

В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., tgupu@yandex.ru,
В. В. Лихошерст, канд. техн. наук, доц., lvv_01@inbox.ru,
 ФГБОУ ВО "Тулльский государственный университет"

Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором для систем ориентации, стабилизации и навигации

Описаны методики и результаты испытаний волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) — датчика угловых скоростей (ДУС), разработанного на кафедре "Приборы управления" ТулГУ и изготовленного серийным заводом АО "Мичуринский завод "Прогресс" по отработанной им технологии.

Металлический резонатор ВТГ-ДУС изготовлен из эливарного сплава и имеет разнотолщинную цилиндрическую конструкцию, нижняя часть которой с меньшей толщиной стенки выполняет роль подвеса для верхнего цилиндра, собственно резонатора, имеющего конусную форму, обеспечивающую лучшую локализацию колебаний на его торцевой кромке.

Технологические дефекты изготовления, разночастотность и разнотолщинность, устранены балансировкой "по массе", основанной на удалении избыточного металла в определенных точках на торцевой кромке резонатора.

Электронный модуль обеспечивает вторую моду первичных и вторичных, возникающих при вращении, колебаний кромки резонатора и создает сигнал компенсации кориолисовой и квадратурной составляющих выходного сигнала в узлах. Поскольку максимальные амплитуды сигналов возбуждения и компенсации не превышают 10 В, то при больших механических воздействиях контур компенсации может не отработать возросший сигнал, и ВТГ-ДУС теряет работоспособность. Полное время отработки сигнала компенсации не превышает 1 мкс при максимальной потребляемой мощности электронного модуля, не превышающей 4 Вт.

При испытаниях на механические и температурные воздействия использовались нормы, характерные для аналогичных датчиков угловых скоростей, применяемых на борту летательных аппаратов. Определены стабильность нулевого сигнала и масштабного коэффициента при одновременном воздействии на ВТГ-ДУС измеряемой скорости и температуры. Получены значения случайного блуждания и нестабильности нулевого сигнала по графикам отклонений Аллана. Установлено, что ВТГ-ДУС обладает ударной прочностью и восстанавливает измерительную способность после удара. Испытания на вибростойкость выявили резонансные частоты и диапазоны частот, в которых испытываемый образец ВТГ-ДУС может применяться без существенной доработки.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, вращение, температура, удар, вибрация

Введение

Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) с металлическим резонатором являются перспективными инерциальными датчиками угловых скоростей для приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации объектов наземного, морского и воздушно-космического применений. По сравнению с другими типами гироскопических датчиков они имеют следующие преимущества:

- полностью отсутствуют вращающиеся части, поэтому рабочий ресурс датчика (механической части) составляет 15 000 часов и более;
- высокое соотношение точность / цена;
- компактность, небольшой вес и габаритные размеры;
- сохранение инерциальной информации при кратковременном отключении электропитания;
- низкая энергоемкость 1...3 Вт;
- малое время готовности 1...5 с;
- стойкость к ионизирующему излучению с высокой энергией ограничивается применяемой элементной базой электронного блока.

В основе работы ВТГ лежит эффект прецессии волновой картины колеблющейся оболочки (рис. 1), установленной на вращающемся основании, обнаруженный и исследованный Дж. Х. Брайаном [1].

Брайан исследовал природу биений вибрирующей оболочки на звуковых частотах и пока-

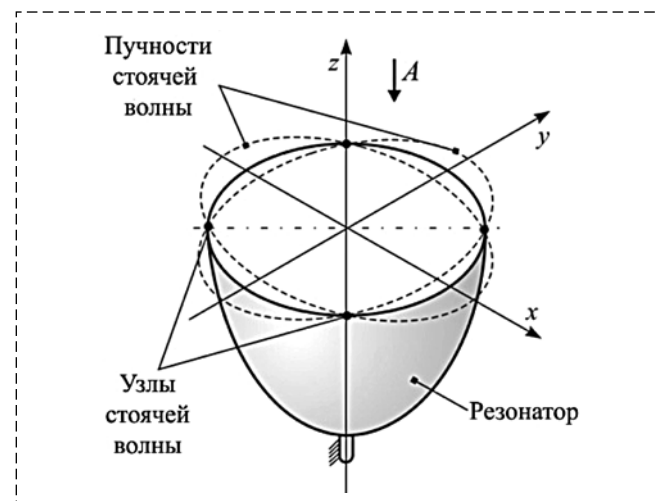


Рис. 1. Стоячая волна в резонаторе

Fig. 1. Standing wave in the resonator

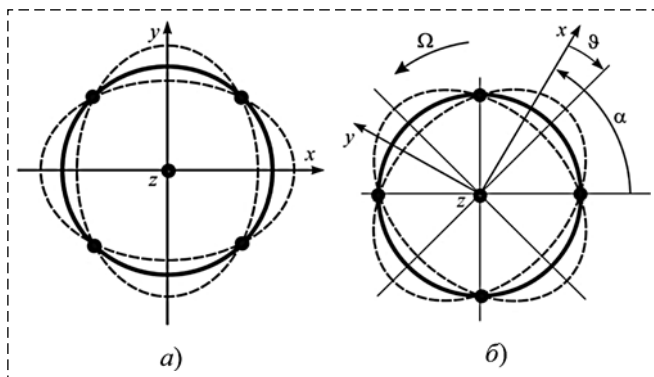


Рис. 2. Стоячая волна в неподвижном (а) и вращающемся (б) резонаторе:

Ω — скорость вращения; ϑ — угол прецессии стоячей волны; α — угол поворота резонатора

Fig. 2. Standing wave in a stationary (a) and rotating (b) resonator:
 Ω — rotation speed; ϑ — angle of precession of a standing wave; α — angle of rotation of the resonator

зал, что под действием сил Кориолиса, возникающих при вращении вибрирующей оболочки вокруг оси, перпендикулярной плоскости вибрации, происходит прецессия стоячих волн как относительно резонатора, так и в инерциальном пространстве (рис. 2).

Брайан рассмотрел случай равномерного вращения вибрирующей оболочки. Д. Линч (США) [2—4] доказал справедливость эффекта Брайана и для переменной скорости вращения. Фундаментальные исследования вибрирующей оболочки на вращающемся основании выполнены в работе [5].

Вибрирующая оболочка является чувствительным элементом ВТГ (резонатором). На кромке резонатора могут существовать различные формы упругих колебаний. В качестве рабочей используется вторая форма колебаний. При вращении резонатора вокруг оси Z под действием сил инерции Кориолиса происходит смещение вибрационных пучностей относительно кромки резонатора. Иными словами, вращение резонатора вызывает вторичные вибрации в форме эллиптической моды, повернутые на некоторый угол относительно первоначального положения. При работе ВТГ в режиме датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС) ориентация волны, связанной с кромкой резонатора, обеспечивается позиционным возбуждением резонатора и определяется выражением [5]

$$\vartheta(t) - \vartheta_0 = -\frac{4K_M Q}{\omega_0} \Omega,$$

где ϑ_0 — угловое положение в системе координат резонатора; Ω — скорость вращения ре-

зонатора; K_M — коэффициент (масштабный, прецессии, Брайана); $Q = 1/2\xi$ — добротность резонатора (ξ — относительный коэффициент затухания); ω_0 — собственная частота колебаний резонатора.

Коэффициент Брайана определяется зависимостью [5]

$$K_M = \frac{1}{2(1-\nu)n^2} [2 + \nu - \sqrt{(2 + \nu)^2 + 4(1 - \nu)n^2}],$$

где n — номер формы колебаний; ν — коэффициент Пуассона материала резонатора.

Для $\nu = 0,17$ и $n = 2$ значение $K_M \approx 0,3$. Следовательно, при повороте резонатора относительно ϑ_0 вокруг оси Z (см. рис. 1), которая является осью чувствительности ВТГ, на угол $\int_0^t \Omega(\tau) d\tau = 90^\circ$ против часовой стрелки пучности стоячей волны будут прецессировать по часовой стрелке на угол $\vartheta \approx 0,3 \cdot 90^\circ \approx 27^\circ$, или относительно инерциального пространства — на угол $\alpha \approx 63^\circ$.

Возбуждение первичных стоячих волн реализуется датчиками силы — актюаторами (магнитоэлектрическими, пьезоэлектрическими, электростатическими), а измерение перемещений кромки резонатора — датчиками перемещений, которые могут иметь такую же физическую "природу", как и актюаторы.

Погрешности изготовления резонатора и анизотропия физико-механических свойств материала приводят к расщеплению собственной частоты его рабочих колебаний по второй форме массового дефекта на две близкие частоты. Каждой из этих частот соответствуют колебания также по второй форме, но с определенной ориентацией волны относительно резонатора. Такой дефект называется разноточностью [5, 6].

Скорость затухания колебаний резонатора зависит от ориентации волны, т. е. резонатор имеет различные декременты затухания и соответствующее им направление осей. Такой дефект резонатора называется разноточностью [5, 6]. Указанные дефекты устраняются специальной технологической процедурой — балансировкой [7].

Основными динамическими характеристиками ВТГ-ДУС являются диапазон измерения, полоса пропускания, нестабильность нулевого сигнала, случайное блуждание, шум покоя, ошибка масштабного коэффициента.

В работе рассматривается экспериментальное определение на аттестованном стендовом оборудовании характеристик точности и их стабильности при воздействии температурных и механических факторов на ВТГ-ДУС с металлическим резонатором, изготовленным на серийном заводе.

Объект исследования

Конструкция ВТГ приведена на рис. 3, а (см. вторую сторону обложки). Резонатор 1 с пьезоэлементами 3, наклеенными на донышко, образуют чувствительный элемент, который с помощью узла крепления 2 смонтирован на корпусе 5 и закрывается кожухом 6. Герметичность внутренней полости достигается шовной сваркой по периметру стыка между корпусом и кожухом, а также применением гермовыводов 4, обеспечивающих связь пьезоэлементов с блоками электроники. Пьезоэлементы выполняют функции датчиков перемещений и силы (прямой и обратный пьезоэффект).

Резонатор состоит из двух сопряженных цилиндров, один из которых с большей толщиной является его рабочей зоной, а тонкостенный цилиндр, сопряженный с донышком, выполняет роль подвеса. Заодно с донышком изготавливается часть узла крепления. Резонатор изготовлен из сплава 21НКМТ-ВИ и в отличие от прототипа [8–10] имеет конусную форму рабочей зоны, обеспечивающую лучшую локализацию стоячих волн на кромке резонатора.

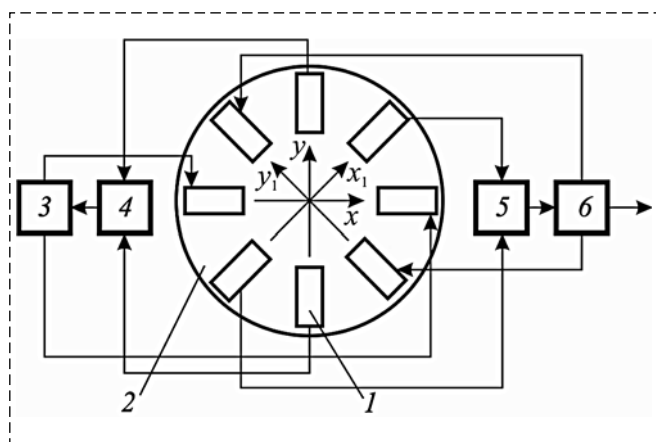


Рис. 4. Функциональная схема ВТГ-ДУС:

1 — пьезоэлементы; 2 — донышко резонатора; 3 — генератор; 4, 5 — измерительные блоки; 6 — управляющий блок

Fig. 4. Functional diagram of SVG-ARS:

1 — piezoelectric elements; 2 — resonator bottom; 3 — generator, 4, 5 — measuring units; 6 — control block

Возбуждение колебаний и измерение перемещений кромки резонатора в узлах и пучностях проводятся с помощью восьми пьезоэлементов, наклеенных на донышко (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки).

Функциональная схема ВТГ-ДУС с пьезоэлементами 1, наклеенными на донышко 2 резонатора в соответствии с направлением осей на рис. 3, б (см. вторую сторону обложки) приведена на рис. 4.

Генератор 3 электрических сигналов возбуждает элементы, расположенные по оси $x-x$ пучностей первой вибрационной моды. Измерительный блок 4 сравнивает амплитуду первой вибрационной моды с заданным значением и передает на генератор 3 сигнал рассогласования, обеспечивая режим регулирования амплитуды. Вторая вибрационная мода при вращении ВТГ-ДУС вокруг измерительной оси (ось чувствительности), параллельной оси симметрии, ориентирована по осям x_1-x_1 , y_1-y_1 . Измерительный блок 5 принимает сигналы пьезоэлементов по оси y_1-y_1 . Управляющий блок 6 принимает сигналы от блока 5, пропорциональные амплитуде угла по оси y_1-y_1 , и формирует управляющий (компенсирующий) сигнал на пьезоэлементы, расположенные по оси x_1-x_1 (вторая ось узла второй вибрационной моды) для сведения к нулю амплитуды сигналов, детектированных блоком 5. Блок 6 на основе детектированного сигнала вырабатывает сигнал, пропорциональный угловой скорости вращения ВТГ-ДУС.

Электроника ВТГ-ДУС содержит аналоговый и цифровой модули. Аналоговый модуль служит для усиления сигналов с пьезоэлементов — датчиков перемещений и для передачи на пьезоэлементы — датчики силы сигналов управления и коррекции.

Цифровой модуль проводит оцифровку сигналов с аналогового модуля, их демодуляцию (определение амплитуды, фазы и т. д.), формирует сигналы управления и коррекции, модулирует их и переводит в аналоговую форму посредством ЦАП. Аналоговый блок размещается непосредственно на гермовыводах 4 (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки) чувствительного элемента. Цифровой вычислитель состоит из программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и контроллера и может осуществлять управление работой от одного до трех резонаторов. ПЛИС цифрового вычислителя выполняет основные операции, время вычисления которых должно быть минимизировано, — опреде-

ление текущих значений частот колебаний, фаз и амплитуд сигналов в узлах и пучностях. Это реализуется за счет особенностей функционирования ПЛИС — параллельной работы всех блоков. Блок "генератор" на рис. 4 по сути является вычислителем, который на основе начальной резонансной частоты текущих амплитуд и фаз сигнала резонатора вычисляет синусные и косинусные амплитуды мгновенных значений в цифровом коде, которые посредством ЦАП преобразуются в управляющие и корректирующие напряжения на пьезоэлементах.

Контроллер выполняет функции связи с потребителем сигнала, определения коэффициентов контуров управления. Начальные параметры ВТГ-ДУС (резонансная частота, амплитуда возбуждения, постоянные поправки) также первоначально передаются в контроллер.

Алгоритмическая и схемотехническая реализации электронного модуля ВТГ-ДУС, соответствующие рис. 4, рассмотрены в работе [11].

Работоспособность ВТГ-ДУС обеспечивается процедурами настройки и калибровки [11]. Настройка обеспечивает резонансный режим работы, а калибровка — максимально возможное ослабление влияния дрейфа резонансной частоты и квадратурной составляющей на масштабный коэффициент, его нелинейность и на смещение нуля в диапазоне измеряемой угловой скорости.

Исполнение ВТГ-ДУС с корпусом, снабженным трехточечным креплением с возможностью установки амортизирующих опор в точках крепления, создает возможность построения трехосного измерительного модуля (рис. 5, см. вторую сторону обложки) для систем ориентации, стабилизации и навигации объектов различного применения (для автомобильного, авиационного и водного транспорта, космических аппаратов, робототехники), которые имеют различные характеристики ударного и вибрационного воздействия на приборы и системы управления.

Конструктивное оформление несущей конструкции измерительного модуля может быть выполнено в соответствии с вариантом его применения.

Исследование характеристик точности ВТГ-ДУС

Определение характеристик точности ВТГ-ДУС проводили с применением измерительного модуля, показанного на рис. 5, с диапазоном

измерения $\pm 650^\circ/\text{с}$ и диапазоном температур эксплуатации $-40...80^\circ\text{C}$ (исходя из диапазона эксплуатации элементной базы, примененной в электронном блоке). Целью испытаний являлось определение следующих характеристик ВТГ-ДУС:

- стабильность коэффициента передачи и нулевого сигнала в диапазоне температур эксплуатации;

- устойчивость ВТГ-ДУС под действием ударов и вибрации.

Значения воздействующих факторов принимали в соответствии с нормами испытаний аналогичных приборов, предназначенных для эксплуатации на борту летательных аппаратов: диапазон угловых скоростей воздействия $\pm 180^\circ/\text{с}$; температурное воздействие $-20...50^\circ\text{C}$ с шагом $+10^\circ\text{C}$; вибрационное воздействие с частотой $10...2500\text{ Гц}$, амплитудой $9,81...15\text{ м/с}^2$, форма воздействия — синус; ударное воздействие с амплитудами 59 м/с^2 , 147 м/с^2 , 441 м/с^2 , 981 м/с^2 при различном числе ударов.

Характеристики ВТГ-ДУС определяли по изменению выходного сигнала независимо от того, что послужило причиной его изменения — измеряемый параметр (угловая скорость) или не измеряемый параметр (температура, ударное или вибрационное воздействие). В виду того, что проведение испытаний на одновременное воздействие вращения и вибрации (удара) невозможно на использованном оборудовании, под устойчивостью понимается нахождение выходного сигнала в допустимом диапазоне во время действия и после снятия нагрузки.

Выходной сигнал ВТГ-ДУС, эквивалентный сигналам в цепи обратной связи компенсации кориолисовой и квадратурной составляющих, регистрировался программным обеспечением. Умножением на постоянный коэффициент показания ВТГ-ДУС из единиц кода приводятся к размерности $[\text{с}]$. В цепи преобразования ВТГ-ДУС на момент проведения испытаний не содержались контуры коррекции температурного влияния.

Последовательность проведения видов испытаний:

- 1) проведение испытаний на воздействие температуры и вращения — определение смещения нулевого сигнала и погрешности коэффициента передачи;

- 2) проведение испытаний на механическое воздействие.

Испытания на воздействие температуры и вращения. Целью проведения испытаний яв-

лялось установление достигнутого на данном этапе работ уровня точности функционирования ВТГ-ДУС при измерении угловой скорости на различных температурах эксплуатации.

Испытания проводили на одноосном поворотном столе, совмещенном с термокамерой. Для каждой температуры испытания алгоритм проведения был следующий: выход термокамеры на режим со скоростью не более 1 °С/мин, выдержка не менее 1 ч, вращение в диапазоне угловых скоростей с шагом 30 °/с и записью выходного сигнала на каждой угловой скорости не менее 2 мин при частоте обновления информации об угловой скорости 500 Гц. На температурах –20 °С, 0 °С, 20 °С и 40 °С дополнительно проводили запись выходного сигнала при нулевой угловой скорости стенда в течение не менее 2 ч.

По записям сигнала на каждой из угловых скоростей определяли коэффициент передачи на каждой температуре. На основании полученных данных определяли как погрешность коэффициента передачи при одной температуре, так и изменение коэффициента передачи в диапазоне температур. При угловой скорости стенда, равной нулю, определялся нулевой сигнал ВТГ-ДУС на каждой температуре испытания.

Погрешности коэффициента передачи на температуре вычисляли по формуле

$$\Delta k_j = \frac{\max(|\omega_{ij} - \omega_{pij}|)}{\Omega_{\max}} \cdot 100, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость, измеренная ВТГ-ДУС; i — задаваемая на стенде угловая скорость (–180...180 °/с с шагом 30°/с); j — температура испытания (–20...50 °С с шагом 10 °С); $\Omega_{\max}$ — максимальная задаваемая угловая скорость 180 °/с; ω_p — расчетное значение угловой скорости.

Расчетное значение угловой скорости для каждой температуры воздействия определяли по формуле

$$\omega_p = k\omega_c + b, \quad (2)$$

где k — коэффициент передачи ВТГ-ДУС на данной температуре; ω_c — угловая скорость стенда; b — смещение нулевого сигнала.

Коэффициенты k и b рассчитывались на основании измеренных ВТГ-ДУС значений угловой скорости по методу наименьших квадратов для каждой температуры.

Результаты вычисления погрешности коэффициента передачи на температуре приведены в табл. 1.

Погрешность измерения угловой скорости на температуре определяли следующим образом:

$$\Delta\omega_{ij} = \omega_{ij} - \omega_{pij}.$$

Таблица 1
Table 1

Погрешность коэффициента передачи на температуре
Scale factor error at temperature

Температура, °С	–20	–10	0	10	20	30	40	50
Погрешность коэффициента передачи, %	0,009	0,065	0,055	0,011	0,0015	0,011	0,015	0,033

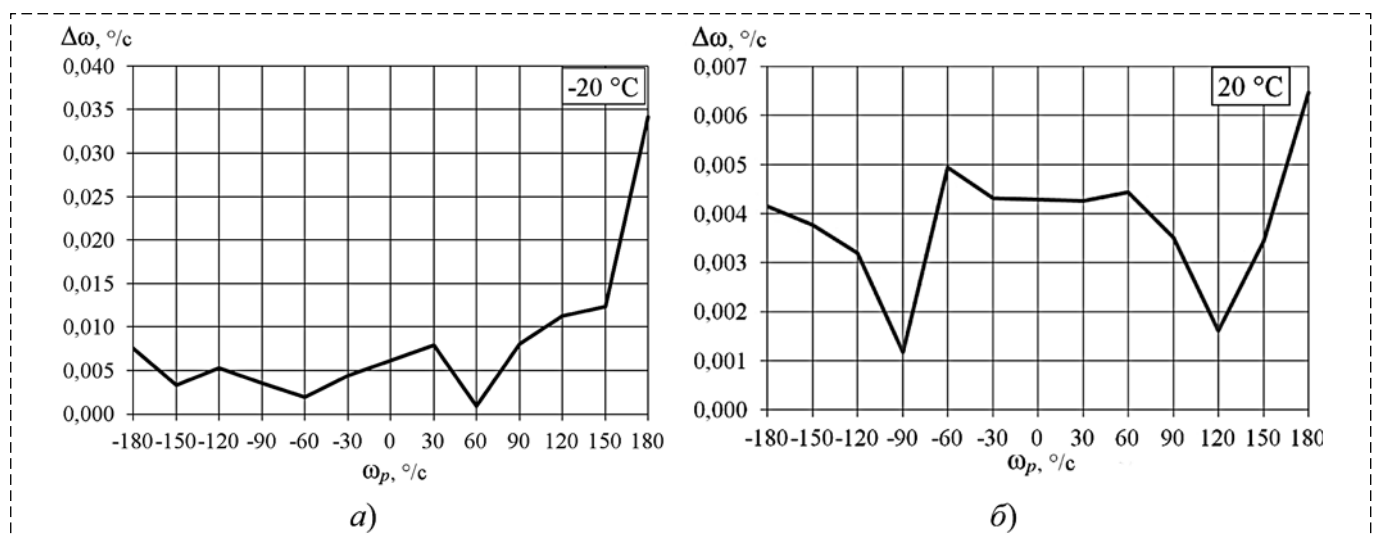


Рис. 6. Отклонение угловой скорости при температурах минус 20 °С (а) и плюс 20 °С (б)

Fig. 6. Deviation of angular rate at temperatures of minus 20 °С (а) and plus 20 °С (б)

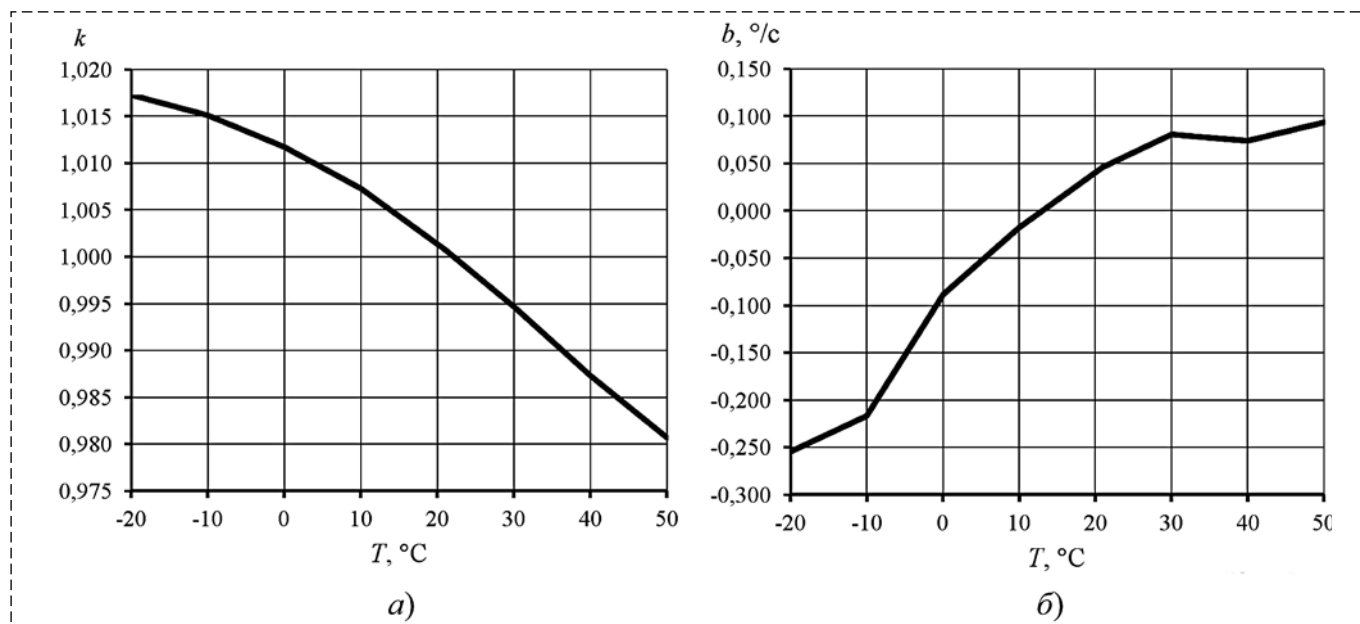


Рис. 7. Относительная погрешность коэффициента передачи (а) и нулевого сигнала (б) от температуры
Fig. 7. Relative error of the scale factor (a) and zero signal (b) over temperature

Графические результаты погрешности измерения угловой скорости для температурах $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 6.

Таблица 2
Table 2

Параметры ВТГ-ДУС
Parameters of SVG-ARS

Параметр	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+21\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Случайное блуждание, $^{\circ}/\sqrt{\text{ч}}$	0,035	0,022	0,0182	0,0185
Нестабильность нуля, $^{\circ}/\text{ч}$	0,2048	0,20016	0,1831	0,6139

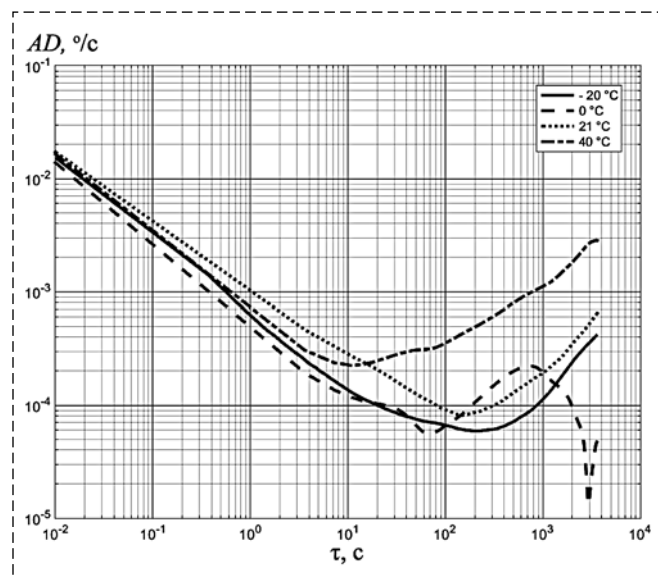


Рис. 8. Отклонения Аллана
Fig. 8. Allan's deviations

Полученные результаты свидетельствуют о высокой стабильности коэффициента передачи при фиксированной температуре.

Значения коэффициента передачи и нулевого сигнала, полученные для каждой температуры, приведены на рис. 7.

В соответствии с рис. 7 максимальное значение $\Delta k \approx 1,7\%$ (вычисление по выражению (1)), откуда следует необходимость температурной коррекции выходного сигнала.

По длительным записям ($\sim 2\text{ ч}$) выходного сигнала на неподвижном основании при температурах $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ рассчитаны отклонения Аллана [12], вычисленные параметры приведены в табл. 2. В графическом виде результаты вычисления представлены на рис. 8.

Из анализа приведенных данных следует возможность построения на базе рассматриваемого ВТГ-ДУС систем ориентации и стабилизации с работой в течение нескольких часов.

Результаты испытаний на ударное воздействие. Целью проведения данного вида испытаний являлось установление допустимых для данной конструктивной реализации резонатора и алгоритмов управления ВТГ-ДУС амплитуд ударных воздействий в направлении оси чувствительности и перпендикулярно ей.

Реакция ВТГ-ДУС (изменение выходного сигнала) при действии механического удара в направлении измерительной оси с амплитудой 147 м/с^2 в графическом виде представлена на рис. 9, а (см. третью сторону обложки), для

амплитуды удара 441 м/с^2 — на рис. 9, б (см. третью сторону обложки).

На основе результатов испытаний на ударное воздействие можно сделать следующие выводы:

- с увеличением амплитуды удара увеличивается амплитуда выходного сигнала, но не пропорционально амплитуде удара;

- удар с амплитудой 441 м/с^2 является максимально допустимым в направлении измерительной оси для данного образца ВТГ-ДУС (имеются в виду конструктивные размеры резонатора и параметры контуров управления), так как выходной сигнал находится практически на границе диапазона измерения. Превышение амплитуды удара приводит к нарушению в работе контура поддержания колебаний и, как следствие, к потере работоспособности ВТГ-ДУС. Восстановление работоспособности возможно только при повторном включении;

- форма ударного воздействия и форма выходного сигнала ВТГ-ДУС существенно отличаются из-за наличия демпферов в узлах крепления корпуса.

Проведение испытаний на ударное воздействие в направлении оси, перпендикулярной измерительной, показало стойкость ВТГ-ДУС в диапазоне амплитуд ударных воздействий до 882 м/с^2 .

Результаты испытаний на вибрационное воздействие. Целью проведения испытаний являлось получение информации о поведении резонатора и контура поддержания колебаний при действии вибрации. На основании полученной информации определены допустимые частотные и амплитудные границы воздействия, в которых возможно функционирование разработанного ВТГ-ДУС с обеспечением характеристик точности.

Вибрационные испытания при использовании электродинамических стендов сопровождаются воздействием на испытываемый объект электромагнитных помех. Для исследуемого образца ВТГ-ДУС зафиксировано увеличение шумовой составляющей в пять раз (с $0,1 \text{ %}$ до $0,5 \text{ %}$ — размах) при включении оборудования в рабочий режим без вибрации. Шум имеет нормальное распределение и не содержит постоянной составляющей.

Испытания на воздействие вибрации проводили в несколько этапов: первый — поиск резонансов конструкции (ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$, диапазон частот $10...2500 \text{ Гц}$); второй — стойкость на воздействие вибрации (ускорение

$9,81...98,1 \text{ м/с}^2$, диапазон частот $10...2000 \text{ Гц}$); третий — стойкость на воздействие вибрации (ускорение $29,4...147,2 \text{ м/с}^2$, диапазон частот $10...2000 \text{ Гц}$ с большей скоростью прохождения октавы).

В процессе проведения первого этапа выявлен резонанс демпфирующей опоры в диапазоне частот $300...450 \text{ Гц}$. При проведении испытаний на втором и третьем этапах в диапазоне $250...500 \text{ Гц}$ амплитуда вибрационного воздействия была минимизирована.

Результаты испытаний по второму этапу приведены на рис. 10 (см. третью сторону обложки). Анализ графика показывает наличие частот воздействия, на которых происходит существенное изменение реакции ВТГ-ДУС, но при этом контуром управления поддерживается режим работы. Наряду с этим присутствуют частоты, при которых происходит срыв работы контура поддержания колебаний, работа которого самостоятельно восстанавливается после изменения частоты воздействия.

Существенным отличием реакции ВТГ-ДУС при проведении испытаний на третьем этапе (рис. 11, см. третью сторону обложки) является значительно большая амплитуда шумовых всплесков в области малых частот воздействия от 10 до 100 Гц .

Диапазоны частот устойчивости к вибрации на рис. 10, 11 (см. третью сторону обложки) обозначены следующим образом:

на рис. 10: 1 — $10...92 \text{ Гц}$, 2 — $500...560 \text{ Гц}$ и 3 — $610...870 \text{ Гц}$;

на рис. 11: 1 — $10...38 \text{ Гц}$, 2 — $45...55 \text{ Гц}$, 3 — $150...200 \text{ Гц}$, 4 — $1615...1700 \text{ Гц}$ и 5 — $1900...2000 \text{ Гц}$.

Анализ результатов испытания на вибрационное воздействие показал, что имеются диапазоны частот, при которых сохраняется виброустойчивость ВТГ-ДУС. Для его применения во всем диапазоне широкополосной вибрации необходимо внести изменения либо в конструкцию резонатора, либо в алгоритм управления им в зависимости от диапазона и амплитуд вибрационного воздействия.

Заключение

Разработан ВТГ с металлическим резонатором, работающий в режиме ДУС. Гироскоп изготовлен в составе опытной партии на серийном заводе по разработанной им технологии.

На стендовом оборудовании отдела испытаний профильного предприятия проведены испытания ВТГ-ДУС по нормам, аналогичным для приборов, применяемых на борту ЛА.

Определены нулевой сигнал, случайное блуждание выходного сигнала и нестабильность его масштабного коэффициента для диапазона температур от $-20...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и диапазона измеряемых угловых скоростей $\pm 180^{\circ}/\text{с}$.

Полученные значения характеристик точности ВТГ-ДУС достаточны для его применения в течение нескольких часов в системах ориентации, стабилизации и навигации для объектов, механические воздействия со стороны которых не нарушают виброустойчивость и ударную прочность гироскопа.

Для динамичных объектов с большими значениями амплитуды и диапазона частот вибраций полученные результаты могут быть использованы для определения направлений конструкторской доработки резонатора и электроники управления для заданных значений механических возмущений.

Список литературы

1. **Bryan G. H.** On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell // Proc. of Cambridge Phil. Soc. 1890, Nov. 24. Vol. VII. Pt. III. P. 101—111.

2. **Линч Д.** Взгляд компании "НОРТРОП ГРУММАН" на развитие инерциальных технологий // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 102—106.

3. **Lynch D. D.** Vibratory gyro analysis by the method of averaging // Proceedings of the 2nd St. Petersburg conference on gyroscopic technology and navigation. St. Petersburg. 1995. P. 26—34.

4. **Lynch D. D.** Coriolis vibratory gyroscope // IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros. IEEE std.1431 annex B. 2004. P. 56—66.

5. **Журавлев В. Ф., Климов Д. М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.

6. **Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В.** Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 165 с.

7. **Распопов В. Я., Волчихин И. А., Волчихин А. И., Ладонкин А. В., Лихошерст В. В., Матвеев В. В.** Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. 189 с.

8. **US Patent** № US 2006/0266116 A1, 30.11.2006. Coriolis force gyroscope with high sensitivity // United States Patent 7281425 B2, 2007 / Valery V. Chikovani, Kiev (UA); Yuri A. Yatsenko, Kiev (UA); Vladimir A. Kovalenko, Kiev (UA).

9. **Chikovani V.** Secondary wave control system of the Coriolis vibratory gyroscope resonator // Electronics and Control Systems. 2013. N. 3. P. 58—61.

10. **Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barabashov A. S., Kovalenko V. A., Tewksbury P. A** Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG // Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, September 2007. P. 1345—1350.

11. **Распопов В. Я., Алалуев Р. В., Ладонкин А. В., Лихошерст В. В., Шепилов С. И.** Настройка и калибровка волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором, работающего в режиме датчика угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 1. С. 31—41. DOI 10.17285/0869-7035.0019.

12. **IEE Std 1421-2004.** Standart Specification Form Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, 2004.

Angular Rate Sensor Based on a Solid-State Wave Gyroscope with a Metal Resonator for Attitude Control, Stabilization and Navigation Systems

V. Ya. Raspopov, tgupu@yandex.ru, **V. V. Likhosherst**, lvv_01@inbox.ru,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation

Corresponding author: **Vladimir Raspopov Ya., D.**, Professor,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: tgupu@yandex.ru

Accepted on April 02, 2021

Abstract

The article describes the methods and test results of a solid-wave gyroscope (SVG) — an angular rate sensor (ARS), developed at the Department of Control Devices, Tula State University and manufactured by the serial plant of JSC "Michurinsky Plant" Progress "according to the technology it worked out. The metal resonator SVG-ARS is made of an elinvar alloy and has a cylindrical structure of different thickness, the lower part of which, with a smaller wall thickness, acts as a suspension for the upper cylinder, the resonator itself, which has a conical shape, providing better vibration localization at its end edge. Technological manufacturing defects, different frequencies and variability, are eliminated by balancing "by mass" based on the removal of excess metal at certain points on the end edge of the resonator. The electronic module provides the second mode of primary and secondary oscillations of the resonator edge arising during rotation and creates a signal to compensate for the Coriolis and quadrature components of the output signal at the nodes. The maximum amplitudes of the excitation and compensation signals do not exceed 10 V. Therefore, at large values of mechanical influences, the compensation circuit may not work out the increased signal and the SVG-ARS loses its operability. The total processing time of the compensation signal does not exceed 1 μs . The maximum power consumption of the electronic module is not more than 4 W. When testing for mechanical and temperature effects, the norms were used that are typical for similar devices (angular rate sensors) used on board aircraft. The tests were carried out on the bench equipment of a

specialized enterprise. The stability of the zero signal and the scale factor was determined under the simultaneous action of the measured speed and temperature on the SVG-ARS. The values of the random walk and the instability of the zero signal were obtained from the Allan deviation plots. Their values provide a basis for the conclusion about the possibility of using the developed SVG for several hours on board dynamic aircraft in orientation, stabilization and navigation systems. It was found that SVG-ARS possesses impact strength and restores its measuring ability after impact. Tests for vibration resistance revealed resonance frequencies and frequency ranges in which the tested VTG-DUS sample can be used without significant modification. The results of vibration tests can be used to refine the design and control electronics for the operating conditions of a particular aircraft.

Keywords: wave solid state gyroscope, rotation, temperature, shock, vibration

For citation:

Raspopov V. Ya., Likhosherst V. V. Angular Rate Sensor Based on a Solid-State Wave Gyroscope with a Metal Resonator for Attitude Control, Stabilization and Navigation Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 7, pp. 374—382.

DOI: 10.17587/mau.22.374-382

References

1. **Bryan G. H.** On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell, *Proc. of Cambridge Phil. Soc.* 1890, Nov. 24, vol. VII, pt. III, pp. 101—111.
2. **Lynch D.** View of the company "NORTHROP GRUMMAN" on the development of inertial technologies, *Gyroscopy and navigation*, 2008, no. 3, pp. 102—106 (in Russian).
3. **Lynch D. D.** Vibratory gyro analysis by the method of averaging, *Proceedings of the 2nd St. Petersburg conference on gyroscopic technology and navigation*, St. Petersburg, 1995, pp. 26—34.
4. **Lynch D. D.** Coriolis vibratory gyroscope, *IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros*, IEEE std.1431 annex B, 2004, pp. 56—66.
5. **Zhuravlev V. F., Klimov D. M.** Wave solid state gyroscope, Moscow, Nauka, 1985, 125 p. (in Russian).
6. **Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V.** Designing a wave solid-state gyroscope, Moscow, Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 1997, 165 p. (in Russian).
7. **Raspopov V. Ya., Volchikhin I. A., Volchikhin A. I., Ladonkin A. V., Likhosherst V. V., Matveev V. V.** Wave solid-state gyroscope with a metal resonator, Tula, Publishing house of TulSU, 2018, 189 p. (in Russian).
8. **US Patent № US 2006/0266116 A1**, 30.11.2006. Coriolis force gyroscope with high sensitivity, United States Patent 7281425 B2, 2007, Valery V. Chikovani, Kiev (UA); Yuri A. Yatsenko, Kiev (UA); Vladimir A. Kovalenko, Kiev (UA).
9. **Chikovani V.** Secondary wave control system of the Coriolis vibratory gyroscope resonator, *Electronics and Control Systems*, 2013, no. 3, pp. 58—61.
10. **Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barabashov A. S., Kovalenko V. A., Tewksbury P.** A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG, *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, Fort Worth, TX, September 2007, pp. 1345—1350.
11. **Raspopov V. Ya., Alaluev R. V., Ladonkin A. V., Likhosherst V. V., Shepilov S. I.** Tuning and calibration of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator operating in the mode of an angular velocity sensor, *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 31—41. DOI 10.17285/0869-7035.0019 (in Russian)
12. **IEE Std 1421-2004.** Standart Specification Form Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, 2004.