

В. Я. Распопов, д-р. техн. наук, зав. кафедрой, tgupu@yandex.ru,

А. В. Ладонкин, канд. техн. наук, доц., tlsandos@rambler.ru,

В. В. Лихошерст, канд. техн. наук, доц., lvv_01@inbox.ru,

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
"Тульский государственный университет"

Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором¹

Рассмотрены конструкция и особенности изготовления волнового твердотельного гироскопа-датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС) с металлическим резонатором, для возбуждения и детектирования колебаний которого применены пьезоэлементы.

Так как технические характеристики ВТГ в основном определяются резонатором, его конструкция является определяющей в составе ВТГ. Для изготовления высокочастотного металлического резонатора ВТГ с заданными свойствами хорошим выбором является прецизионный сплав 21НКМТ-ВИ. Устранение дефектов изготовления резонатора, которые приводят к разночастотности и разнородности, достигается балансировкой. Базовым методом является балансировка по 4-й форме распределения дефектов масс. Калибровка ВТГ с блоком электроники является завершающим этапом изготовления ВТГ, в результате которой достигается: обеспечение условия резонансной настройки чувствительного элемента, определение коэффициентов обратных связей контура удержания колебаний, определение метрологических характеристик ВТГ и получение функции коррекции выходного сигнала от различных параметров после проведения комплекса испытаний.

При определении функции коррекции учитывался тот факт, что сигналы подавления квадратурной и кориолисовой составляющих являются не абсолютно независимыми, а в какой-то мере смешанными. При демодуляции сигнала узла на квадратурную и кориолисовую составляющие приходится анализировать сигнал, прошедший через пьезоэлементы, усилители и АЦП. Каждый из этих элементов может вносить зависящий от температуры фазовый сдвиг в сигнал узла. Частично этот фазовый сдвиг может быть учтен, но не с абсолютной точностью. Поэтому выходной сигнал ВТГ необходимо рассматривать как линейную комбинацию сигналов квадратурной и кориолисовой составляющих сигнала компенсации. Для уменьшения амплитуды шумовых составляющих выходного сигнала возможно применение различных типов сглаживающих фильтров.

Результаты испытаний разработанного ВТГ-ДУС подтверждают его конкурентоспособность по сравнению с иностранным аналогом. Вся электроника управления может быть построена на отечественной элементной базе.

Ключевые слова: гироскоп, волновой, твердотельный, резонатор, балансировка, калибровка, изготовление, испытания

Введение

В статье Дж. Х. Брайана "О биении колебаний вращающегося цилиндра или конуса", опубликованной в трудах Кембриджского философского общества в 1892 г. [1], приведено математическое описание природы биений, возникающих на кромке колеблющейся оболочки, установленной на вращающемся основании.

Прибор, использующий свойства инертности стоячей волны вибрирующей оболочки и

ее прецессии под действием сил инерции Кориолиса [2], получил название волнового твердотельного гироскопа (ВТГ).

Брайан рассмотрел случай равномерного вращения вибрирующей оболочки. Д. Линч (США) [3] доказал справедливость эффекта Брайана и для переменной скорости вращения оболочки. Теоретическое доказательство применимости эффекта Брайана для любого закона вращения оболочки было выполнено В. Ф. Журавлевым и Д. М. Климовым [4].

Достоинства ВТГ (относительная простота конструкции при сравнительно небольших габаритных размерах, массе и потребляемой мощности, высокая точность при малых слу-

¹Результаты исследования опубликованы при финансовой поддержке ТулГУ в рамках научного проекта № 8719 от 18.12.2017 г.

чайных погрешностях, способность работать в сложных условиях эксплуатации и др.) делают его одним из наиболее перспективных гироскопических приборов [5, 6].

Многолетний опыт разработок ВТГ в разных странах, в том числе в России, показал, что они проводятся в двух основных направлениях [6, 7], связанных с особенностями внутреннего трения в материалах, используемых для изготовления резонаторов ВТГ.

Точные ВТГ для навигации и наведения могут быть созданы только на базе резонаторов из кварцевого стекла, обладающих высокой добротностью и изотропией упругих свойств, и характеризуются значениями нестабильности смещения нуля $\leq 0,01$ $^{\circ}/\text{ч}$. Изготовление подобных ВТГ требует применения сложных технологий механической, термической и химической обработок, и, как следствие, себестоимость их изготовления высока.

Второе направление связано с созданием ВТГ на базе резонаторов из металла (металлических сплавов). Уровень внутреннего трения у металлов на 2...3 порядка больше, и изготовленные из них резонаторы имеют характеристики хуже, чем из кварцевого стекла. Однако ВТГ с подобными резонаторами обеспечивают нестабильность смещения нуля в пределах (0,1...15) $^{\circ}/\text{ч}$, достаточную для решения задач тактического класса. Существуют задачи, для которых допустимо значение нестабильности смещения нуля гироскопа > 15 $^{\circ}/\text{ч}$. Себестоимость этих гироскопов значительно меньше, чем ВТГ с резонатором из кварцевого стекла.

К настоящему времени опубликовано значительное число монографий, статей, патентов, материалов диссертаций и докладов по проблематике ВТГ, наиболее полная библиография которых приведена в работе [7], являющейся развитием ранее изданных монографий [8—10].

В немногочисленных статьях, например [11—16], по разработкам волнового твердотельного гироскопа-датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС) с металлическим резонатором содержится информация о реализованных конструкциях ВТГ, а также решения некоторых важных, частных задач по разработке этих гироскопов.

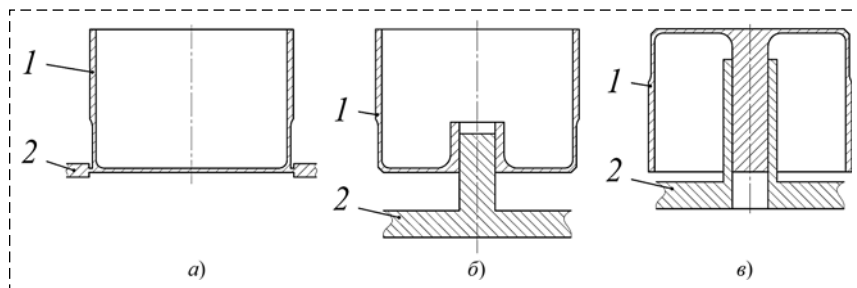


Рис. 1. Типовые формы резонаторов:

а — "Стакан"; б — "Рюмка" ("Бокал"); в — "Гриб" (1 — резонатор; 2 — основание)

Fig. 1. Typical forms of resonators:

а — "Glass"; б — "Wineglass"; в — "Mushroom" (1 — resonator; 2 — base)

Резонатор

В осесимметричных резонаторах, таких как представленный на рис. 1, или резонаторах других конфигураций (полусферических, тороидальных) упругая волна возбуждается на второй моде колебаний резонатора с заданной амплитудой, которая стабилизируется с помощью системы автоматического управления амплитудой и фазой.

Эта стоячая волна (рис. 2) имеет четыре пучности a, g, e, c , расположенные на осях x, y и четыре узла b, h, f, d на осях x_1, y_1 , в которых

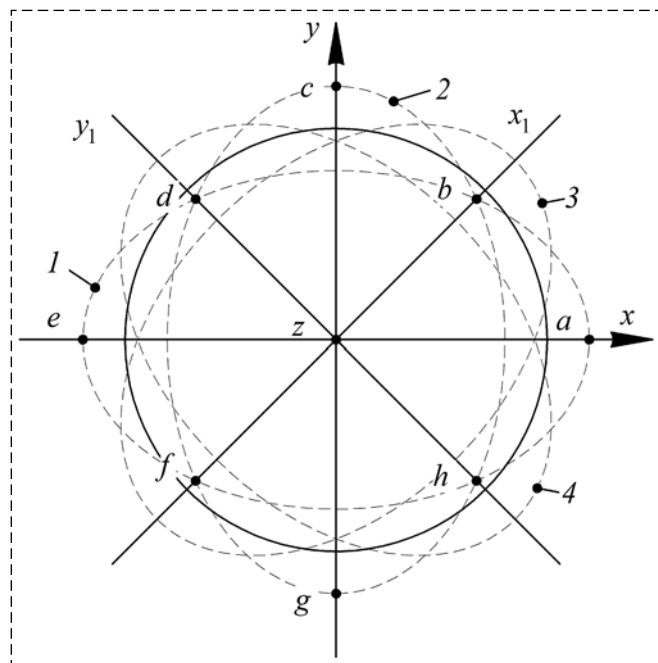


Рис. 2. Схема расположения первичных и вторичных вибраций резонатора:

1, 2, 3, 4 — эллиптические моды

Fig 2. The layout of the primary and secondary vibrations of the resonator:

1, 2, 3, 4 — elliptical modes

амплитуды колебаний максимальны и минимальны соответственно.

Первая вибрационная мода 1, 2 показана для двух моментов времени относительно недеформированной кромки резонатора, которая к концу полупериода переходит от эллипса 1 к эллипсу 2. Вращение гироскопа вокруг оси z приводит к возникновению сил инерции Кориолиса, которые вызывают смещение вибрационных пучностей относительно окружности кромки резонатора. Иными словами, вращение резонатора вызывает вторичные вибрации в форме эллиптической моды 3, 4, для которой главные оси x_1, y_1 расположены под углом 45° к осям x, y . Вибрация проходит от эллипса 3 к эллипсу 4 в конце полупериода. По осям x_1, y_1 расположены измерители перемещений (детектирующие элементы) кромки резонатора, сигналы которых характеризуют угловую скорость и/или угол поворота вокруг оси z.

Для возбуждения и детектирования колебаний применяют преобразователи различной физической природы. Предпочтительно использование преобразователей, работающих и как датчики перемещений, и как датчики силы. Например, в пьезоэлектрических преобразователях используются прямой и обратный пьезоэффекты.

На рис. 3 в соответствии с рис. 2 приведена функциональная схема работы гироскопа в режиме силовой компенсации в предположении, что в качестве преобразователей используются пьезоэлементы 1 (a, b, c, d, e, f, g, h), расположенные на одной из торцевых поверхностей резонатора 2 (см. рис. 1, б, в). Генератор 3 (рис. 3) электрических сигналов возбуждает пьезоэлементы 1a, 1e, расположенные по оси 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 гироскопа ориентирована по осям X_1, Y_1 . Измерительный блок 5 принимает сигналы с пьезоэлементов 1b, 1f. Управляющий блок 6 принимает от блока 5 сигнал, пропорциональный амплитуде узла по оси X_1 , и формирует управляющий (компенсирующий) сигнал на пьезоэлементы 1d, 1h, расположенные по оси y_1 (вторая ось узла второй вибрационной моды резонатора) для сведения к нулю амплитуды сигналов, детектированных

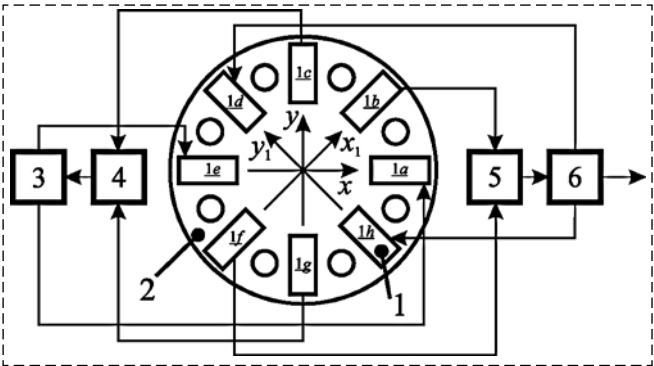


Рис. 3. Функциональная схема электроники режима силовой компенсации:

1 — пьезоэлемент (8 шт.); 2 — резонатор; 3 — генератор; 4, 5 — измерительные блоки; 6 — управляющий блок

Fig. 3. Functional diagram of the compensation mode electronics: 1 — piezoelectric element (8 pcs.); 2 — resonator; 3 — generator; 4, 5 — measuring blocks; 6 — control unit

блоком 5. Этот блок на основе компенсирующего сигнала вырабатывает сигнал, пропорциональный угловой скорости Ω .

Прототипом многих разработок ВТГ является конструкция гироскопа компании Innalabs, Ltd (рис. 4) [7]. Конструкция резонатора (рис. 5) включает кольцо 1, которое формирует рабочую зону в виде вибрирующей кромки резонатора, подвес 2, представляющий единое целое с дном резонатора и элементом 4 узла крепления с основанием (корпусом). Подвес имеет толщину меньше, чем у кольца. По наружной поверхности дна размещены через 45° восемь пьезоэлементов 3.

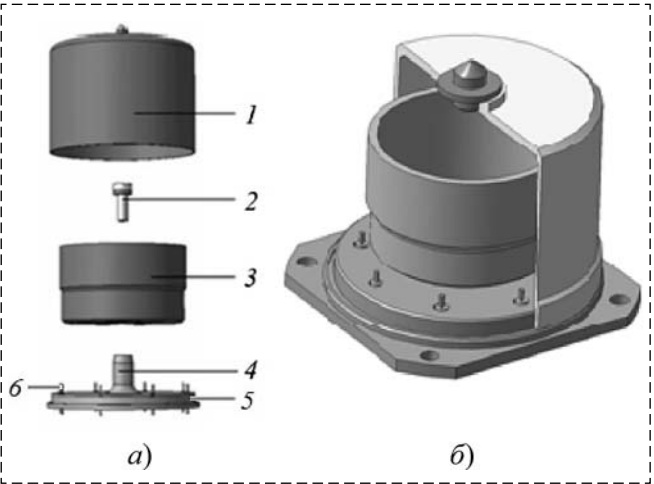


Рис. 4. Элементы (а) и общий вид (б) ВТГ (Innalabs, Ltd):

1 — кожух (крышка); 2 — винт; 3 — резонатор; 4 — элемент ("ножка") узла крепления; 5 — основание; 6 — гермовывод

Fig. 4. Elements (a) and general view (b) of CVG (Innalabs, Ltd): 1 — housing; 2 — the screw; 3 — resonator; 4 — the element of the fastening unit; 5 — base; 6 — hermetic outlet

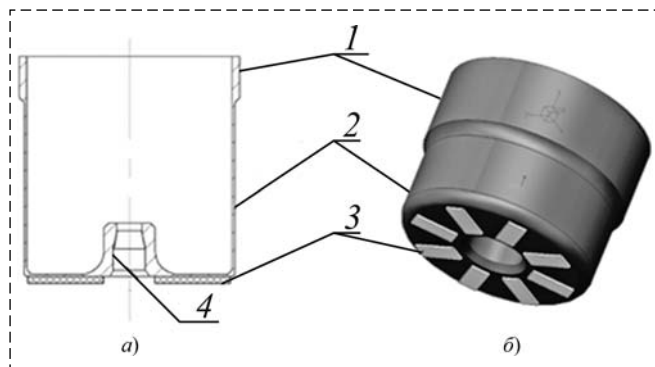


Рис. 5. Разрез (а) и общий вид (б) цилиндрического резонатора:
1 — кольцо; 2 — подвес; 3 — пьезоэлемент; 4 — элемент крепления с корпусом

Fig. 5. The cut view (a) and the general view (b) of the cylindrical resonator:

1 — ring; 2 — suspension; 3 — piezoelectric element; 4 — fastening element with body

Возбуждение изгибных колебаний в рабочей зоне резонатора с образованием стоячей волны осуществляется двумя парами пьезоэлементов, линии расположения которых ориентированы под углом 90° друг к другу.

Пары пьезоэлементов, повернутые по отношению друг к другу также на 90° , но сдвинутые по отношению к пьезоэлементам возбуждения на 45° , образуют группу измерительных пьезоэлементов.

При условии, что резонатор представляет идеальный двумерный осциллятор, физической моделью которого является кольцо или цилиндр, чьи колебания подчиняются тем же закономерностям, выделяются две оси: легкая, вдоль которой собственная частота колебаний

максимальна, и тяжелая, вдоль которой эта частота минимальна. Эти оси расположены под углом 45° друг к другу, т. е. совпадают с направлениями пучностей и узлов возбуждаемой волны. Разная частотность (разночастотность) имеет значения (2...10) Гц.

Оси, по которым ориентированы (закреплены) пьезоэлементы или любые другие возбуждающие и измерительные элементы, называются физическими осями. Эти оси должны совпадать с так называемыми электрическими осями, вдоль которых направлены фактические оси электрической симметрии элементов возбуждения и измерения. В реальном резонаторе физические и электрические оси могут находиться на угловом расстоянии от 1 до 22° . В реальном производстве резонаторы далеки от своих теоретических моделей.

В качестве примера для схемы резонатора, представленной на рис. 6, с номинальными размерами, приведенными в табл. 1, для материала *AISI 304* методом конечно-элементного моделирования для второй формы колебаний получено значение собственной частоты $\omega_0 = 4458,6$ Гц = 28 000 рад/с. Этим же методом выполнен анализ влияния отклонений от номинальных размеров резонатора на изменение номинального значения его собственной частоты.

Необходимо иметь в виду, что колебания рабочей зоны резонатора на частоте второй собственной моды сопровождаются дополни-

Таблица 1

Значения размеров и частот резонатора
Table 1. The values of the dimensions and frequencies of the resonator

Обозначение размера	Номинальное значение размера, мм	Отклонение размера, мм	Отклонение частоты, Гц
D1, мм	22	-0,021 (-0,095 %)	-53,8 (-1,21 %)
D2, мм	20,6	+0,021 (+0,101 %)	-67,0 (-1,5 %)
D3, мм	21,6	-0,021 (-0,097 %)	-5,2 (-0,1 %)
H1, мм	16	-0,11 (-0,69 %)	+11,7 (+0,23 %)
H2, мм	0,5	+0,02 (+2 %)	+5,2 (+0,12 %)
		-0,02 (-2 %)	+6,0 (+0,14 %)
H3, мм	10	+0,1 (+1 %)	+4,2 (+0,094 %)
		-0,1 (-1 %)	-2,2 (-0,05 %)

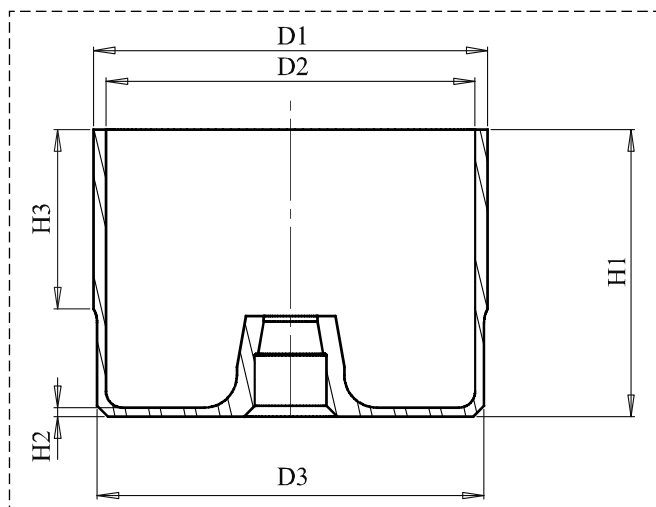


Рис. 6. Характерные размеры резонатора
Fig. 6. Characteristic dimensions of the resonator

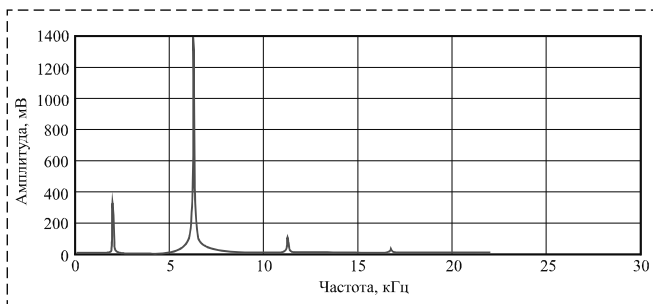


Рис. 7. Амплитудный спектр колебаний резонатора
Fig. 7. Amplitude spectrum of resonator oscillations

тельными, паразитными колебаниями элементов резонатора на боковых частотах, которые необходимо принимать во внимание при его проектировании с учетом внешних вибрационных возмущений [4].

В качестве примера на рис. 7 для резонатора (см. схему на рис. 6) приведен результат экспериментального исследования спектра колебаний резонатора с размерами: $D1 = 23,6$ мм, $D2 = 20,6$ мм, $D3 = 21,5$ мм, $H1 = 16,0$ мм, $H2 = 0,45$ мм, $H3 = 9,0$ мм. Эксперимент показал, что имеются амплитудные пики колебаний на частотах: 1958,127 Гц — мембранная мода колебаний на дне резонатора; (6206, 489...6208,567) Гц — вторая собственная мода; (11224,681...11230, 411) Гц — на "ножке" резонатора; (16706,70...16711,35) Гц — третья собственная мода резонатора.

На рис. 8 (см. вторую сторону обложки) показаны результаты конечно-элементного моделирования распределения деформаций и напряжений в элементах резонатора.

Так как технические характеристики ВТГ в основном определяются резонатором, его конструкция является определяющей в составе ВТГ.

Опытный образец гироскопа

Конструкция

Конструкция гироскопа однотипна с прототипом (см. рис. 4), в качестве которого выбран гироскоп по патенту *US № 7.281.425 B2* фирмы *Innalabs Technologies, Inc*, конструкция которого в вариантах повторена в отечественных разработках (патенты *RU № 2.544.870 C2*, *RU № 2.445.575 C2*, *RU № 151.978 U8*).

Конструкция ВТГ приведена на рис. 9. Резонатор 1 с пьезоэлементами образуют чувствительный элемент прибора, который крепится к жесткому корпусу 3, закрываемому кожухом 2.

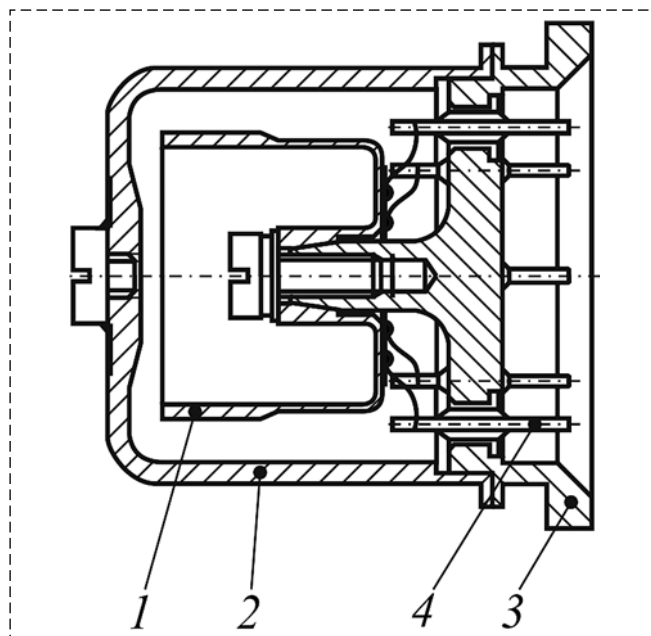


Рис. 9. Конструкция опытного образца ВТГ:

1 — резонатор; 2 — кожух (крышка); 3 — корпус (основание); 4 — гермовывод

Fig. 9. The design of the prototype VTG:

1 — resonator; 2 — casing; 3 — body (base); 4 — hermetic outlet

Герметичность внутренней полости прибора достигается шовной сваркой по периметру стыка между корпусом и кожухом, а также применением гермовыводов 4, через которые осуществляется электрическая связь гироскопа с электрическим блоком управления его работой.

Работа волнового твердотельного гироскопа в режиме ДУС не накладывает ограничений на значение угловой скорости поворота корпуса.

Материал

Для создания гироскопических приборов на основе твердотельных металлических резонаторов требуются материалы, имеющие минимальную температурную зависимость и высокую механическую добротность (Q).

Тщательный выбор сплава, из которого изготовлен чувствительный элемент ВТГ, вызван не только прямым влиянием свойств материала на свойства чувствительного элемента. Для улучшения характеристик резонатора требуются технологические "рычаги" воздействия на структуру металла, доступные в реальном производстве. Это позволяет получать прогнозируемые и повторяемые от партии к партии свойства сплава, следовательно — резонатора. Получение заданных и повторяемых свойств материала заготовки является важнейшим

фактором, обеспечивающим постоянство параметров ВТГ.

Для изготовления высокочастотного металлического резонатора ВТГ с заданными свойствами хорошим выбором является прецизионный сплав 21НКМТ-ВИ. Выбор этого сплава из всего многообразия аналогов сделан на основе систематизации и обобщения современных исследований дисперсионно-твердеющих элинваров и влияния основных легирующих элементов на свойства и структуру при термической обработке. Данный сплав, получающий определенную структуру в результате цикла термической обработки, имеет необходимый для резонатора ВТГ баланс между инварными и элинварными свойствами, высокую добротность, линейные термоупругие свойства, оптимальное структурно-энергетическое состояние [17–20].

Высокая твердость и прочность предъявляют особые требования к технологии и точности механической обработки изделий из этого сплава, механические характеристики которого приведены ниже.

Механические свойства сплава 21НКМТ-ВИ

Временное сопротивление (σ_B), Н/мм ² . . .	1500...1600
Предел текучести (σ_T), Н/мм ²	1500...1600
Твердость (HRC)	40...45
Механическая добротность (Q)	
на воздухе	30...60 · 10 ³
TKЧ × 10 ⁻⁶ 1/°C в интервале температур	
(-40...60 °C)	+3...+3
Плотность (ρ), кг/м ³	7850
Коэффициент внутреннего трения (μ)	0,3
Коэффициент затухания (β)	0,79
Модуль Юнга, Па	1,86 · 10 ¹¹

Изготовление

В табл. 2 представлен общий цикл термической и механической обработки заготовки.

Сборочные единицы гироскопа в соответствии с рис. 9 показаны на рис. 10 (см. вторую сторону обложки). Резонатор 1, на наружной поверхности дна которого наклеиваются пьезоэлементы 2, устанавливается на основание 3 с помощью узла крепления и фиксируется винтом 9 с шайбой 10. С наружной стороны к основанию припаивается вывод заземления 4. Гермывыводы 5 представляют собой проводники (электроды), пропущенные через герметичные изоляторы (стеклоспай), которые заключены в металлические оболочки. После установки гермывыводов в основание оболочки пропаиваются по периметру. Внутренние концы электродов соединяются пайкой посеребрёнными проводниками с пьезоэлементами. Сборка резонатора закрывается крышкой 6, которая в дальнейшем пропаивается по периметру установки на основание. Отверстие в крышке закрывается заглушкой 8 с уплотнительным кольцом 7.

На рис. 11 (см. третью сторону обложки) показаны сборочные единицы, соответствующие рис. 10, и предварительно собранный чувствительный элемент, который передается на балансировку.

Балансировка

Угловое распределение массы резонатора в зависимости от окружного угла φ можно представить в виде ряда Фурье [4, 8, 21]:

$$M(\varphi) = M_0 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i \cos_i(\varphi - \varphi_i),$$

где i — номер формы массового дефекта; M_i — значение i -й формы дефекта; φ_i — угол, определяющий ориентацию данной формы дефекта относительно условного нуля окружного угла.

В работе [22] показано, что на качество балансировки оказывают влияние первые че-

Таблица 2

Совмещенный технологический цикл обработки
Table 2. Combined technological cycle processing

1 этап: закалка	2 этап: обработка холодом	3 этап: механическая обработка	4 этап: отпуск	5 этап: механическая обработка	6 этап: старение
950 °C, 1 ч, среда — вакуум 1·10 ⁻³ мм рт. ст. охлаждение в воду	15 мин в жидком азоте или камера холода — 70 °C, 1 ч	Черновое точение заготовки	575...590 °C, 4 ч, среда — вакуум 1·10 ⁻³ мм рт. ст.; охлаждение с печью до 100 °C, далее на воздухе	Чистовое точение	300...350 °C, 4 ч, среда — вакуум 1·10 ⁻³ мм рт. ст.; охлаждение с печью до 100 °C, далее на воздухе

тыре члена ряда, характеризующие соответствующую форму дефекта (рис. 12, см. третью сторону обложки). При отличных от нуля значениях M_i возникают колебания центра масс резонатора, что приводит к рассеиванию энергии его колебаний.

Суть балансировки заключается в определении значений M_i , φ_i и удалении избыточной массы. При $M_4 \neq 0$ чисто стоячая волна может быть возбуждена на двух резонансных частотах только в двух положениях, разнесенных между собой на 45° . При этом разность резонансных частот пропорциональна M_4 , а направление низкочастотной ("тяжелой") оси определяют при φ_4 . Определение параметров M_i , φ_i для $i = 1, 2, 3$ представляет более сложную задачу. При балансировке ВТГ подавление любой из форм массового дефекта устраняет ее, но одновременно создает такие же по значению кратные формы массового дефекта. Так, например, подавление 1-й формы массового дефекта одновременно создает 2-ю, 3-ю и 4-ю формы, которые необходимо устранять, причем их последующая балансировка также будет сопровождаться появлением кратных гармоник.

Базовым методом является балансировка по 4-й форме распределения дефектов масс. При этом метод "усеченной" балансировки по 4-й форме заключается в сведении разности собственных частот резонатора к минимуму. С помощью такой балансировки можно получить гироскопические приборы низкого и среднего класса точности (незначительная часть). Это "потолок" возможностей данного метода. Для получения ВТГ среднего класса точности требуется метод "полной" балансировки по 4-й форме с удалением отдельно косинусной и синусной составляющих данной формы дефекта.

Для получения характеристик гироскопического прибора среднего класса точности на основе ВТГ чувствительный элемент (резонатор) должен иметь после сборки и балансировки следующие параметры:

1) разница в собственной частоте между четырьмя осями резонатора (в резонансе) — 0,05 Гц и менее;

2) разница амплитуд колебаний на резонансной частоте между четырьмя осями — в пределах 1...3 %;

3) отклонение воображаемого вектора, выходящего из точки максимума амплитуды колебаний оси резонатора и направленного к центру, — в пределах 1...3° от точки, лежащей

на воображаемой линии симметрии пьезоэлектрического элемента данной оси (делящей его на равные части по длине). Другими словами, должно быть соответствие пика амплитуды регистрируемой колебательной картины (электрической оси) физической точке возбуждения и снятия сигнала (физической оси);

4) получение значений сигналов в режиме резонанса ВТГ при подаче сигнала в 1 В на пару пьезоэлектрических элементов возбуждения:

- на паре пьезоэлектрических элементов, регистрирующих амплитуды пучности, сигнал от 1...2 В и более;
- на паре пьезоэлектрических элементов, регистрирующих амплитуды узла, сигнал от 60...80 мВ и менее;
- на паре пьезоэлектрических элементов, регистрирующих в узле амплитуды по синфазной и косинусной составляющей, сигнал от 40...60 мВ и менее.

Калибровка

Результатом процесса калибровки ВТГ с блоком электроники является обеспечение условия резонансной настройки чувствительного элемента, определение коэффициентов обратных связей контура удержания колебаний, определение метрологических характеристик ВТГ и получение функции коррекции выходного сигнала от различных параметров (температуры, резонансной частоты и т.д.).

Первым этапом настройки блока электроники является учет фазовых сдвигов сигналов узла и пучности, вызванных наличием аналогового усилительного тракта и АЦП. Учет этих фазовых сдвигов необходим для корректной демодуляции сигнала на квадратурную и кориолисовую составляющие. Значения сдвигов определяются для резонансной частоты резонатора (частоты, при которой амплитуда сигнала пучности максимальна) экспериментальным (с использованием осциллографа или фазоизмерительного устройства) или расчетным путем (составлением передаточной функции аналогового тракта). Дополнительно необходимо учесть задержку оцифровки сигнала АЦП (время преобразования АЦП).

На этом же этапе можно определить резонансную фазу (разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом пучности) резонатора. Это значение, как правило, находится в окрестности 90° .

Вторым этапом является подбор коэффициентов контура поддержания резонансной частоты. Один из вариантов поддержания резонансной частоты заключается в анализе разности резонансной фазы и текущей фазы сигнала пучности. Если разница положительная, то частоту сигнала возбуждения необходимо увеличить, если отрицательная — уменьшить. Данный алгоритм легко реализуется с использованием ПИ регулятора, коэффициенты которого должны обеспечивать быстрый переходный процесс без перерегулирования (по возможности).

Третьим этапом является настройка контура поддержания постоянной амплитуды сигнала пучности, который представляет собой также ПИ регулятор. Требуемое значение амплитуды пучности определяется исходя из требуемого диапазона измерений угловых скоростей ВТГ (чем больше стабилизируемая амплитуда пучности, тем меньше диапазон измерений), допустимых угловых ускорений (чем больше стабилизируемая амплитуда пучности, тем меньше допустимые угловые ускорения) и конструктивных особенностей резонатора. Последнее объясняется тем, что большие амплитуды сигнала возбуждения могут привести (у различных резонаторов) к выходу из линейного режима работы, искажению формы сигналов пучности, которое становится отличной от синусоидальной, и т.д. Коэффициенты ПИ регулятора подбираются исходя из требований к качеству переходного процесса.

Четвертым этапом является настройка коэффициентов ПИ регуляторов контуров подавления квадратурной и кориолисовой составляющих сигнала узла. Коэффициенты подбираются исходя из требований к качеству переходного процесса, допустимых угловых ускорений и допустимых значений шумовых составляющих выходного сигнала ВТГ (сигнала подавления кориолисовой составляющей).

После проведения температурных испытаний можно вводить функции коррекции выходного сигнала ВТГ для уменьшения погрешности.

Размещение макетного образца ВТГ (электронного блока и резонатора) на рабочей платформе поворотного стола в камере тепла и холода показано на рис. 13 (см. третью сторону обложки).

В ходе проведения испытаний получены графики зависимости резонансной частоты резонатора (рис. 14), амплитуды сигнала кор-

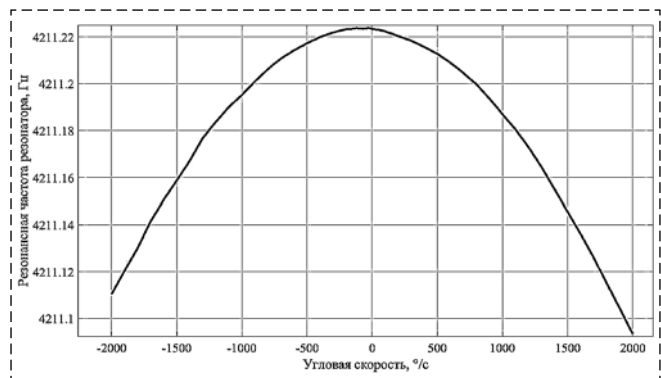


Рис. 14. Изменение резонансной частоты резонатора при температуре внешней среды +40 °С и вращении ВТГ

Fig. 14. The change in the resonant frequency of the resonator at an ambient temperature of +40 °C and rotation of the CVG

рекции напряжения возбуждения, амплитуды сигналов компенсации квадратурной и кориолисовой составляющих от температуры и угловой скорости вращения ВТГ.

Для уменьшения погрешности ВТГ необходимо применять к его показаниям корректирующие функции.

При определении функции коррекции учитывался тот факт, что сигналы подавления квадратурной и кориолисовой составляющих q и x являются не абсолютно независимыми, а в какой-то мере смешанными (взаимное влияние). При демодуляции (разделении) сигнала узла на квадратурную и кориолисовую составляющие приходится анализировать сигнал, прошедший через пьезоэлементы, усилители и АЦП. Каждый из этих элементов может вносить зависящий от температуры фазовый сдвиг в сигнал узла. Частично этот фазовый сдвиг может быть учтен, но не с абсолютной точностью. Поэтому выходной сигнал ВТГ необходимо рассматривать как линейную комбинацию сигналов квадратурной и кориолисовой составляющих сигнала компенсации:

$$y_{\text{изм}} = xK_x + qK_q + S,$$

где K_x , K_q , S — зависящие от температуры коэффициенты.

Данные коэффициенты можно аппроксимировать полиномами 6-го (максимум) порядка от температуры или резонансной частоты резонатора. Последнее представляется предпочтительным, так как при использовании показаний термодатчика необходимо добиться того, чтобы он измерял именно температуру чувствительного элемента (резонатора). Учи-

тывая конструктивные особенности термодатчиков и резонаторов, а также временные характеристики выходных сигналов термодатчиков, сделать это зачастую невозможно, так как это требует существенной доработки конструкции ВТГ.

Для уменьшения амплитуды шумовых составляющих выходного сигнала возможно применение различных типов сглаживающих фильтров. В данном случае применялся цифровой фильтр второго порядка, аналогичный аналоговому фильтру вида

$$\frac{1}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1}$$

с параметрами $T = 0,001$ с, $\xi = 1$.

Расчет параметров фильтра осуществляется исходя из частоты дискретизации данных (частоты выходного сигнала) и допустимой временной задержки при выдаче выходных сигналов ВТГ.

После фильтрации результирующая амплитуда шумовой составляющей не превышает 0,025 %/с (рис. 15).

По приведенным на рис. 15 данным (до фильтрации) построены вариации Аллана (рис. 16). При этом для сокращения времени вычисления период дискретизации данных составлял 0,01 с. Из графика видно, что значение случайного блуждания выходного сигнала не превышает $0,06 \, \%/ \sqrt{\text{ч}}$, а значение нестабильности нулевого сигнала не превышает 0,6 %/ч.

Следует отметить, что на результирующую точность ВТГ огромное влияние оказывает выбранный диапазон измерения угловых скоростей.

В ходе исследований было установлено, что при уменьшении диапазона измерения в k раз абсолютная ошибка измерений ВТГ уменьшается приблизительно в k^2 раз.

Результаты

В табл. 3 приведены сравнительные характеристики ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ ФГБОУ ВО ТулГУ.

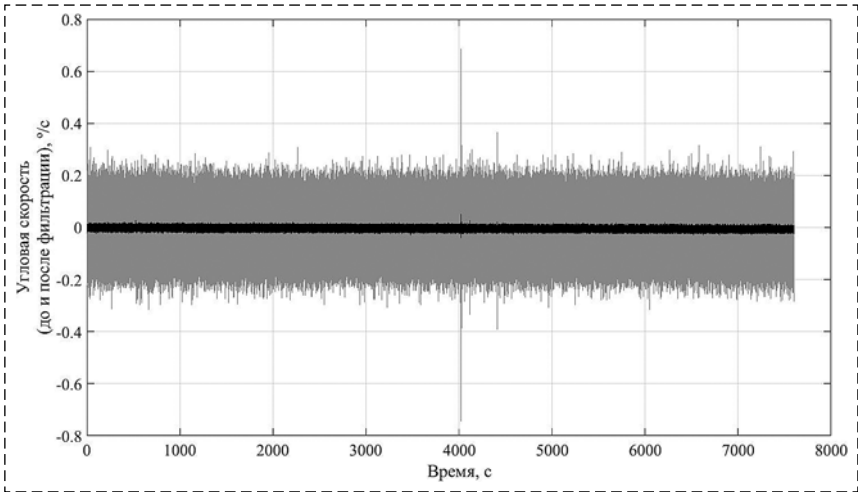


Рис. 15. Двухчасовая запись выходного сигнала ВТГ (до и после фильтрации) при нормальных условиях
Fig. 15. Two-hour recording of the output signal CVG (before and after filtration) under normal conditions

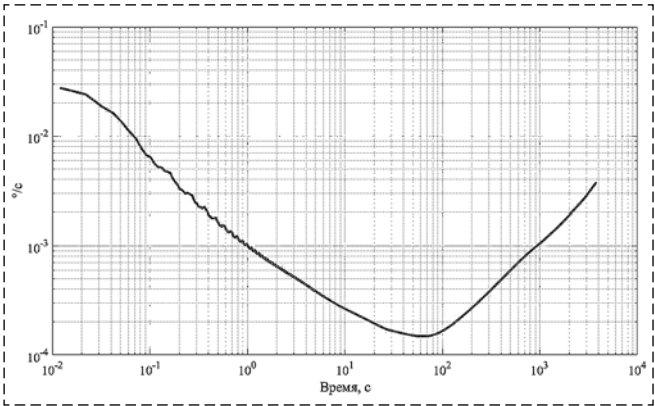


Рис. 16. Вариации Аллана выходного сигнала ВТГ
Fig. 16. Allan's variations of the output signal CVG

Таблица 3
Сравнение технических характеристик ВТГ INL-CVG-G200 фирмы INNALABS и ВТГ, разработанного ФГБОУ ВО ТулГУ
Table 3. Comparison of the technical characteristics of CVG INL-CVG-G200 (INNALABS) and CVG, developed by FSBEE HE Tula State University

Параметр	INNALABS	ФГБОУ ВО ТулГУ
Число осей	2	До 3 включительно
Формат выходных данных	Цифровой	Цифровой, аналоговый
Интерфейс	RS-232/422/485	CAN, RS-232/422/485, SPI
Частота передачи выходных данных	2000...9000 Гц	500...10 000 Гц
Температурная компенсация	Есть	Есть
Диапазон измерения	До ±250 %/с *	До ±2000 %/с *
Полоса пропускания	До 150 Гц *	До 50 Гц *

Параметр	INNALABS	ФГБОУ ВО ТулГУ
Нестабильность нулевого сигнала	Не более 0,1 %/ч	Не более 0,6 %/ч
Случайное блуждание	0,01 %/ $\sqrt{ч}$	0,06 %/ $\sqrt{ч}$
Шум покоя, RMS	Не более 0,01 %/с	Не более 0,025 %/с
Ошибка масштаб- ного коэффициента во всем диапазоне температур	Не более 0,35 %	Не более 0,05 % ** Не более 0,005 % ***
Время запуска	Не более 1 с	Не более 3 с
Время выхода на режим	Не более 50 с	Не более 6 с
Потребляемая мощность	Не более 3,3 Вт	Не более 4 Вт
Диапазон рабочих температур	-40 °C...+85 °C	-40 °C...+85 °C
Диапазон температур хранения	-55 °C...+90 °C	-55 °C...+90 °C
Электромагнитные влияния	Не защищено	Не защищено

* Возможно изменение параметров по требованию заказчика.

** Для диапазона измерения ± 2000 %/с.

*** Для диапазона измерения ± 200 %/с.

Из табл. 3 следует, что разработанный гироскоп имеет параметры точности и эксплуатационные характеристики, схожие с характеристиками одного из коммерческих ВТГ фирмы INNALABS, а по некоторым параметрам и превосходит его.

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. Part. III. P. 101–111.
2. Coriolis G. G. Mémoire sur les quations du mouvement relative des systms de corps (On the Equation of Relative Motion of a Systems of Bodies) // J. Ec. Polytech. 1835. N. 15. P. 142–154.
3. Lynch D. D. Vibration-induced drift in the hemi-spherical resonator gyro // Proc. Annual Meeting of the Institute of Navigation. 23–25 June, 1987, Dayton, Ohio. P. 34–37.
4. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.

5. Пешехонов В. Г. Гироскопы начала XXI века // Гироскопия и навигация. 2003. № 4. С. 5–18.
6. Линч Д. Взгляд компании "НОРТРОП ГРУММАН" на развитие инерциальных технологий // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 102–106.
7. Луин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.
8. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 165 с.
9. Луин Б. С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. М.: МАИ, 2005. 224 с.
10. Басараб М. А., Кравченко В. Ф., Матвеев В. А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии. М.: Радиотехника, 2005. 176 с.
11. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V. A., Scherban V. I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG // Proc. Symposium Gyro Technology. Stuttgart. 2006. P. 4.0–4.7.
12. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barbashov A. S., Kovalenko V. A., Scherban V. I., Marusyk P. I. Metallic Resonator CVG Thermophysical Parameter Optimization and Temperature Test Results // Proc. Of XIV International Conference on Integrated Navigation Systems (28–30 May 2007. St-Petersburg). St-Petersburg: Electropribor. 2007. P. 74–77.
13. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barbashov A. S. et al. Improved accuracy metallic resonator CVG // Proc. of XV International Conference on Integrated Navigation Systems (26–28 May 2008. St-Petersburg). St-Petersburg: Electropribor. 2008. P. 28–31.
14. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Mokoloshin I. T. Shock and vibration sensitivitiy test result for metallic resonator CVG // Proc. of XVI International Conference on Integrated Navigation Systems (25–27 May 2008. St-Petersburg). St-Petersburg: Electropribor. 2009. P. 88–92.
15. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A. Investtigation of azimuth accuracy measurement with metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope // Proc. of XVII International Conference on Integrated Navigation Systems (31 May – 2 June 2010. St-Petersburg). St-Petersburg: Electropribor. 2010. P. 25–30.
16. Чуманкин Е. А. Результаты проектирования и испытаний датчика угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2013. № 2 (81). С. 104–111.
17. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1983. 359 с.
18. Молотиллов Б. В. Прецизионные сплавы. Справочник. М.: Металлургия, 1974. 448 с.
19. Арзамасов Б. Н., Соловьева Т. В., Герасимов С. А. Справочник по конструкционным материалам. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 640 с.
20. Егармин Н. Е., Юрин В. Е. Введение в теорию вибрационных гироскопов. М.: БИНОМ, 1993. 111 с.
21. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. МТТ. № 4.

Competitive Coriolis Vibrating Gyroscope with a Metal Resonator

V. Ya. Raspopov, tgupu@yandex.ru, A. V. Ladonkin, tlsandos@rambler.ru, V. V. Likhosherst, lvv_01@inbox.ru,
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education, Tula,
300012, Tula Branch, Russian Federation

Corresponding author: Raspopov Vladimir Ya., Doctor of Technical Science, Professor, Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education, Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation, e-mail: tgupu@yandex.ru

Accepted on July 05, 2018

Abstract

The article deals with the design and features of manufacturing a Coriolis vibrating gyroscope (CVG, angular rate sensor) with a metal resonator. Piezoelectric elements are used to excite and detect oscillations of the resonator.

The design of the resonator is very important, because the technical characteristics of the CVG mainly depend on the resonator. For the production of a high-quality metal resonator with predetermined properties, a good choice is the precision alloy of 21NKMT-VI. Elimination of defects in the manufacture of the resonator, which lead to a variety of frequencies and variability, is achieved by balancing. The basic method is balancing in the 4th form of the distribution of mass defects. Calibration of the CVG with the electronics unit is the final stage of the CVG manufacturing, which results in: providing a resonance tuning condition for the sensing element, determining the feedback coefficients of the oscillation retention loop, determining the metrological characteristics of the CVG, and obtaining the correction function of the output signal from various parameters after the test complex.

When determining the correction function, the fact was taken into account that the signals for suppressing the quadrature and coriolis components are not absolutely independent. When the node signal is demodulated to quadrature and coriolis components, it is necessary to analyze the signal passed through piezoelectric elements, amplifiers and ADC. Each of these elements adds a temperature-dependent phase shift to the node signal. This phase shift can be taken into account, but not with absolute accuracy. Therefore, the output signal of the CVG should be considered as a linear combination of signals of the quadrature and coriolis components of the compensation signal. To reduce the noise of the output signal, it is possible to use various types of noise suppressing filters.

The results of tests of the CVG confirming its competitiveness in comparison with the commercial analogue. The electronic control module can be designed using the Russian element base.

Keywords: gyroscope, Coriolis, vibrating, resonator, balancing, calibration, making, testing

Acknowledgements: The results of the research project are published with the financial support of Tula State University within the framework of the scientific project № 8719 of December 18, 2017.

For citation:

Raspopov V. Ya., Ladonkin A. V., Likhoshester V. V. Competitive Coriolis Vibrating Gyroscope with a Metal Resonator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 777–787.

DOI: 10.17587/mau.19.777-787

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, part. III, pp. 101–111.
2. Coriolis G. G., Mmoire sur les quations du mouvement relative des systms de corps (On the Equation of Relative Motion of a Systems of Bodies), *J. Ec. Polytech*, 1835, no. 15, pp. 142–154.
3. Lynch D. D. Vibration-induced drift in the hemi-spherical resonator gyro, *Proc. Annual Meeting of the Institute of Navigation*, 23–25 June, 1987, Dayton, Ohio, pp. 34–37.
4. Zhuravlev V. F., Klimov D. M. *Volnovoi tverdotelnyy giroskop* (Wave solid-state gyroscope), Moscow, Nauka, 1985, 125 p. (in Russian)
5. Peshehonov V. G. *Giroskopi nachala XXI veka* (Gyroscopes of the beginning of the XXI century), *Giroskopiya i Navigaciya*, 2003, no. 4, pp. 5–18 (in Russian)
6. Lynch D. *Vzglyad kompanii "NORTHROP GRUMMAN" na razvitie inercialnih tehnologiy* (The view of NORTHROP GRUMMAN on the development of inertial technologies), *Giroskopiya i Navigaciya*, 2008, no. 3, pp. 102–106 (in Russian)
7. Lunin B. S., Matveev V. A., Basarab M. A. *Volnovoy tverdotelnyy giroskop. Teoriya i tehnologia* (Wave solid-state gyroscope. Theory and technology), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 176 p. (in Russian)
8. Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alehin A. V. *Proektirovanie volnovogo tverdotelnogo giroskopa* (Designing of a wave solid-state gyroscope), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 1997, 165 p. (in Russian)
9. Lunin B. S. *Fiziko-himicheskie osnovy razrabotki polusfericheskikh resonatorov volnovykh tverdotelnykh giriscopov* (Physico-chemical bases of development of hemispherical resonators of wave solid-state gyroscopes), Moscow, Publishing house of MAI, 2005, 244 p. (in Russian).
10. Basarab M. A., Kravchenko V. F., Matveev V. A. *Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v giroscopii* (Mathematical modeling of physical processes in gyroscopy), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 176 p. (in Russian)
11. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V. A., Scherban V. I. Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG, *Proc/ Symposium Gyro Technology*, Stuttgart, 2006, pp. 4.0–4.7.
12. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barbashov A. S., Kovalenko V. A., Scherban V. I., Marusyk P. I. Metallic Resonator CVG Thermophysical Parameter Optimization and Temperature Test Results, *Proc. Of XIV International Conference on Integrated Navigation Systems* (28–30 May 2007. St-Petersburg), St-Petersburg, "Electropribor", 2007, pp. 74–77.
13. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Barbashov A. S. et al. Improved accuracy metallic resonator CVG, *Proc. of XV International Conference on Integrated Navigation Systems* (26–28 May 2008. St-Petersburg), St-Petersburg, Publishing house of "Electropribor", 2008, pp. 28–31.
14. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Mikhloshin I. T. Shock and vibration sensitivity test result for metallic resonator CVG, *Proc. of XVI International Conference on Integrated Navigation Systems* (25–27 May 2008. St-Petersburg), St-Petersburg, Publishing house of "Electropribor", 2009, pp. 88–92.
15. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A. Investigation of azimuth accuracy measurement with metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope, *Proc. of XVII International Conference on Integrated Navigation Systems* (31 May – 2 June 2010. St-Petersburg). St-Petersburg, Publishing house of "Electropribor", 2010, pp. 25–30.
16. Chumankin E. A. *Resultati proektirovaniya i ispitaniy datchika uglovoy skorosti na osnove volnovogo tverdotelnogo giroskopa* (Results of designing and testing the angular rate sensor based on the wave solid-state gyro), *Giroskopiya i Navigaciya*, 2013, no. 2 (81), pp. 104–111 (in Russian)
17. Lahtin Yu. M. *Metallavedenie i termicheskaya obrabotka metallov. Izdanie 3-e, pererabotannoe i dopolnennoe* (Metallurgy and heat treatment of metals. Third edition, revised and enlarged), Moscow, Metallurgiya, 1983, 359 p. (in Russian)
18. Molotilov B. V. *Precizionnye splavi. Spravochnik* (Precision alloys. Handbook), Moscow, Metallurgiya, 1974, 448 p. (in Russian)
19. Arzamasov B. N., Soloviev T. V., Gerasimov S. A. *Spravochnik po konstruktsionim materialam: Spravochnik* (Handbook of Structural Materials: Handbook), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 2006, 640 p. (in Russian)
20. Egarin N. E., Yurin V. E. *Vvedenie v teoriyu vibratsionnykh giroscopov* (Introduction to the theory of vibrational gyroscopes), Moscow, Binom, 1993, 111 p. (in Russian).
21. Zhibanov Yu. K., Zhuravlev V. F. *O balansirovke volnovogo tverdotelnogo giroskopa* (On balancing a wave solid-state gyroscope, *Izv. RAN. MTT*, no. 4. (in Russian)