось хорошее совпадение результатов.

Для определения полосы пропускания (v) автором была разработана новая методика:

2. Для оценки полосы пропускания программно на вход СУ подается переменная уставка с амплитудой, равной 0,1 В и частотой, меняющейся от нуля до заданного значения, при этом наблюдается сигнал на выходе СН. Частота, при которой амплитуда этого сигнала уменьшается до 70% от амплитуды переменной уставки, считается верхней границей полосы пропускания.

Результат экспериментального определения стабильности поддержания разности фаз по вариации Аллана составил около 1 дуг. сек. Нестабильность разности фаз характеризует расстройку частот, и та в свою очередь ведет к нестабильностям k и Ω_0 . Достигнутый уровень стабильности поддержания фазы позволяет работать при больших значениях добротностей без потери чувствительности. При точности поддержания разности фаз ($\Delta\varphi$), например, в 1° и $Q = 10000$, точность поддержания частоты составляет $\Delta\omega = -p\Delta\varphi/2Q = 0,023$ Гц. По соотношениям (6) оценка нестабильности нулевого сигнала составляет $\Delta\Omega_0 = 20$ °/час, а при $Q = 100000$ $\Delta\Omega_0 = 120$ °/час.

Результаты точностных испытаний и их сравнение с результатами моделирования представлены в Таблице 2:

Таблица 2

Параметр	Результаты моделирования	Результаты испытаний
Нестабильность нулевого сигнала, °/час	2,9	100,7
Погрешность масштабного коэффициента, %	0,18	0,48
Диапазон измерений, °/сек	25	50
Полоса пропускания, Гц	16	4

По результатам проведенных испытаний были сделаны следующие выводы:

- проверка предложенных автором методик показала их применимость на практике;
- подтверждена работоспособность предложенного АУ;

- результаты испытаний выявили необходимость совершенствования модели в части введения учета нелинейных эффектов, усиливаемых асимметрией зазоров, для обеспечения требуемых точностных параметров и определение величины квадратурной помехи.

В четвертой главе исследованы основные факторы, влияющие на точностные параметры МВГ, обнаруженные на этапе испытаний и приводящие к невязке между результатами испытаний и моделированием (см. Таблицу 2):

- асимметрия зазоров;
- квадратурная помеха;
- нелинейные эффекты.

Также исследована возможность повышения полосы пропускания.

Оценка влияния *асимметрии зазоров* на точностные параметры МВГ может быть получена из соотношения (5), которое с учетом погрешности настройки в резонанс по измерительной оси и возможного сдвига фаз колебаний $\beta(t)$ по отношению к импульсам возбуждения, может быть представлено в следующем виде:

$$\Omega = \frac{\beta_0 I_\beta P_\beta^2 \cos(\varepsilon Q_\beta - \psi_\beta) \left(\sqrt{1 + (\varepsilon Q_\beta)^2} / Q_\beta \right) - \omega^2 I_\beta C_{V\beta} V_\beta}{\Delta \omega \gamma_0 \cos \psi_\gamma} - \frac{\omega I_\beta C_{U\beta} U_\beta}{\Delta \gamma_0 \cos \psi_\gamma}, \quad (7)$$

где $C_{V\beta}$, $C_{U\beta}$ – амплитуды Фурье-разложения фазной и амплитудной системы единичных импульсов, ψ – фаза колебаний по отношению к импульсам возбуждения. Оценки, проведенные с помощью соотношения (7), при асимметрии зазоров 0,7 мкм, показали, что асимметрия ДП окажет влияние как на нулевой сигнал ($\Delta Q_0 = 20$ °/час), так и на масштабный коэффициент (разброс k_m от экземпляра к экземпляру составляет 11 %), а асимметрия ДС регулировки амплитуды по измерительному каналу, при номинальном значении фазы $\psi_\beta = 0$ и соответствующем значении $C_{V\beta} = 0$, – только на масштабный коэффициент (разброс k_m от экземпляра к экземпляру 20 %).

Для компенсации исходной разницы зазоров автором предложено в закон управления ввести следующий сомножитель: $(1 \pm \Delta U_\Pi / U_\beta)$. Это возможно, поскольку созданная цифровая СУ позволяет осуществлять алгоритмическую компенсацию. В этом случае асимметрия импульсов будет пропорциональна исходной асимметрии зазоров Δh_Π (Рис.6).

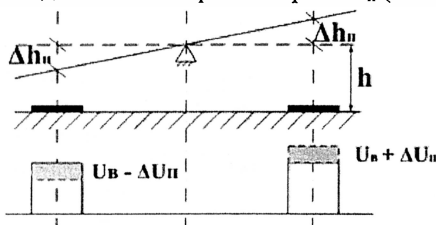


Рис. 6. Формирование напряжения ΔU_Π , компенсирующего асимметрию

в электронике. Выделить основной механизм квадратурной помехи достаточно

Одним из основных факторов, определяющих погрешности МВГ и подлежащих определению, является *квадратурная помеха*. Можно выделить следующие причины, вызывающие возникновение квадратурной помехи: механическая перекрестная связь, электрические перекрестные связи в стеклянной плате ЧЭ, перекрестная связь в

трудно, поэтому можно ввести понятие «эквивалентная неортогональность», которое объединяет все действующие механизмы. Для разделения вклада СУ и МКМ с СН были разработаны новые методики. Вклад МКМ с СН может быть определен из анализа свободных движений (на выбеге), проведенного Б.В. Хромовым. На Рис. 7 показаны два графика, из которых, зная амплитуду ($G = 2\gamma/\beta_n$ где β_n – начальное отклонение наружной рамки) и частоту биений огибающей выбега (ω_6), можно определить квадратурную помеху (μ) и меру расстройки каналов ($k = p_\gamma/p_\beta$).

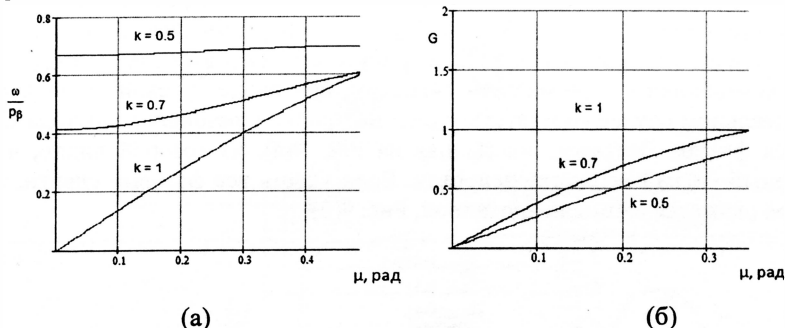


Рис. 7. Зависимость амплитуды (а) и частоты (б) биений на выбеге от перекоса μ осей и расстройки контуров k

Суть предлагаемой методики заключается в том, что величину эквивалентной неортогональности можно оценить по соотношению $\mu = \pi G/pT$, где T – период биений огибающей выбега, и затем по соотношению $G = \frac{2\mu}{\sqrt{(1-k^2)^2 + (2k\mu)^2}}$ оценить меру расстройки каналов. По экспериментальным

кривым выбега, полученным на одном из образцов (зав. № 040006) с близкими частотами, по разработанной методике были определены квадратурная помеха и расстройка частот для разомкнутой СУ: $\mu = 0,232$ дуг. мин. и $k = 0,999$.

При замкнутой СУ квадратурный сигнал действует по каналу, управляющему фазой. Соотношение, полученное из (1), (2), (3) и позволяющее оценить квадратурную помеху:

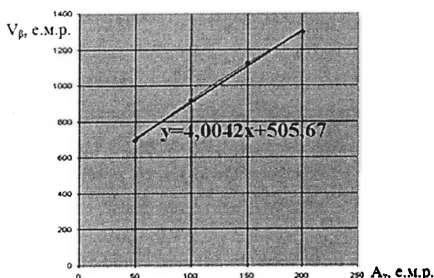


Рис. 8. Экспериментальная зависимость (V_β) от уставки по γ (A_γ) [12-ти разр. АЦП, вх. диап. $\pm 2,5$ В]

$V_\beta = \frac{\mu}{S_{\gamma\beta}c_{44}}u_\gamma + \frac{\varepsilon_\beta u_\beta}{S_{\gamma\beta}c_{44}}$, где $S_{\gamma\beta}$, c_{44} – коэффициенты матриц B и C соответственно, V_β – напряжение, вырабатываемое фазовой системой импульсов, u_β , u_γ – выходные сигналы СН. На том же образце (зав. № 040006) была получена экспериментальная зависимость напряжения, управляющего фазой β (V_β), от изменения уставки по амплитуде γ (A_γ) (Рис. 8). Из Рис. 8 видно, что зависимость $V_\beta(A_\gamma)$

близка к линейной. По получившемуся экспериментально коэффициенту наклона прямой (Рис.8), была определена квадратурная помеха $\mu = 0,255 \text{ дуг.мин.}$. Разница в оценке квадратурной помехи двумя разработанными методиками дает вклад СУ: $\mu_{\text{СУ}} = 0,255 \text{ дуг.мин.} - 0,232 \text{ дуг. мин.} = 1,4 \text{ дуг.сек.}$ Отсюда следует, что основной вклад из всех приведенных причин вносит механическая перекрестная связь, обусловленная технологическими погрешностями. Можно отметить, что при замкнутой СУ определение квадратурной помехи можно осуществить в автоматическом режиме.

Полученные оценки квадратурной помехи позволили выработать рекомендации для уточнения настроек СУ. Ввиду того, что перекрестные связи имеются не только в МКМ, но и в СН и в СУ и присутствует фазовый сдвиг между реальными колебаниями и снимаемым сигналом, при вводе нулевой уставки по фазе, в идеальном случае соответствующей настройке в резонанс, с выхода СН получается фигура Лиссажу, показанная на Рис. 9(а), из которой видно, что квадратурный сигнал не скомпенсирован. Если учесть все фазовые сдвиги, то квадратура окажется скомпенсированной, Рис. 9(б).

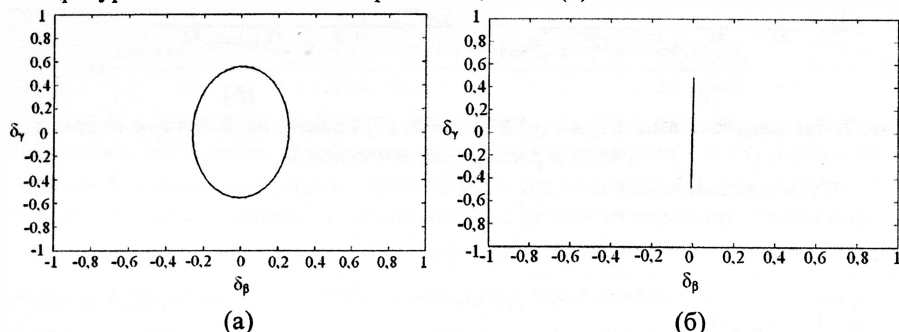


Рис. 9. Фигуры Лиссажу, полученные с выхода СН при нулевых фазовых уставках (а) и при фазовых уставках, учитывающих перекрёстные связи и фазовые сдвиги (б)

Поэтому при действии квадратурной помехи предлагается оптимизировать сочетания фазовых и амплитудных уставок.

При экспериментальном определении собственных частот возникали трудности в виде различных *нелинейных эффектов* - явления захвата частот, срывов колебаний, нелинейности АЧХ и т.д. Эти факты проявлялись тем более, чем более было значение напряжения, подаваемого для компенсации разности частот между рамками (U_3). Данное напряжение создает момент, описываемый выражением:

$$M = \frac{\eta F I U_3^2}{2} \left(\frac{1}{h_0 - \alpha_0 I \sin(\omega t + \psi)} - \frac{1}{h_0 + \alpha_0 I \sin(\omega t + \psi)} \right). \quad (8)$$

Для учёта нелинейных эффектов, возникающих в ДС МВГ, в структуру модели были введены блоки, описываемые выражением (8), отмеченные серым цветом (Рис. 10). Для проверки адекватности предложенной модели было проведено сравнение АЧХ, полученных экспериментально и путем моделирования.

Результаты сравнения показаны на Рис. 11. Результаты моделирования и испытаний показали, что снизить влияние нелинейных эффектов можно путем уменьшения величины напряжения совмещения частот, уменьшения амплитуды выходных колебаний и увеличения номинального зазора.

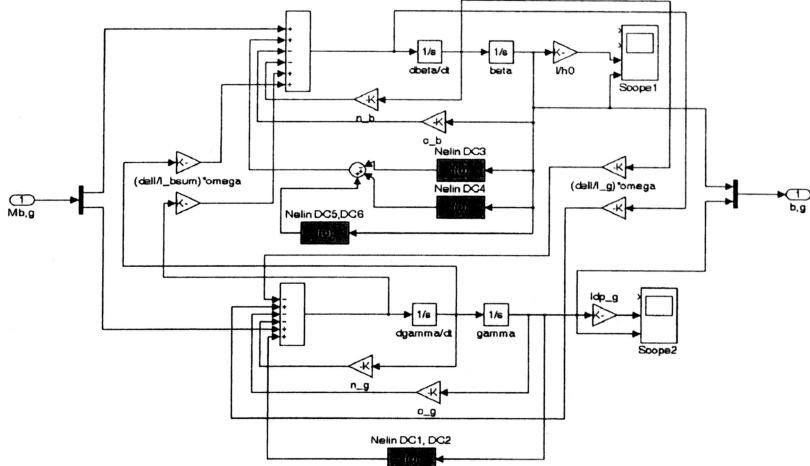


Рис. 10. Модель МВГ в среде Simulink, учитывающая нелинейность ДС

Для компенсации нелинейной зависимости момента от зазора предлагается подавать напряжение на оба плеча ДС дважды за период в соответствии с формулой: $(V_0 \pm V)(1 \mp \gamma_s / \gamma_{\max})$. Суть корректировки в том, что с помощью нее реализуется компенсация изменения зазора $h = h_0(1 - \delta)$ множителем $(1 \mp \gamma_s / \gamma_{\max})$, где $\gamma_{\max}$ – отклонение, соответствующее номинальному зазору h_0 , а γ_s – синусная составляющая движения. Таким образом, повышение симметрии характеристики (Рис. 12), ее независимость от зазора и тем самым возможность работать при больших амплитудах достигаются за счет несимметрии импульсов управления.

Также были проведены дополнительные исследования по оценке возможности повышения *полосы пропускания* (ν). Огибающая

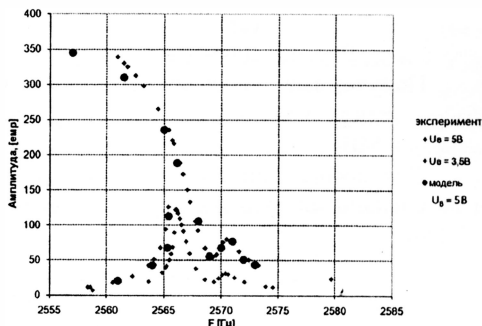


Рис. 11. Проверка адекватности модели

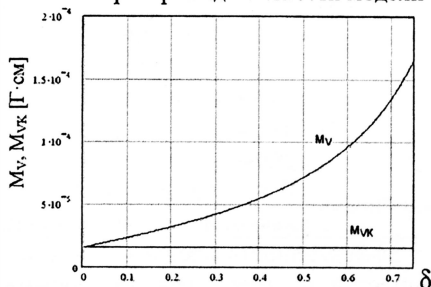


Рис. 12. Схема характеристики момента ДС без корректировки (M_V) и с корректировкой (M_{VK}), при $V = \text{const}$

колебаний МВГ с замкнутой обратной связью представляет собой апериодическое звено (4) с постоянной времени $\tau = ((\omega/2Q) + k)^{-1}$. Полоса пропускания имеет малую составляющую, определяемую механической компонентой, и компоненту, определяемую коэффициентами передачи СН и СУ (k_{CH} и k_{CY}):

$$v = v_m + v_{cy}, \quad v_m = \omega/(2 \cdot Q_\beta), \quad v_{cy} = k_{CH} \cdot k_{CY}, \quad k_{CH} = u_{Bs} / \beta, \quad k_{CY} = \frac{\eta S l}{h_0^2} \cdot \frac{4\tau}{I f_\beta} \cdot U_{0A\beta} \cdot k_{пA\beta}. \quad (9)$$

Из соотношений (9) видно, что v зависит от напряжения линейризации ($U_{0A\beta}$) и коэффициента пропорциональной обратной связи по каналу управления амплитудой β ($k_{пA\beta}$). Также имеется сильная зависимость от зазора, которая была экспериментально получена и приведена на Рис. 13а. Очевидно, что с увеличением коэффициентов $U_{0A\beta}$ и $k_{пA\beta}$, полоса пропускания увеличивается, а масштабный коэффициент (МК) падает, Рис. 13б.

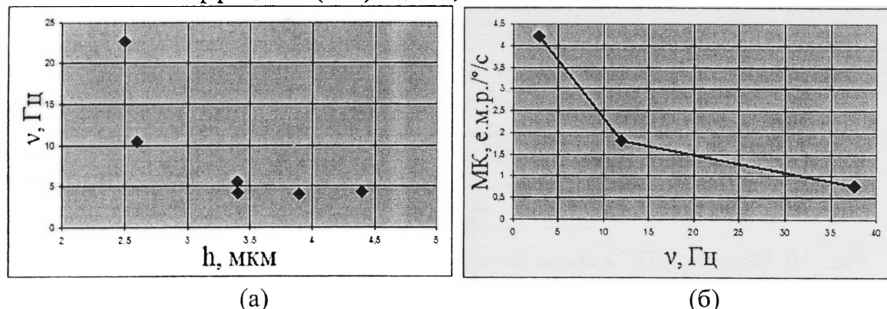


Рис. 13. Двумерное распределение v от h_0 (а) и связь МК и v (б)

Полученные зависимости позволяют подбирать сочетания масштабного коэффициента и полосы пропускания в зависимости от требований, предъявляемых к МВГ.

Для компенсации исследованных механизмов основных погрешностей, были сделаны следующие корректировки закона управления, которые сведены в Таблицу 3.

Таблица 3

Факторы	Методы компенсации
Асимметрия зазоров	1. Подбор коэффициентов U_{01} и U_{02} , вводимых в закон управления фазой β по предложенной методике. 2. В закон управления амплитудой и фазой γ и амплитудой β добавлен компенсирующий член $(1 \pm \Delta U_{п} / U_{в})$.
Квадратурная помеха	Оптимизировано сочетание фазовых и амплитудных уставок $S_{\beta 0}$, $S_{\gamma 0}$, $C_{\beta 0}$, $C_{\gamma 0}$. Проверка проведена при ручной настройке уставок.
Нелинейность	В закон управления фазой γ добавлен член $(1 \mp \gamma_s / \gamma_{\max})$, позволяющий скомпенсировать нелинейность ДС.

Эффективность предложенных алгоритмических методов компенсации погрешностей подтверждена повторными испытаниями, результаты которых представлены в Таблице 4.

Параметр	Получено при испытаниях	
	до коррек- ровок	после коррек- тировок
Нестабильность нулевого сигнала, °/час	100,7	10,1
Угловое случайное блуждание, °/√ч	1,7	0,5
Погрешность масштабного коэффициента, %	0,48	0,36
Диапазон измерений, °/сек	50	50
Полоса пропускания частот, Гц	4	37,6

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. На основании анализа различных вариантов схем построения СУ МВГ выбрана и теоретически описана схема с ОГ, реализующая раздельное импульсное управление амплитудами и фазами колебаний МВГ, где в качестве задающего генератора используется кварцевый резонатор, с подстройкой собственных частот β и γ под частоту задающего генератора и с компенсацией квадратурной помехи путем разделения сигнала в БПФ на синусную и косинусную составляющую. На созданной схеме экспериментально подтверждена точность поддержания фазы СУ на уровне 1 дуг. сек. Такая точность позволяет использовать высокую добротность колебательной системы для уменьшения порога чувствительности прибора.
2. Расчетным путем по созданной математической модели МВГ, включающей модели МКМ, СН и СУ и учитывающей влияние квадратурной помехи, расстройки частот и нелинейных эффектов, определены характеристики СУ и параметры МВГ.
3. На основании проведенного моделирования создан АУ, позволяющий уменьшить погрешности от асимметрии зазоров в емкостных датчиках и влияние нелинейности в канале возбуждения.
4. Обоснованы и апробированы следующие методики:
 - методика определения квадратурной помехи при разомкнутой и замкнутой СУ для оценки вклада в квадратурную помеху СУ;
 - модифицированная методика определения зазоров, исключающая влияние паразитных емкостей;
 - методика определения полосы пропускания с использованием возможностей СУ МВГ по имитации изменения частоты входного сигнала.
5. Экспериментально подтверждены эффективность предложенных алгоритмических методов компенсации погрешностей и достижимость уровня нестабильности скорости ухода менее 10 °/час при полосе пропускания 37,6 Гц.

Достиженные результаты позволяют использовать созданный МВГ для космических применений.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Отечественный микромеханический гироскоп R-R типа. Результаты разработки, изготовления и испытаний / А.Н. Тарасов [и др.] // XXII международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов. СПб, 2015. С. 263-268. (0,45 п.л./0,12 п.л.).
2. Изготовление кремниевого чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа / А.Н. Тарасов и [др.] // Нанотехнологии. Том 2. Вып. 8. М., 2012. С. 12-18. (0,7 п.л./0,09 п.л.).
3. The mode matching technology for MEMS gyroscopes with mutually spaced eigenfrequencies / A. Tarasov [et al.] // International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2012»: Book of abstracts. Moscow, Zvenigorod. 2012. P. 30-33. (0,4 п.л./0,02 п.л.).
4. Тарасов А.Н. Особенности настройки параметров системы управления микромеханического вибрационного гироскопа: Тезисы док. // Молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике»: Сборник материалов. Звездный городок, 2011. С. 159. (0,063 п.л.).
5. Тарасов А. Н. Результаты испытаний макета микромеханических вибрационных гироскопов по оценке полосы пропускания частот и точности поддержания резонанса: Статья // XXVIII всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Датчики и системы - 2009». Пенза, 2009. С. 56-62. (0,7 п.л.).
6. Брюханова В.И., Соловьёв А.В., Тарасов А.Н. Блок микромеханических датчиков угловых скоростей: Статья // XIX Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, посвященная 50-летию первого полета человека в космос: Труды конференции. Королёв, 2012. С. 20-25. (0,6 п.л./0,23 п.л.).
7. Оценка неустойчивости поддержания собственных частот микромеханического вибрационного гироскопа / А.Н. Тарасов [и др.] // Научно-технический семинар «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы», посвящённый 75-летию юбилею кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сборник материалов. М., 2013. С. 30-31. (0,15 п.л./0,063 п.л.).
8. Экспериментальное определение зависимости параметров микромеханического вибрационного гироскопа от температуры / А.Н. Тарасов [и др.] // Научно-технический семинар «Системы управления, стабилизации, навигации, ориентации и их базовые элементы», посвященный 75-летию юбилею кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана: Сборник материалов. М., 2013. С. 43. (0,13 п.л./ 0,04 п.л.).
9. Влияние температуры на динамические характеристики микромеханического вибрационного гироскопа / Тарасов А.Н. и [др.] // 3-я международная научно-техническая конференция «Технологии микро- и нанoeлектроники в микро - и наносистемной технике. Микроэлектроника и пассивная электронная компонентная база»: Сборник материалов. Зеленоград, 2012. С. 67-72. (0,6 п.л. / 0,05 п.л.).