

С.Ф. КОНОВАЛОВ, В.П. ПОДЧЕЗЕРЦЕВ, Д.В. МАЙОРОВ, Ю.А. ПОНОМАРЕВ,
А.Г. СИДОРОВ, Х.В.ПАРК, Н.И.КВОН, Г.С.ЛИ, ДЖ.Б. СЕО

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДУС С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО КАНАЛАМ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

Представлена конструкция двухкомпонентного компенсационного микромеханического датчика угловой скорости (ММГ) на основе вибрационного гироскопа R-R типа.

Показаны цифровые системы резонансной настройки прибора и поддержания постоянства амплитуды угловой скорости колебаний маятника, а также системы компенсации нулевого сигнала и формирования выходных сигналов, реализованные на микроконтроллере. Анализируются причины появления нулевых сигналов гироскопов, связанные с несовершенством изготовления упругого подвеса маятника и магнитных систем, даны рекомендации по их компенсации регулировкой магнитной системы возбудителя крутильных колебаний, доработкой упругих элементов и введением компенсирующего сигнала в контур обратной связи. Приведены результаты расчетов упругой микромеханической системы и моделирования движения гироскопа, а также результаты экспериментального исследования разработанного микромеханического датчика угловой скорости.

Введение

Несмотря на несомненные успехи микромеханики имеются ограничения, препятствующие получению высокой точности ММГ. Среди наиболее существенных следует отметить малые массы чувствительных элементов и соответственно очень малые кориолисовы силы, вызывающие в относительно жестких упругих подвесах чрезвычайно малые деформации, регистрация которых требует сверхвысокой чувствительности измерительных датчиков. Другими серьезными факторами сдерживания повышения точности ММГ являются: высокая чувствительность к неточности изготовления упругих элементов подвесов, малые величины емкостей датчиков перемещений, отсутствие реальных возможностей доводки и настройки механической части микромеханических гироскопов. Отмеченные особенности ММГ приводят к значительным «нулевым» сиг-

Коновалов Сергей Феодосьевич. Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э.Баумана. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Подчерцев Виктор Павлович. Кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Майоров Денис Владимирович. Кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Пономарев Юрий Анатольевич. Инженер МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Сидоров Александр Григорьевич. Инженер МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Парк Х.В. Инженер «Пунгсан ФНС», Нонсан-Сити, Республика Корея.

Квон Н.Й. Инженер «Пунгсан ФНС».

Ли Г.С. Доктор философии «Пунгсан ФНС».

Сео Дж.Б. Инженер «Пунгсан ФНС».

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

налам прибора, компенсация которых является одной из важных и сложных проблем этого направления гироскопии. В данной статье представлены результаты проводимой в МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с компанией Poongsan FNS (Республика Корея, г. Нонсан-Сити) разработки микромеханических гироскопов.

1. Кинематическая схема ММГ и уравнения движения

Двухкомпонентный ДУС принципиально может быть реализован на базе вибрационного гироскопа R-R типа, осесимметричный маятник которого совершает крутильные колебания вокруг оси симметрии z , ортогональной плоскости маятника. Мерой угловых скоростей корпуса ω_x и ω_y в приборах с разомкнутой обратной связью будут являться угловые колебания маятника вокруг осей x и y . В приборах компенсационного типа выходным сигналом являются токи в моментных датчиках, уравнивающих гироскопические моменты. Эти токи пропорциональны угловым скоростям корпуса.

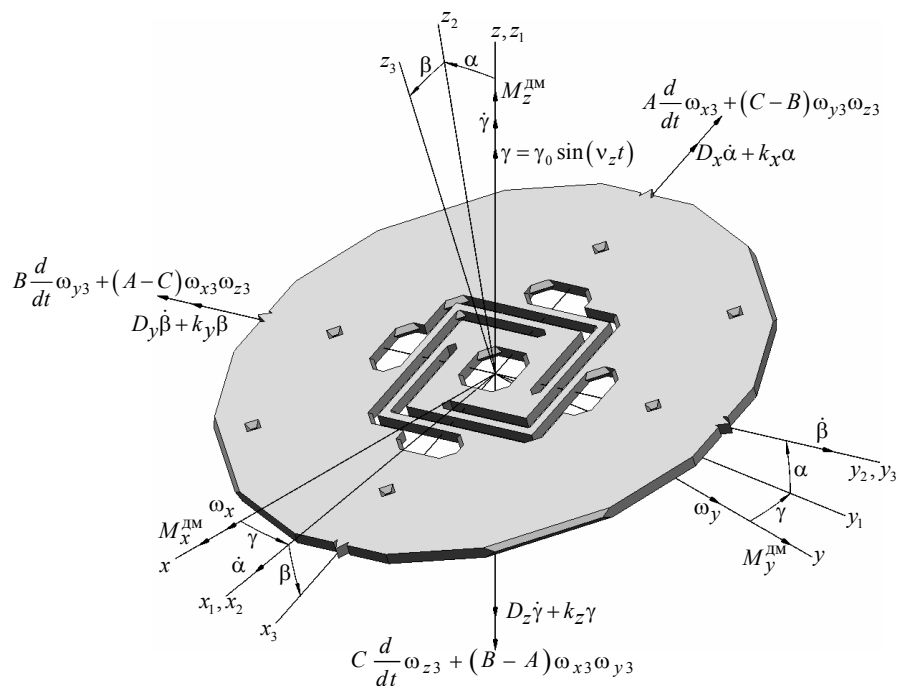


Рис. 1. Моменты, приложенные к маятнику

Кинематическая схема маятника и действующие на него моменты показаны на рис.1. Введем системы координат xyz и $x_3y_3z_3$, связанные соответственно с корпусом гироскопа и маятником, а также промежуточные системы координат $x_1y_1z_1$ и $x_2y_2z_2$. Обозначим главные центральные моменты инерции маятника вокруг его собственных осей через A , B и C соответственно; угловые жесткости упругого подвеса и коэффициенты демпфирования вокруг соответствующих осей через k_x , k_y , k_z , D_x , D_y , D_z ; углы поворота маятника в системе координат, связанной с корпусом, — α , β , γ и в системе координат, связанной с маятником, — α_1 , β_1 ; абсолютные угловые скорости корпуса и маятника в связанных с ними системах координат — ω_x , ω_y , ω_z и ω_{x3} , ω_{y3} , ω_{z3} ; моменты, создаваемые момент-

ными датчиками, – $M_x^{\text{ДМ}}$, $M_y^{\text{ДМ}}$, $M_z^{\text{ДМ}}$; возмущающие моменты – M_x , M_y , M_z .

Уравнения Эйлера [1] для маятника имеют следующий вид:

$$\begin{cases} A \frac{d}{dt} \omega_{x3} + (C-B) \omega_{y3} \omega_{z3} = M_x^{\text{ДМ}} - D_x \dot{\alpha}_1 - k_x \alpha_1 + M_x, \\ B \frac{d}{dt} \omega_{y3} + (A-C) \omega_{x3} \omega_{z3} = M_y^{\text{ДМ}} - D_y \dot{\beta}_1 - k_y \beta_1 + M_y, \\ C \frac{d}{dt} \omega_{z3} + (B-A) \omega_{x3} \omega_{y3} = M_z^{\text{ДМ}} - D_z \dot{\gamma} - k_z \gamma + M_z. \end{cases} \quad (1)$$

Работа контура обратной связи по каналу возбуждения поддерживает колебания вокруг оси z с постоянной амплитудой

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\nu_z t), \quad (2)$$

где γ_0 и ν_z – амплитуда и собственная частота колебаний маятника вокруг оси z .

Учитывая (2), равенство A и B для симметричного маятника и пренебрегая величиной ω_z в сравнении с $\dot{\gamma}$, получаем из (1) уравнения движения маятника в системе координат, связанной с корпусом:

$$\begin{cases} A \frac{d}{dt} (\omega_x + \dot{\alpha}) + C (\omega_y + \dot{\beta}) \gamma_0 \nu_z \cos(\nu_z t) = M_x^{\text{ДМ}} - D_x \dot{\alpha} - k_x \alpha + M_x, \\ B \frac{d}{dt} (\omega_y + \dot{\beta}) - C (\omega_x + \dot{\alpha}) \gamma_0 \nu_z \cos(\nu_z t) = M_y^{\text{ДМ}} - D_y \dot{\beta} - k_y \beta + M_y, \\ C \dot{\gamma} = M_z^{\text{ДМ}} - D_z \dot{\gamma} - k_z \gamma. \end{cases} \quad (3)$$

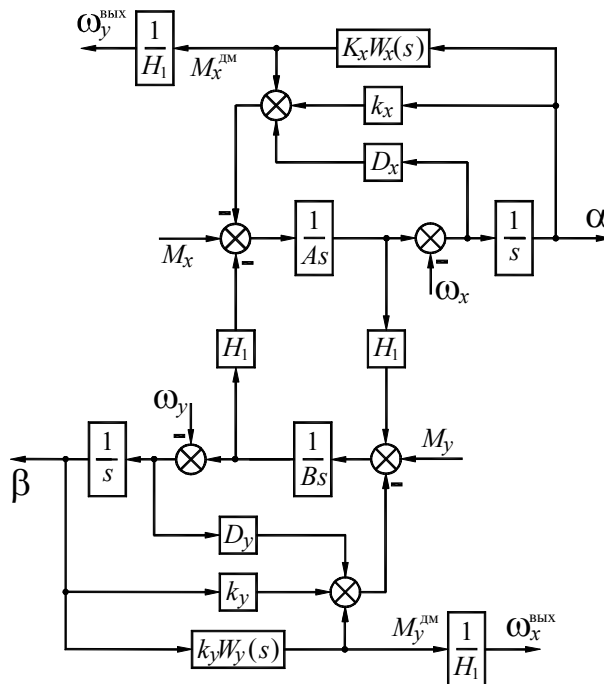


Рис. 2. Структурная схема ДУС

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (3) по измерительным каналам x и y , показана на рис. 2, где $H_1 = C\gamma_0 v_z \cos(v_z t)$. На входах звеньев $\frac{1}{As}$ и $\frac{1}{Bs}$ суммируются все приложенные по каналам x и y моменты, а их выходами, как следует из уравнений системы (3), являются соответственно абсолютные угловые скорости $\omega_x^{abc} = \omega_x + \dot{\alpha}$ и $\omega_y^{abc} = \omega_y + \dot{\beta}$. Далее эти скорости формируют гироскопические моменты по перекрестным каналам, а относительные скорости $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ и углы α, β участвуют в формировании демпфирующих и упругих моментов, а также моментов обратной связи, создаваемых датчиками моментов. Токи обратной связи, протекающие по обмоткам моментных датчиков, оказываются при этом модулированными на частоте возбуждения v_z , и для получения действительных значений угловой скорости корпуса необходима соответствующая демодуляция на этой частоте.

Действительно, при формировании моментов обратной связи, как показано на рис. 2., т.е. $M_x^{DM} = -K_x W_x(s)\alpha$ и $M_y^{DM} = -K_y W_y(s)\beta$, решение системы уравнений (3) в установившемся режиме, полагая жесткость контура обратной связи существенно большей жесткости упругого подвеса, получим в виде:

$$\alpha = \frac{-C\omega_y \gamma_0 v_z}{K_x W_x(s) + k_x} \cos(v_z t), \quad \beta = \frac{C\omega_x \gamma_0 v_z}{K_y W_y(s) + k_y} \cos(v_z t). \quad (4)$$

Токи обратной связи, протекающие в обмотках моментных датчиков, при этом будут равны:

$$J_x = \frac{K_x W_x(s)}{K_x^{DM}} \alpha = \frac{-C\omega_y \gamma_0 v_z}{K_x^{DM}} \cos(v_z t), \quad J_y = \frac{K_y W_y(s)}{K_y^{DM}} \beta = \frac{C\omega_x \gamma_0 v_z}{K_y^{DM}} \cos(v_z t),$$

а измеренные значения угловых скоростей имеют следующий вид:

$$\omega_y^{вых} = -\frac{K_x^{DM}}{C\gamma_0 v_z} J_x = \omega_y \cdot \cos(v_z t), \quad \omega_x^{вых} = \frac{K_y^{DM}}{C\gamma_0 v_z} J_y = \omega_x \cdot \cos(v_z t), \quad (5)$$

т.е. они пропорциональны входным угловым скоростям, но модулированы на частоте возбуждения v_z .

Возможны другие способы формирования обратной связи ДУС, более характерные для традиционных гироскопических чувствительных элементов, когда управляющий момент, создаваемый датчиками момента, подается на перекрестный канал параллельно гироскопическому моменту, но в этом случае требуется его модуляция на частоте возбуждения, что усложняет формирование обратной связи.

2. Оценка влияния габаритов ДУС

При выборе конструкции ДУС главное требование предъявляется к габаритам прибора. Возможности твердотельной ММГ технологии позволяют получать габариты прибора RR типа в плане $\sim 2,5 \times 2,5$ мм [2]. В то же время выбор таких габаритов накладывает как конструктивные, так и технологические ограничения на схему прибора:

- ограничения толщины маятника (обычно не более 60 мкм). Необходимость использования при изготовлении таких маятников технологии плазменного травления не позволяет получать неискаженную форму поперечного сечения упругих перемычек подвеса маятника;
- возможность использования в системе возбуждения колебаний маятника исключительно емкостных датчиков момента гребенчатого типа с присутствием им малым уровнем развиваемого электростатического момента и необходимостью формирования малых зазоров между подвижными и неподвижными электродами 0,6–1 мкм;
- малые площади тела маятника и электродов емкостного датчика угла (которые используются практически во всех известных конструкциях датчиков угловой скорости RR типа) требуют для получения приемлемых величин емкостей (~10 пФ) малых торцевых зазоров между колеблющимся маятником и неподвижными электродами (~1 мкм). Столь же малые зазоры имеют место и при травлении жертвенного слоя под маятником;
- в качестве компенсационных датчиков ДУС могут использоваться только емкостные ДМ, обладающие, как известно, нелинейностью управляющей характеристики и зависимости коэффициента передачи датчика от перемещения подвижного электрода.

Малый электростатический момент в системе возбуждения требует для получения приемлемых амплитуд колебаний маятника вокруг оси z высокой добротности колебательной системы (70000–100000), что при отмеченных зазорах прибора невозможно получить без глубокого вакуумирования его полости.

Невозможность формирования неискаженной формы сечения упругой перемычки подвижного маятника вызывает передачу движения возбуждения маятника по каналу z в каналы x и y , причем уровень нулевого сигнала ДУС, связанный с такой передачей, по литературным источникам [3, 4, 5], может в десятки тысяч раз превышать уровень выходных сигналов ДУС, соответствующих диапазону измерения прибора. Таким образом, приходится осуществлять отбраковку больших партий приборов с недопустимым уровнем нулевых сигналов, так как возможности для компенсации нулевых сигналов в ДУС малых габаритов ограничены.

В то же время существует множество возможных применений ДУС, где нет предельно жестких требований к габаритам приборов. Приемлемые размеры ДУС могут составлять Ø20 мм, L=20 мм. При этом предъявляются более жесткие требования к их характеристикам, чем к характеристикам современных ДУС на базе ММГ, и допускается увеличение цены прибора до \$500. Приборы таких габаритов, базирующиеся на сходных с ММГ технологиях, предлагаем называть сантимерхическими гироскопами (СМГ). Рассмотрим некоторые преимущества, которые дает использование СМГ в сравнении с ММГ.

1. Возможность сочетания в приборах элементов, получаемых методом ММГ технологии (кремниевый маятник), с элементами обычных электромеханических приборов, например магнитоэлектрическими датчиками сил и моментов. Такая комбинация впервые была успешно применена в конструкции ТВГ компании ВАЕ [6]. Она дает возможность получить высокие точностные характеристики прибора при сохранении высокого уровня технологичности (так как в приборах фирмы ВАЕ реализована автоматическая сборка).

2. Магнитоэлектрические ДМ не требуют малых рабочих зазоров и позволяют получать большие управляющие моменты, благодаря чему для нормальной

работы приборов достаточно иметь добротность механических систем от 500 до 3000. Учитывая то обстоятельство, что в СМГ электростатические емкостные датчики угла (ДУ) по каналам x и y имеют значительные площади, приемлемые значения емкостей удастся получать при зазорах между подвижными маятниками и неподвижными электродами в 30-50 мкм. Такой уровень добротности удастся обеспечить при наличии газового заполнения прибора (давление газа порядка 1 атм). При этом следует учитывать, что если для приборов разомкнутого типа, где выходная информация определяется колебаниями маятника по осям x и y , желательно иметь большую добротность механической колебательной системы вокруг осей x и y , то для приборов компенсационного типа резонансная настройка и большая добротность не требуются. Более того, наличие большого коэффициента демпфирования колебаний по осям x и y желательно с точки зрения обеспечения оптимальных динамических характеристик компенсационных контуров прибора. Поэтому большое газовое демпфирование для каналов x и y и соответственно малые добротности механических колебательных систем по этим осям (порядка 0,9 при указанных зазорах 30-50 мкм) в меньшей степени будут сказываться на точностных параметрах компенсационных ДУС, чем ДУС разомкнутого типа.

3. Имеется возможность формирования маятника толщиной, равной толщине исходной заготовки (вафли) (~380 мкм). Большая длина упругих перемычек позволяет получать в СМГ большую, чем в ММГ, амплитуду колебаний маятника по каналу z . Большая толщина маятника вместе с большим его диаметром и большие углы колебаний γ увеличивают момент кориолисовых сил, возбуждающих колебания вокруг осей x и y . Это способствует повышению точности прибора.

4. В СМГ типа «сэндвич» маятник изготавливается из вафли выполнением сквозных отверстий по технологии анизотропного травления. Эта технология обеспечивает лучшую форму поперечного сечения балок по сравнению с плазменным травлением и допускает проведение корректирующего подтравки упругих элементов, позволяющего устранять влияние искажения перемычек в процессе изготовления маятников. Это резко увеличивает выход годных приборов.

5. Использование магнитоэлектрического ДМ в качестве возбудителя колебаний по оси z позволяет снижать величину остаточного сигнала ДУС путем регулировки формы магнитных полей в магнитной цепи.

3. Описание конструкции ДУС

Помимо указанных преимуществ следует отметить также возможность изготовления ДУС с использованием уже отработанных технологий в сборочных цехах обычных приборостроительных предприятий.

Работа по созданию двухкомпонентных ДУС RR типа ведется в течение трех лет. Отрабатывались конфигурации маятника, параметры ДМ систем возбуждения и компенсации, системы управления ДУС по каналам возбуждения и обратной связи, а также компенсация нулевого сигнала.

На рис. 3, 4, 5 показаны некоторые варианты конструкций маятников использованных в ДУС. Маятник на рис. 3 применялся в ДУС разомкнутого типа. На торцевых поверхностях этого маятника выполнена печатная обмотка магнитоэлектрического ДМ для возбуждения колебания вокруг оси z .

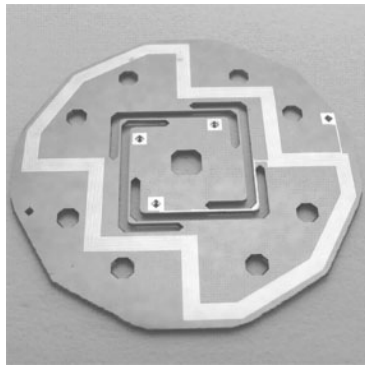


Рис. 3. Маятник ДУС разомкнутого типа

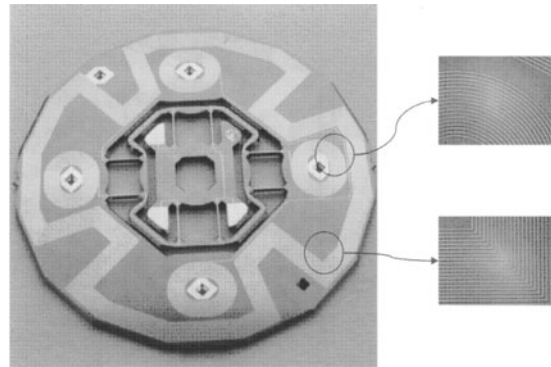


Рис. 4. Маятник ДУС компенсационного типа (1-й вариант)

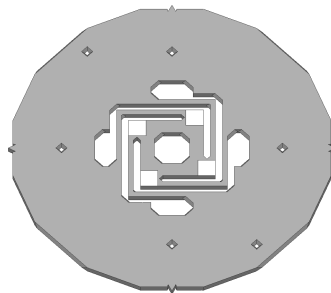


Рис. 5. Маятник ДУС компенсационного типа (2-й вариант)

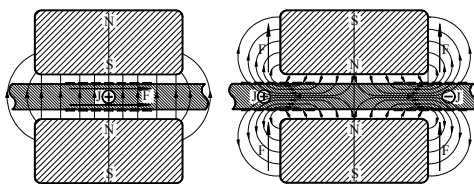


Рис. 6. Схема магнитной системы возбуждения колебаний и датчиков момента ОС

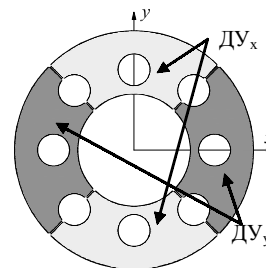


Рис. 7. Датчики угла емкостного типа

Схема магнитной системы датчика показана на рис. 6, а схема емкостных датчиков колебаний маятника вокруг осей x и y – на рис. 7. Подвес маятника содержит упругие перемычки, полученные методом анизотропного травления кремниевой вафли с плоскостью среза $\langle 001 \rangle$ в 33% водном растворе КОН. Продольные оси упругих элементов ориентированы по направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 010 \rangle$, благодаря чему обеспечивается их прямоугольное поперечное сечение. В разомкнутом ДУС использовалась автогенераторная система возбуждения крутильных колебаний по оси z . Эксперименты с ДУС показали работоспособность данной схемы, но и выявили влияние отсутствия синхронизации частот возбуждения емкостных ДУ с частотой автогенератора на выходные сигналы ДУС. В них возникали биения, частоты и амплитуды которых изменялись

вследствие как изменения резонансной частоты маятника, вызванной его прогревом, так и нестабильности частоты генератора напряжения возбуждения емкостного ДУ.

Маятники на рис. 4 и 5 использовались в ДУС компенсационного типа. Помимо обмотки возбуждения колебаний по оси z они содержат печатные обмотки магнитоэлектрических датчиков момента, компенсирующих моменты кориолисовых сил вокруг осей x и y . Схема ДМ показана на рис.6. Датчики используют спиральные обмотки, помещенные в стесненные магнитные поля, образованные обращенными к обмоткам одноименными магнитными полюсами.

Были реализованы 2 варианта конструкции подвеса маятника, но практическое применение получила схема рис. 5, обеспечивающая наибольшие углы колебаний маятника вокруг оси z .

4. Описание блока электроники

В состав блока электроники компенсационного ДУС входит микроконтроллер. Это позволяет реализовать новые принципы управления системы возбуждения прибора и осуществить синхронизацию частот напряжения возбуждения ДУ и питания системы возбуждения колебаний по оси z . В электронном блоке используется генератор, управляемый напряжением (ГУН). Он формирует частоту питания ДУ (~ 128 кГц), которая затем делится до частоты 1 кГц, соответствующей резонансу маятника по каналу z . Система, управляющая ГУН, одновременно изменяет частоты возбуждения датчика угла и осуществляет подстройку частот возбуждения по каналу z под резонанс маятника.

Для качественной работы ДУС необходимо поддерживать неизменное значение скорости угловых колебаний маятника вокруг оси z . При реализации ДУС отрабатывались два варианта построения схемы управления. В обоих вариантах обмотка канала возбуждения через равные промежутки времени используется как обмотка управления ДМ, так и обмотка формирования сигнала угловой скорости колебания маятника. Коммутация обмоток реализуется с помощью переключателей. Форма тока и выходного напряжения, снимаемого с обмотки, показана на рис.8.

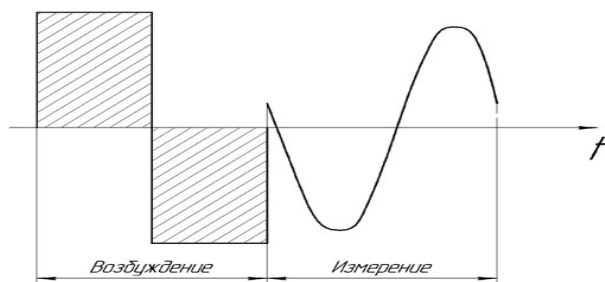


Рис. 8. Форма напряжений на обмотке возбуждения в режимах управления и измерения

В первом варианте осуществляется дорезонансная настройка системы возбуждения маятника. Микроконтроллер измеряет угловую скорость колебаний маятника, сравнивает его с уровнем колебаний, соответствующего 0,7 от ее резонансного значения, определяемого при предварительной настройке прибора. По разности указанных сигналов формируется напряжение на входе ГУН. Если сигнал о скорости отличается от 0,7, то частота ГУН изменяется до восстановления равенства. Процесс регулировки иллюстрируется рис. 9. Таким образом, построение одной системы управления обеспечивает одновременно амплитудную и частотную регулировку колебаний канала возбуждения маятника.

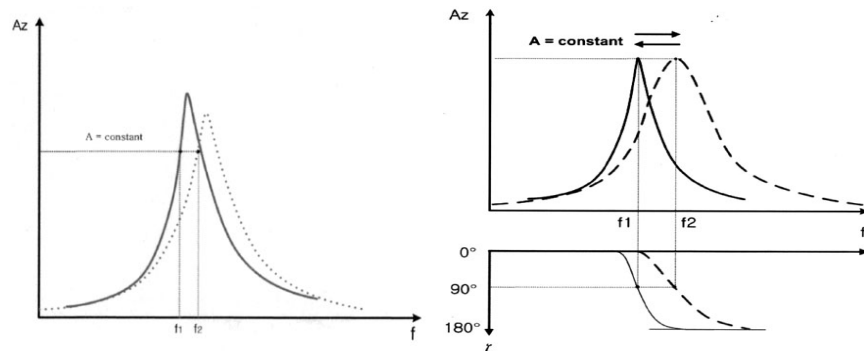


Рис. 9. Слева – дорезонансная настройка системы; справа – резонансная настройка

Вторая реализованная схема осуществляет раздельное управление по каналам частоты и амплитуды угловой скорости. Здесь в первой системе управления определяется фаза угловых колебаний маятника и осуществляется резонансная настройка путем регулировки частоты ГУН. Во второй системе управления измеряется угловая скорость движения маятника и регулируется напряжение питания в канале возбуждения. Второй вариант признан предпочтительным, так как здесь кратковременная нестабильность частоты ГУН оказывает меньшее влияние на точность ДУС.

Главной причиной погрешности ДУС (нулевой сигнал) является нарушение формы балок подвеса, связанной с неточностью совмещения фотошаблонов травления при двухсторонней фотолитографии. В результате смещения масок форма упругих элементов приобретает вид, показанный на рис. 10. При колебаниях маятника вокруг оси z их деформация соответствует случаю косоугого изгиба и сопровождается перемещением ее как в плоскости приложения силы, так и в поперечном направлении.

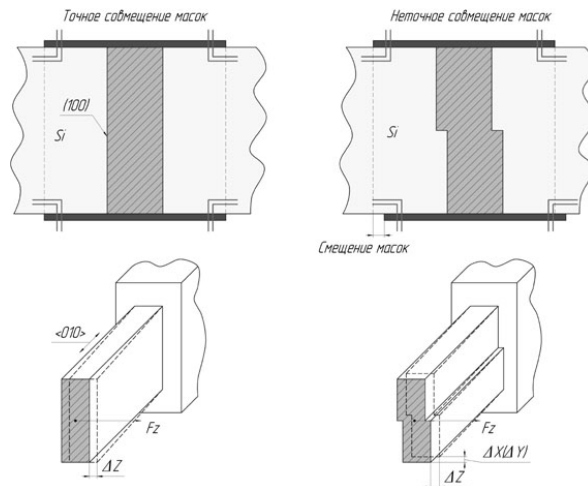


Рис. 10. Причина нарушения формы упругих элементов

Результаты показывают, что смещение шаблонов на 2 мкм (достижимая точность двухсторонней фотолитографии) приводит к появлению нулевого сигнала соответствующего угловой скорости 800 град/с, что в 8 раз больше диапазона измерения ДУС. Поэтому компенсация нулевого сигнала является одной из главных задач настройки прибора.

В реализованной конструкции маятника имеется возможность выполнения подтравки балок упругого подвеса по результатам замера нулевого сигнала. При этом используются данные, полученные при испытаниях маятника-полуфабриката после первой стадии изготовления (рис. 11). По измеренным уровням нулевого сигнала приборов с маятником-полуфабрикатом рассчитываются необходимые размеры элемента подтравки и определяется место подтравки. После чего осуществляется снятие окисла на участке «b» (размер «p» выбирается постоянным) и маятник дотравливается (вторая стадия изготовления) до полу-

чения заданного размера « $a-2q$ ». Наличие дополнительных выемок способствует устранению косого изгиба упругих элементов подвеса и снижению уровня нулевого сигнала. Дальнейшее уменьшение нулевого сигнала обеспечивается благодаря введению двух дополнительных регулировок.

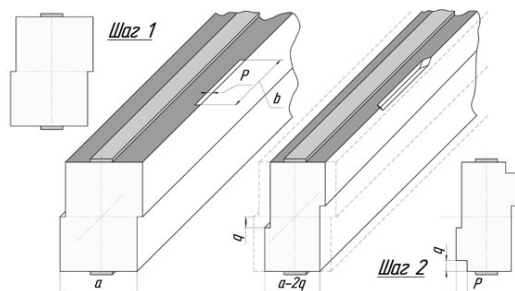


Рис. 11. Способ компенсации нулевого сигнала путем подтравы упругих элементов

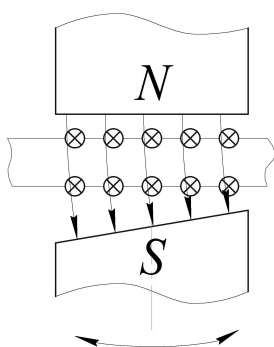


Рис. 12. Способ компенсации нулевого сигнала путем изменения конфигурации магнитного поля

Первая из них производится путем формирования соответствующей структуры магнитного поля в воздушном зазоре, где располагается обмотка возбуждения. Для этого часть магнитов системы возбуждения выполняется со скошенными торцами, разворот которых (рис. 12) изменяет направление приложенных к маятнику электромагнитных сил и соответственно ориентацию плоскости возбуждаемых колебаний, что влияет на величину нулевого сигнала. Данная регулировка проводится при включенной системе возбуждения и обратной связи по каналам x и y .

Окончательная регулировка осуществляется с помощью микроконтроллера, который формирует компенсационный сигнал, равный исходному нулевому сигналу, снимаемому с датчика угла, но противоположный по фазе.

5. Экспериментальные результаты

Внешний вид разработанного двухкомпонентного ДУС показан на рис. 13. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований ДУС.

Следует отметить, что это не предельные точностные характеристики, достижимые у ДУС рассматриваемого типа. По нашему мнению, имеются достаточно обоснованные перспективы повышения его точности, связанные с отработкой технологии изготовления более качественных маятников и базовых элементов для установки маятников на корпусе, компенсацией дефектов изготовления упругих элементов методом их подтравы, методикой доводки собственной частоты маятника по оси

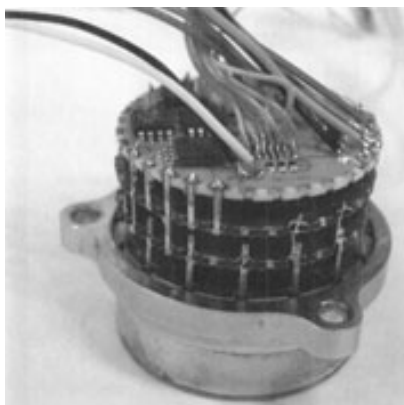


Рис. 13. Внешний вид прибора

возбуждения, уменьшением зазора между маятником и корпусом до 20 – 30 мкм для повышения параметра «сигнал/шум» датчиков угла.

Диапазон измерения.....	±100 °/с
Масштабный коэффициент	(10 ±1%)мВ/°/с
Чувствительность	0.02 °/с
Нулевой сигнал	±0,5 °/с с компенсацией
Стабильность от запуска к запуску	0.05 °/с
Нелинейность масштабного коэффициента	< 0.5%
Неортогональность осей чувствительности	< 2°
Полоса пропускания.....	25 Гц
Сигнал шума (0 ~ 100Hz):.....	1.5 °/с
Время готовности	< 3 с
Габариты	Ø20,3×20,4 мм
Масса.....	20,5 г

Заключение

Разработанная конструкция двухкомпонентного компенсационного ДУС R-R типа и результаты его испытаний показали перспективность данной схемы прибора для решения ряда важных практических задач ориентации, стабилизации и навигации и целесообразность дальнейшей работы в направлении создания СМГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ишлинский, А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.:Наука, 1976.
2. **<http://www.semiconductors.bosch.de/en/20/sensors/angular.asp>**
3. **Mikko Saukoski, Lasse Aaltonen, Kari A.I.Halonen.** Zero-Rate Output and Quadrature Error Compensation, IEEE Sensors Journal. - 2007. – Vol.7, №12. – pp. 639-1651.
4. **Ying W. Hsu.** Patent # US 6370937 B2. Method of Cancelling Quadrature Error In an Angular Rate Sensor. – 2002.
5. **Stewart R.E., Wyse S.F.** Bias and Quadrature Reduction in Class II Coriolis Vibratory gyros. EP 1,752,733A2, Bulletin. – 2007.
6. **He, G. and Najafi, K.,** A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope, MEMS 2002 – 15th IEEE. International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Las Vegas, NV, January 2002.

Abstract. In the report the design of a two-coordinate micromechanical angular rate sensor (RS) on the basis of the vibrating gyroscope of R-R type is presented. The gyroscope constructed under the scheme "sandwich" uses a magnetoelectric activator of torsional fluctuations of a silicon sensitive element and a contour of a feedback on channels of measurement consisting of capacitor's pick-off and magnetoelectric torque. The design features of the device provide its operability in gas-filled volume at atmospheric pressure. Algorithms of digital systems of resonant adjustment of the device and maintenance of constancy of amplitude of angular rate of fluctuations of a pendulum, and also systems of compensation for a zero signal and formation of the output signals constructed on the microcontroller are presented. The reasons of occurrence of zero signals of the gyroscope, connected with imperfection of manufacturing elastic suspension a pendulum and magnetic systems are analyzed, recommendations under their compensation by adjustment of magnetic system of the activator torsional fluctuations, completion of elastic elements and introduction of a compensating signal in a contour of a feedback are given.

The results of calculations of elastic micromechanical system, modeling of movement of a gyroscope are presented at various kinds of formation of a contour of a feedback and experimental researches of the developed micromechanical angular rate sensor with a magnetoelectric feedback.