

В. Я. РАСПОПОВ, В. В. ЛИХОШЕРСТ

## ВОЛНОВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГИРОСКОПЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*Представлен обзор публикаций, посвященных разработке волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) с металлическим резонатором, описана типовая конструкция с пьезоэлементами, используемыми в режимах возбуждения и чувствительности. Получены передаточные функции датчика угловых скоростей на базе ВТГ (ВТГ–ДУС) и интегрирующего гироскопа (ВТГ–ИГ). Дано краткое описание основных технологических особенностей производства резонатора. Приведены числовые значения параметров колебаний кромки одного из неотбалансированных резонаторов. Рассмотрены конструкция ВТГ и структурная схема электронного модуля для работы ВТГ–ДУС в компенсационном режиме. Указаны цели и особенности настройки и калибровки.*

*Приведены температурные зависимости характеристик точности ВТГ–ДУС для заданных диапазонов изменения угловых скоростей и температуры.*

*Проанализированы отклонения Аллана, в том числе для различных температур. Представлены результаты испытаний на воздействие вращения, температуры, вибрации и удара, а также достигнутая точность ВТГ–ДУС.*

**Ключевые слова:** волновой твердотельный гироскоп, металлический резонатор, датчик угловой скорости, интегрирующий гироскоп, балансировка, настройка, калибровка.

### Введение

В основе работы ВТГ лежит эффект инертности и прецессии волновой картины колеблющейся оболочки, установленной на вращающемся основании, который был обнаружен и изучен Дж. Х. Брайаном [1].

Брайан исследовал природу биений вибрирующей оболочки на звуковых частотах и показал, что под действием сил Кориолиса, возникающих при вращении вибрирующей оболочки вокруг оси перпендикулярной плоскости вибрации, а также тангенциальных сил происходит прецессия стоячей волны как относительно оболочки, так и в инерциальном пространстве (рис. 1).

Брайан рассмотрел случай равномерного вращения вибрирующей оболочки. Д. Линч (США) доказал справедливость эффекта Брайана и для переменной скорости вращения [2].

---

**Распопов** Владимир Яковлевич. Доктор технических наук, профессор кафедры приборов управления, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». Заслуженный деятель науки РФ.  
**Лихошерст** Владимир Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры приборов управления, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Вибрирующая оболочка является чувствительным элементом ВТГ (резонатором). На кромке резонатора могут существовать различные формы упругих колебаний. Вторая форма используется в качестве рабочей. При этом стоячие волны имеют форму эллипса (рис. 1, *а, б*). Так как фазы обеих стоячих волн одинаковы, их суперпозиция будет представлять собой также стоячую волну с амплитудой равной амплитуде первичной волны, но повернутую на некоторый угол относительно первоначального положения (рис. 1, *в*). То есть вращение приводит к повороту (прецессии) стоячей волны относительно резонатора. Меняется и положение пучностей и узлов стоячей волны. Возбуждение первичных стоячих волн обеспечивается датчиками силы – актюаторами (магнитоэлектрическими, пьезоэлектрическими, электростатическими и др.), а измерение перемещений кромки резонатора – датчиками перемещений, которые могут иметь такую же физическую природу, как и актюаторы.

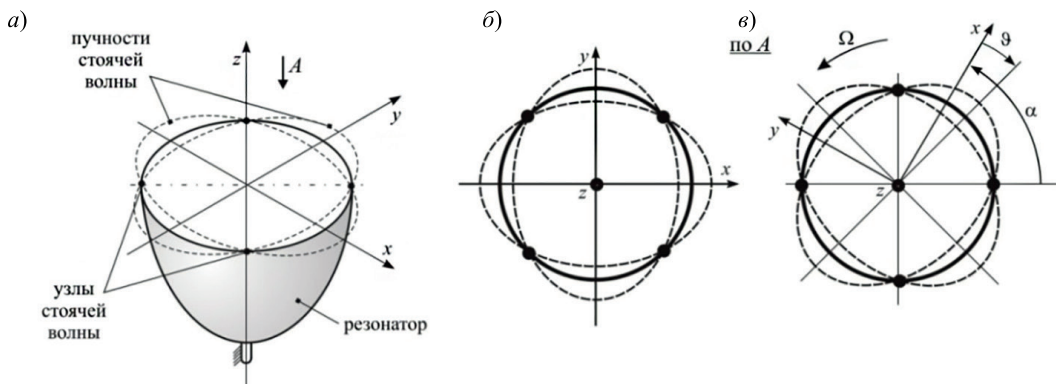


Рис. 1. Прецессия стоячей волны во вращающемся резонаторе:

*а* – стоячая волна в резонаторе; *б* – положение стоячей волны при неподвижном резонаторе;

*в* – положение стоячей волны при вращающемся резонаторе.

$\Omega$  – скорость вращения;  $\vartheta$  – угол прецессии стоячей волны;

$A$  – угол поворота резонатора

Монография [3] положила начало отечественным исследованиям и публикациям в этой области, например [4–6].

Теоретические исследования ВТГ выполняются на основе математической модели в виде предложенной Д. Линчем [7, 8] системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают первичные колебания в пучностях (режим возбуждения) и вторичные колебания в узлах (режим чувствительности). Заметим, что аналогичные системы уравнений характеризуют динамику микромеханических гироскопов [9], которые, как и ВТГ, относятся к классу кориолисовых вибрационных гироскопов [10]. С направлениями дальнейших исследований можно ознакомиться в [11–18].

В результате совместной работы со специалистами Мичуринского завода «Прогресс» (АО «МЗП») [19, 20, 21] была создана технология производства ВТГ [22], включая механическую, термическую обработку заготовки резонатора, его балансировку, настройку и калибровку [23, 24]. Далее была разработана электроника [22], обеспечивающая режимы возбуждения и чувствительности резонатора и изготовлен датчик угловых скоростей на базе ВТГ (ВТГ–ДУС) [25–27]. С вариантами применения ВТГ можно ознакомиться в [28–32].

Необходимо отметить, что на разработку ВТГ с металлическим резонатором в РФ повлияли результаты, полученные инновационной лабораторией Innalabs Ltd. Это стало возможным благодаря маркетинговой деятельности, а также тому, что часть технической документации на ВТГ лаборатория выложила в открытый доступ. Одна из базовых конструкций ВТГ с металлическим резонатором [32, 33], созданная в лаборатории, стала аналогом и прототипом многих отечественных разработок в этом направлении.

Конструкция ВТГ приведена на рис. 2. Резонатор 1 с пьезоэлементами, наклеенными на доньшко, образует чувствительный элемент, который с помощью узла крепления 2 смонтирован на корпусе 5 и закрыт 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 (рис. 2, а).

Резонатор (рис. 2, б) состоит из двух сопряженных цилиндров, один из которых – с большей толщиной – является его рабочей зоной, а тонкостенный цилиндр, сопряженный с доньшком, выполняет роль подвеса. Вместе с донной частью изготовлена часть узла крепления. Возбуждение колебаний резонатора и измерение перемещений кромки резонатора в узлах происходят с помощью восьми пьезоэлементов, наклеенных на доньшко.

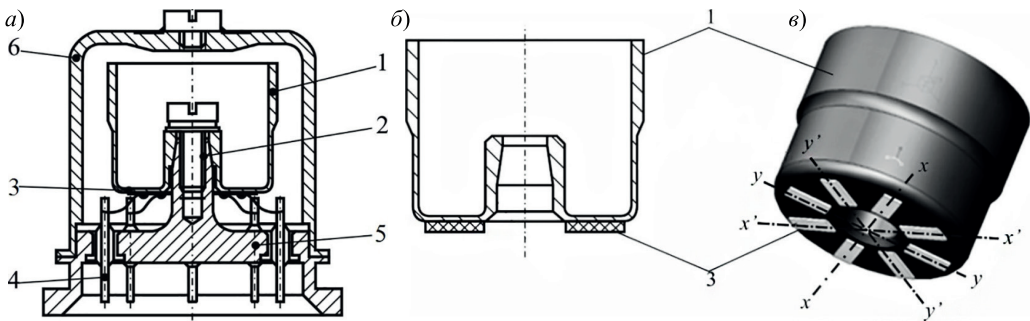


Рис. 2. Конструкция ВТГ с металлическим резонатором: а – ВТГ в сборе (фронтальный разрез); б – резонатор ВТГ (фронтальный разрез); в – резонатор ВТГ (объемная модель).  
1 – резонатор; 2 – узел крепления; 3 – пьезоэлемент; 4 – гермовывод; 5 – основание (корпус); 6 – крышка (кожух)

Возбуждение первичных колебаний производится двумя пьезоэлементами (одной парой), расположенными на одной оси, например  $x-x$ , на частоте собственных колебаний резонатора. Пары пьезодатчиков по осям  $x'-x'$ ,  $y'-y'$  обеспечивают съем сигнала, который для режима ВТГ–ДУС (датчик угловой скорости) при отсутствии вращения равен нулю. Пара датчиков  $y-y$  обеспечивает канал сигнала компенсации по обратной связи, которая приводит угол поворота колебательной картины к нулю. На рис. 3 показана передаточная функция ВТГ–ДУС.

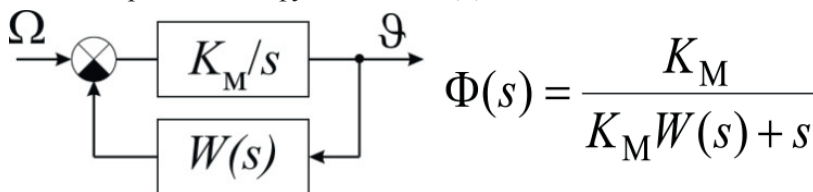


Рис. 3. Принципиальная схема силовой компенсации (исключение прецессии волны в ВТГ–ДУС):  $K_M$  – коэффициент (масштабный, прецессии, а также Брайана),  $s$  – аргумент в преобразовании Лапласа,  $W(s)$  – передаточная функция, может иметь любой необходимый вид

Возможна работа ВТГ в режиме «свободной» волны. В этом случае ВТГ измеряет полный угол поворота колебательной картины вокруг кромки резонатора, который пропорционален интегралу по времени от входной угловой скорости. Следовательно, ВТГ работает в режиме датчика угла поворота – ВТГ–ИГ, а его передаточная функция определяется выражением

$$\Phi(s) = \frac{K_M}{s}$$

Режим «свободной» волны может быть обеспечен параметрическим возбуждением либо ее «освобождением» после позиционного возбуждения посредством отключения актуаторов. В первом случае время работы ВТГ не ограничено, во втором – резонатор работает на «выбеге» в течение ограниченного времени.

Полный цикл работ по созданию ВТГ с металлическим резонатором, включая проектирование, изготовление и испытания, выполнила кафедра приборов управления (ПУ) Тульского государственного университета (ТулГУ) совместно с АО «Ми-чуринский завод «Прогресс» (МЗП).

## Разработка ВТГ–ДУС и результаты

### Резонатор

Важнейшей задачей при разработке резонатора является выбор материала с высокой добротностью  $Q = 1/2\xi$  ( $\xi$  – относительный коэффициент затухания частоты собственных колебаний), чьи характеристики минимально зависят от температуры.

В этой связи представляют интерес специальные сплавы – элинвары, которые обладают высокой температурной стабильностью частоты, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и температурным коэффициентом модуля упругости (ТКМУ), высокой механической добротностью. Для изготовления резонатора ВТГ был выбран сплав 21 НКМТ-ВИ.

Резонатор после финишной токарной обработки геометрически представляет осесимметричное цилиндрическое тело вращения. В рабочем режиме ВТГ при возбуждении волны в теле резонатора кромка цилиндра совершает радиальные колебательные движения с амплитудой 0,001-0,0015 мм (1-1,5 мкм). На рис. 4 показано измерение радиальных колебаний кромки в максимальной амплитуде неотбалансированного резонатора диаметром 25 мм с помощью лазерного виброметра *Laser Vibrometer IVS-300* при подаче на систему возбуждения колебаний напряжения порядка 1В.

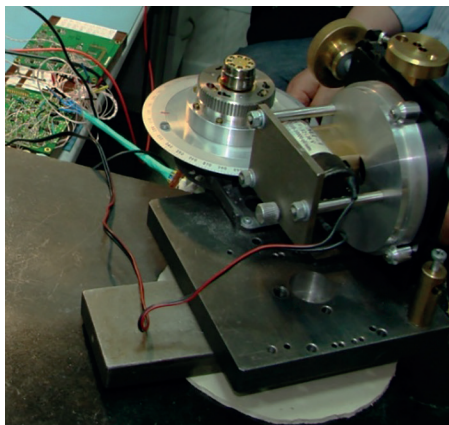


Рис. 4. Измерение радиальных колебаний кромки резонатора

Результаты измерений приведены в табл. 1.

Очевидно, что допуски на размеры резонатора и шероховатость его поверхности должны быть как минимум меньше амплитуды колебаний и по значению отличаться по крайней мере на порядок. В реальности произведенный резонатор существенно отличается от своих теоретических моделей.

Таблица 1

Результаты измерения колебаний кромки резонатора

Ось	Частота F, Гц	Напряжение, В	Высота точки измерения от кромки резонатора, мм	Смещение (мм)
B-B	6720,0630	1,51819	3	0,000899359
	6720,0780	1,48887	3	0,000881988
A-A	6716,2970	1,42868	3	0,000846809
	6716,3280	1,43358	3	0,000849709
B-B	6720,0940	1,98109	0,2	0,001173571
	6720,0780	1,98166	0,2	0,001173911
A-A	6716,3130	1,77321	0,2	0,001051017
	6716,3440	1,78656	0,2	0,001058925

Чтобы обеспечить заданные в конструкторской документации характеристики точности при изготовлении резонатора, допуски на округлость, concentricity and соосность, цилиндричность, параллельность и перпендикулярность, радиальное биение заготовки (ГОСТ Р 53442-2015; ИСО 1101; 2012) необходимо выдержать в очень жестких пределах. Разница вышперечисленных геометрических параметров (пределы отклонения формы) в любых произвольно выбранных точках на длине измерения, соответствующей габаритам изделия, должна составлять  $max \pm 0,001-0,0015$  мм от номинального размера, заложенного в конструкторской документации (степень точности предельных отклонений формы – I по ГОСТ 10356-63).

Один из вариантов конструкции резонатора с учетом указанных ограничений приведен на рис. 5.

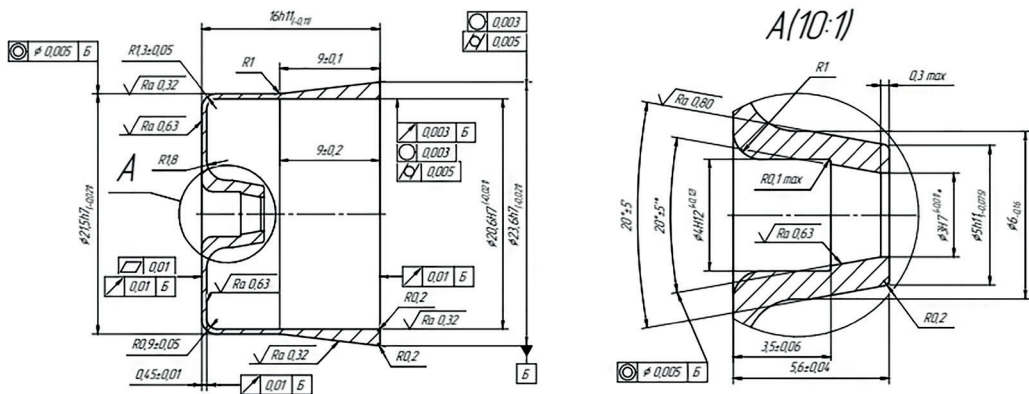


Рис. 5. Конструкция резонатора (пример)

Погрешности в изготовлении резонатора и анизотропия его физико-механических свойств 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. Собственная ось резонатора, вдоль которой волна



имеет наибольшую частоту, называется «легкой», а ось, вдоль которой волна имеет наименьшую частоту, – «тяжелой». Такой дефект характеризуется разными значениями частот и ориентацией собственных осей и называется разночастотностью, которая может достигать значений 2-5 Гц и более.

Скорость затухания колебаний резонатора зависит от ориентации волны, то есть резонатор имеет различные относительные коэффициенты демпфирования, следовательно, и декременты затухания и соответствующее им направление осей. Этот дефект резонатора называется разнородностью, для минимизации которой требуется материал с относительно изотропными свойствами и гомогенной структурой. Минимально возможная разночастотность резонатора достигается за счет ультрапрецизионной механической обработки и затем балансировки. В общем случае разночастотность и разнородность резонатора до балансировки качественно характеризуют уровень технического процесса изготовления.

Помимо собственных осей есть геометрические оси мест приклейки пьезоэлементов ко дну резонатора. Максимальные пьезокоэффициенты должны быть в направлении перпендикуляра к месту приклейки.

Устранение недостатков, вызванных несовершенством исполнения резонатора, достигается путем его балансировки по 1–4 формам углового распределения дефектов массы.

Угловое распределение дефектов массы  $M_i$  резонатора в зависимости от окружного угла  $\varphi_i$ , определяющего ориентацию данной формы дефекта масс относительно условного нуля окружного угла, представляется в виде ряда Фурье, в котором первые четыре члена соответствуют четырем ( $i = 1-4$ ) формам дефекта масс.

Суть балансировки заключается в определении значений  $M_i$ ,  $\varphi_i$  и удалении избыточной массы, а ее методы независимо от их физической реализации делятся на балансировку по массе и по жесткости.

Технология балансировки по массе основана на удалении микроскопических масс металла в определенных точках, расположенных на торцевой поверхности резонатора (рис. 6).

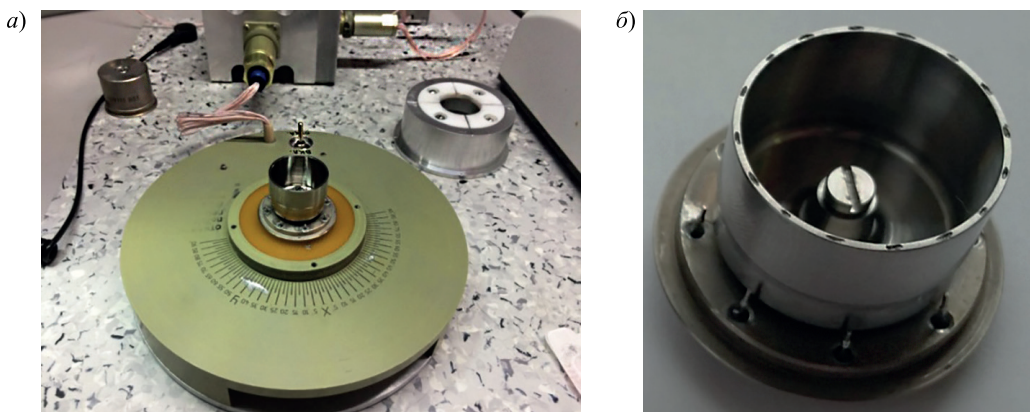


Рис. 6. Балансировка резонатора по массе:

*а* – резонатор на приспособлении для балансировки, *б* – отбалансированный резонатор

Балансировка по первым четырем формам распределения дефектов масс обеспечивает минимальные разночастотность и разнородность по окружному углу.

Балансировка по жесткости заключается в точечном удалении массы металла с боковой поверхности резонатора в расчетных точках. Преимущества балансировки по массе заключаются в минимальном влиянии на структуру металла и незначительном изменении жесткости резонатора.

*Конструкция ВТГ–ДУС и структура электронного модуля*

Конструкция ВТГ–ДУС аналогична приведенной на рис. 2, сборочные единицы которой показаны на рис. 7. Структурная схема электронного модуля ВТГ–ДУС представлена на рис. 8. В схеме выделены два основных блока: аналоговый и цифровой вычислители (области, отмеченные пунктирной линией на рис. 8).

Цифровой вычислитель состоит из программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и контроллера и может управлять работой от одного до трех резонаторов.

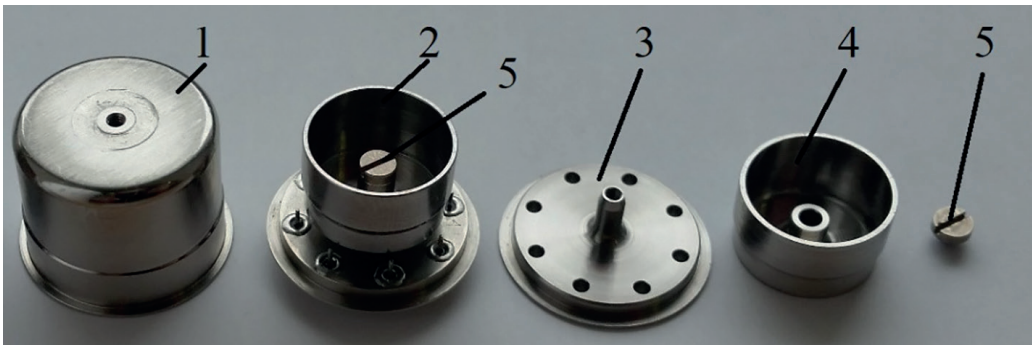


Рис. 7. Сборочные единицы ВТГ–ДУС: 1 – кожух, 2 – резонатор на основании, 3 – основание с элементом установки резонатора, 4 – резонатор, 5 – крепежный винт

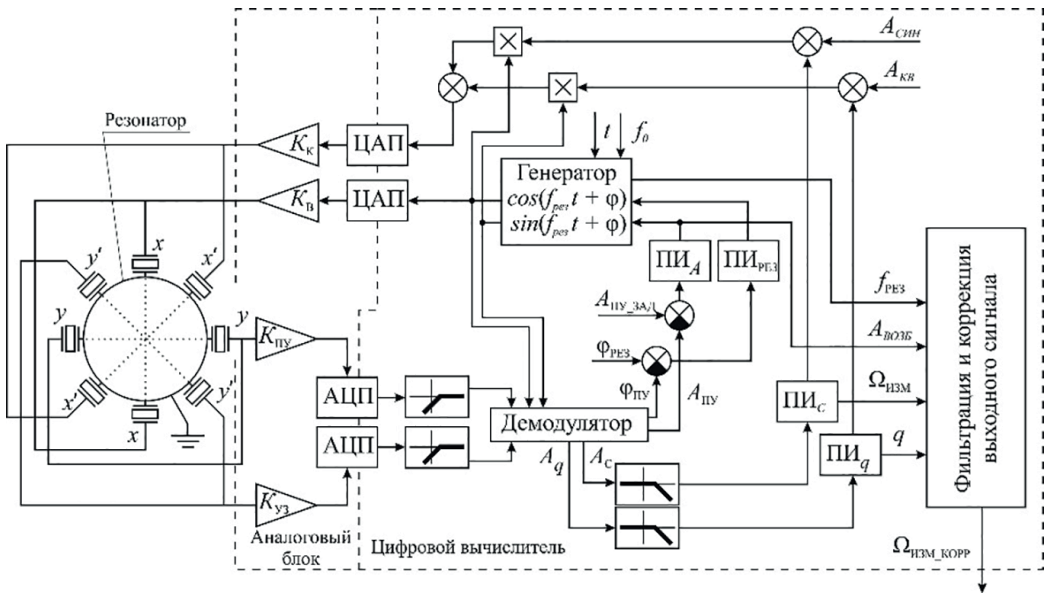


Рис. 8. Структурная схема электронного модуля ВТГ, реализующая ДУС в компенсационном режиме

На рис. 8 введены следующие обозначения:

$K_k, K_v, K_{пу}, K_{уз}$  – аналоговые усилители сигналов коррекции и возбуждения пучности и узла соответственно;

$A_{пу}, A_{пу\_зад}$  – текущая и заданная амплитуды сигнала пучности;

$\Phi_{пу}, \Phi_{пу\_зад}$  – текущая и заданная фазы сигнала пучности по отношению к фазе сигнала возбуждения;

$A_c, A_q$  – амплитуды кориолисовой и квадратурной составляющей сигнала узла;

$t$  – текущее время;

$A_{синф}, A_{кв}$  – постоянные поправки синфазной и квадратурной составляющих, предназначенные для коррекции характеристик резонатора после изготовления (минимизация колебаний в узле при отсутствии измеряемой угловой скорости);

$f_0$  – резонансная частота резонатора, определенная на стадии изготовления;

$ПИ_A, ПИ_{рез}, ПИ_c, ПИ_q$  – пропорционально-интегральные регуляторы контуров поддержания амплитуды сигнала пучности, резонансной частоты, формирования сигналов коррекции кориолисовой и квадратурной составляющей сигналов узла соответственно;

$A_{возб}$  – текущая амплитуда сигнала возбуждения;

$f_{рез}$  – текущая частота сигнала возбуждения (резонансная частота резонатора);

$q$  – текущая амплитуда сигнала компенсации квадратурной составляющей;

$\Omega_{изм}$  – текущая амплитуда сигнала подавления кориолисовой составляющей (измеренная угловая скорость вращения ВТГ);

$\Omega_{изм\_корр}$  – скорректированное и отфильтрованное значение угловой скорости вращения ВТГ.

Алгоритмическая и схемотехническая реализации электронного модуля ВТГ–ДУС, соответствующие рис. 8, рассмотрены в работе [22]. Выходной интерфейс ВТГ–ДУС – CAN.

В соответствии с рис. 7 в МЗП изготовлены ВТГ–ДУС в двух вариантах исполнения, отличающихся способом крепления к основанию: по цилиндрическому ободу на крышке чувствительного элемента (рис. 9) и на трехточечной опоре с амортизаторами или без них.

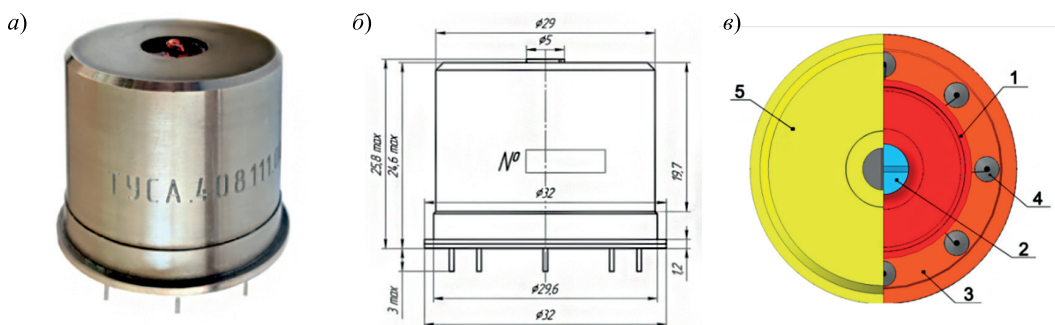


Рис. 9. ВТГ–ДУС с металлическим резонатором (без блока цифрового вычислителя):

$a$  – общий вид,  $b$  – габаритные размеры,  $c$  – конструкция.

1 – резонатор, 2 – узел крепления, 3 – корпус, 4 – гермовывод, 5 – кожух

Необходимые режимы работы – ВТГ–ДУС или ВТГ–ИГ – обеспечиваются настройкой и калибровкой блока электроники.



### Настройка и калибровка

Цель настройки и калибровки заключается в обеспечении условий резонансной настройки, определении коэффициентов обратных связей контуров удержания колебаний, получение коэффициентов функций, корректирующих выходной сигнал по резонансной частоте и амплитуде сигнала подавления квадратурной составляющей. Указанные процедуры выполняются в термокамере с вращательным стендом (рис. 10).

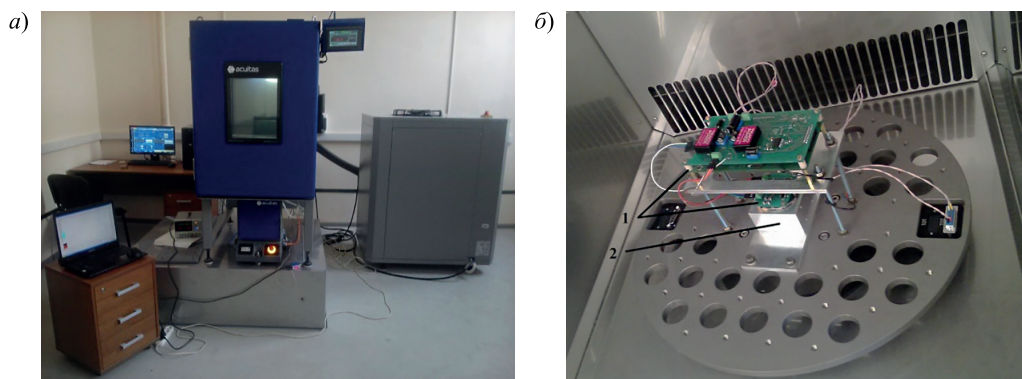


Рис. 10. Стендовое оборудование для настройки и калибровки ВТГ:

*a* – термокамера с вращательным стендом;

*б* – ВТГ на вращательном стенде (1 – электронный модуль, 2 – ВТГ–ДУС)

Процессы настройки и калибровки описаны в работах [10, 11]. Настройка обеспечивает резонансный режим работы ВТГ.

Калибровка позволяет максимально ослабить влияние температуры на масштабный коэффициент и его нелинейность в целом, а также на смещение нуля в рабочем диапазоне измеренной угловой скорости.

Для разработки алгоритмов калибровки необходимы экспериментальные зависимости угловой скорости вращения ВТГ–ДУС и температуры от резонансной частоты, сигнала коррекции амплитуды кориолисовой и квадратурной составляющих выходного сигнала. Последовательность получения экспериментальных данных заключается в выдержке ВТГ–ДУС с блоком электроники при заданной температуре не менее одного часа. После этого осуществляется вращение ВТГ–ДУС в диапазоне измеряемых угловых скоростей с определенным временем выдержки на каждой угловой скорости. Время выдержки определяется исходя из желаемого количества точек осреднения выходного сигнала, дающего информацию об измеряемой угловой скорости. Так, для осреднения по 1000 точкам при частоте обновления информации 500 Гц достаточно двух секунд действия заданной угловой скорости. В приведенных ниже экспериментальных данных время выдержки составляет 20 с, т.е. имеется 10000 измерений на каждой из угловых скоростей рассматриваемого диапазона. Действия повторяются для каждой температуры. В рассматриваемом случае шаг изменения температуры составлял 20°C в диапазоне от –40°C до +80°C. Диапазон измеряемых угловых скоростей –  $\pm 750^\circ/\text{с}$ . Зависимости, полученные на испытательном стенде TES\_V-3\_TM компании Acuitas (поворотный стол с термокамерой), показывают, что изменение резонансной частоты во всем диапазоне температур и угловых скоростей не превышает 0,1%, а при температуре 20°C – не более  $1,5 \cdot 10^{-6}$ .

Зависимость резонансной частоты от температуры можно использовать для температурной коррекции вместо датчика температуры.

Контур ВТГ–ДУС построен таким образом, чтобы обеспечивать постоянство амплитуды колебаний в пучности, измеряемое на паре пьезоэлементов оси  $y-y$ . Это осуществляется за счет изменения амплитуды напряжения, приложенного к пьезоэлементам возбуждения колебаний, которые расположены по оси  $x-x$  (см. рис. 2).

Добавка к начальной амплитуде сигнала возбуждения зависит от угловой скорости для каждой температуры из диапазона ее изменения практически линейно с коэффициентом  $6 \cdot 10^{-5} \text{ В}/(^{\circ}\text{C})$ . Это позволяет сделать вывод о том, что для поддержания постоянного значения (0,5 В при рассматриваемом диапазоне измерения) амплитуды напряжения в пучности резонатора необходим сигнал коррекции, представляющий собой добавку к амплитуде напряжения возбуждения не более 0,3 В.

Обеспечение работы ВТГ в режиме ДУС заключается в подавлении перемещений узла (оси  $y'-y'$ ). Сигнал в узле – это линейная комбинация двух гармонических сигналов, имеющих форму косинуса и синуса – синфазной и квадратурной составляющих соответственно. Амплитуды напряжений, которые должны быть сформированы для подавления квадратурной составляющей сигнала в узле, приведены на рис. 11.

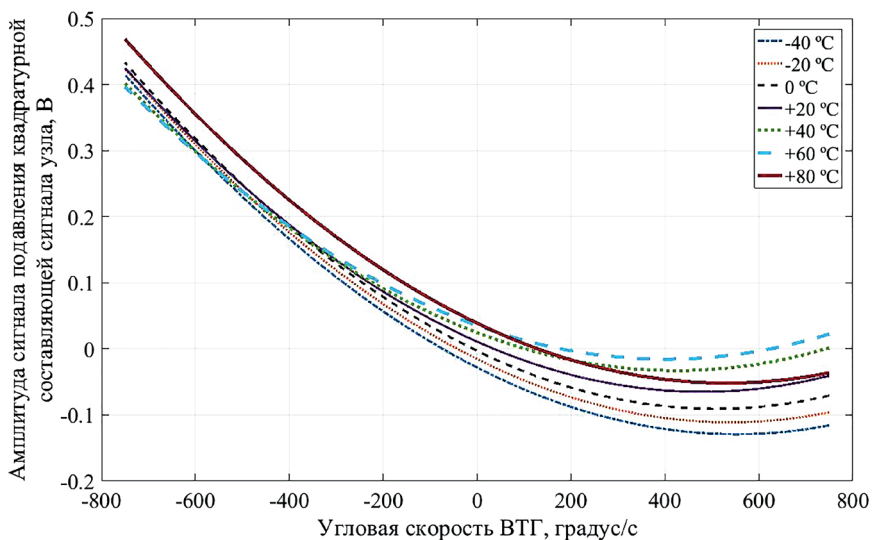


Рис. 11. Зависимость амплитуды сигнала подавления квадратурной составляющей от температуры и угловой скорости вращения ВТГ

Несмотря на учет фазовых сдвигов при настройке ПИ-регулятора, существует корреляция квадратурной и кориолисовой составляющих в узле, следовательно, выходной сигнал ВТГ можно считать их комбинацией. При этом имеется существенная нелинейность амплитуды сигнала подавления квадратурной составляющей, особенно заметная на границах диапазона измерения угловой скорости. Зависимость масштабного коэффициента от температуры составляет  $0,0125 \text{ В}/(^{\circ}\text{C})$  в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . При этом вычисление измеряемой угловой скорости по выходному сигналу с постоянным масштабным коэффициентом приводит к недопустимо большой погрешности.

Для минимизации данной погрешности выходной сигнал представляется как линейная комбинация амплитуд подавления кориолисового и квадратурного сигналов со своими коэффициентами аппроксимации (линейная аппроксимация).

На рис. 12 приведены зависимости погрешности ВТГ–ДУС в рабочих диапазонах изменения температуры и угловой скорости. Коэффициенты аппроксимации определены по экспериментальным данным (амплитуда сигнала возбуждения, амплитуды подавления кориолисовой и квадратурной составляющих сигнала в узле) для каждой температуры в отдельности на основании соответствующих значений резонансной частоты.

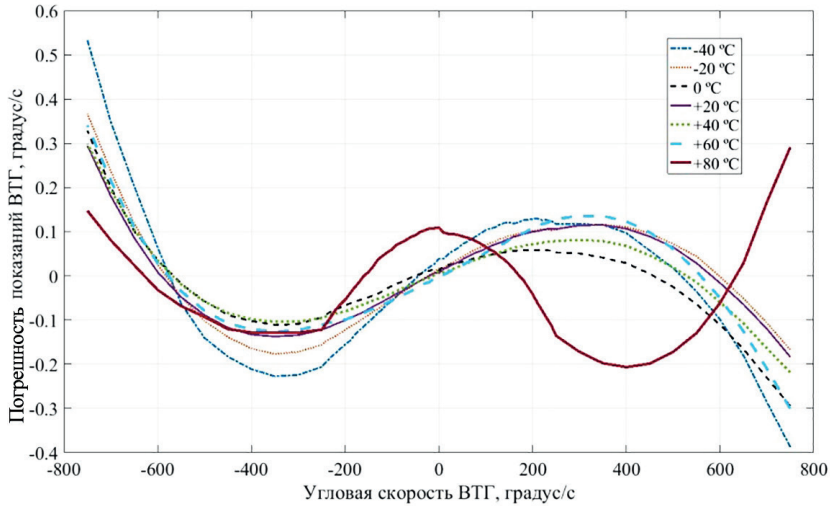


Рис. 12. Погрешности показаний ВТГ при представлении выходного сигнала в виде линейной комбинации амплитуд сигналов подавления квадратурной и кориолисовой составляющих

Линейная аппроксимация выходного сигнала и соответствующие калибровочные коэффициенты (коэффициенты аппроксимации) могут быть достаточными для обеспечения требуемой точности ВТГ–ДУС с диапазоном измерения угловой скорости до  $\pm 400^\circ/\text{с}$ . При этом максимальная погрешность измерения не превышает  $0,25^\circ/\text{с}$ , а нелинейность выходного сигнала составляет не более  $0,02\%$ .

Из рис. 12 следует, что на границах диапазона  $\pm 750^\circ/\text{с}$  погрешности измерений существенно возрастают. Для увеличения диапазона измеряемых угловых скоростей выходной сигнал аппроксимируется полиномом пятой степени от сигнала предыдущей аппроксимации, представляющей линейную комбинацию полиномов не выше пятой степени.

На рис. 13 приведены погрешности показаний ВТГ в результате двухступенчатой коррекции для диапазона измерений  $\pm 750^\circ/\text{с}$ . Из рисунка следует, что двухступенчатая коррекция ВТГ обеспечивает на границах диапазона измеряемых угловых скоростей погрешность, не превышающую  $0,2^\circ/\text{с}$ , при нелинейности выходного сигнала не более  $0,01\%$  во всем температурном диапазоне. Корректирующие функции реализованы в управляющей программе электронного модуля ВТГ–ДУС, а зависимости на рис. 13 являются результатами его испытаний.

Для проверки стабильности и повторяемости характеристик при использовании изложенного подхода к коррекции показаний были проведены три цикла испытаний

на оборудовании сторонних организаций с интервалами времени в один, два и пять месяцев с момента первичной настройки. В ходе испытаний коэффициенты не менялись. Полученные графики отклонений Аллана при нормальных климатических условиях приведены на рис. 14.

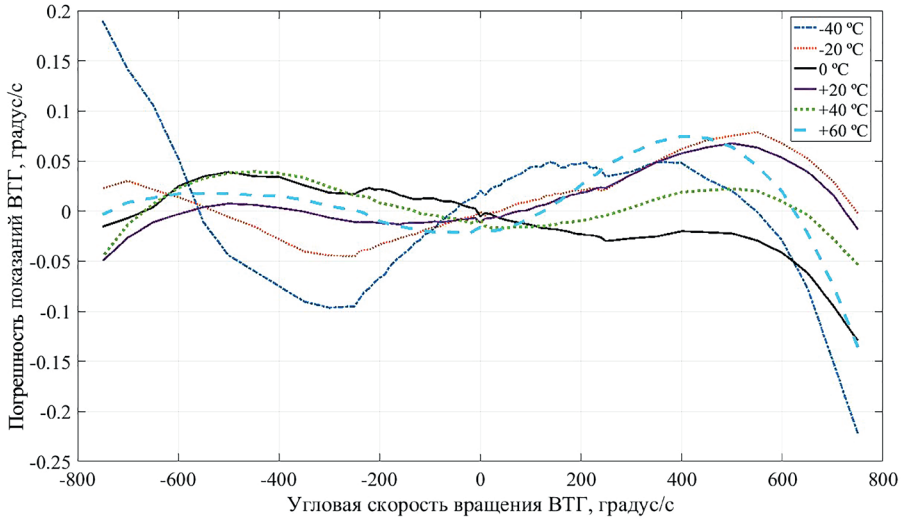


Рис. 13. Погрешности показаний ВТГ при аппроксимации выходного сигнала полиномами пятой степени от сигнала предыдущей коррекции

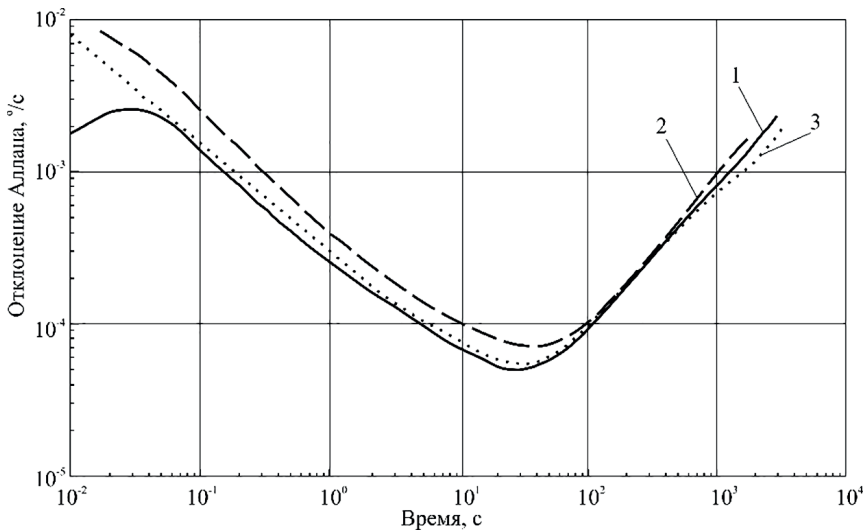


Рис. 14. Отклонения Аллана ВТГ–ДУС с коническим резонатором (1 – один месяц, 2 – два месяца, 3 – пять месяцев с момента настройки ВТГ)

Анализ отклонений Аллана позволяет определить следующие характеристики ВТГ–ДУС:

- для графиков 1 и 3 (практически совпадают) случайный дрейф нулевого сигнала находится на уровне  $0,2^\circ/\text{ч}$ , а случайное блуждание составляет не более  $0,02^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ ;
- для графика 2 случайный дрейф нулевого сигнала при заданной температуре окружающей среды составляет не более  $0,3^\circ/\text{ч}$ , случайное блуждание – не более  $0,03^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ .

Таким образом, предложенный подход к коррекции в целом позволяет обеспечить стабильность показаний ВТГ без дополнительных настроек и изменения коэффициентов коррекции.

### Испытания

На базе ВТГ с трехточечной опорой на амортизаторах был изготовлен макетный образец трехосного измерительного модуля в технологической оснастке (рис. 15).

Испытания ВТГ–ДУС в составе этого модуля были проведены во ФГУП «НПЦАП имени академика Н.А. Пилюгина». В сентябре 2020 г. ВТГ–ДУС был настроен на диапазон измеряемых скоростей  $\pm 650^\circ/\text{с}$  для испытаний в диапазоне изменения температур от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+80^\circ\text{C}$ .

Целью испытаний было определение следующих характеристик ВТГ–ДУС:

- стабильность коэффициента передачи и нулевого сигнала в диапазоне температур эксплуатации;
- устойчивость ВТГ–ДУС при действии ударов и вибрации.

Значения величин воздействующих факторов принимались в соответствии с нормами испытаний аналогичных приборов, предназначенных для эксплуатации на борту летательных аппаратов. Диапазон угловых скоростей воздействия составлял  $\pm 180^\circ/\text{с}$ , температурное воздействие – от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$  с шагом  $+10^\circ\text{C}$ . Вибрационное воздействие: частота – от 10 до 2500 Гц, амплитуда – от  $9,81 \text{ м/с}^2$  до  $15 \text{ м/с}^2$ , форма воздействия – синус. Ударное воздействие с амплитудами –  $59 \text{ м/с}^2$ ,  $147 \text{ м/с}^2$ ,  $441 \text{ м/с}^2$ ,  $981 \text{ м/с}^2$  при различном числе ударов.

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  $[\circ/\text{с}]$ . В цепи преобразования ВТГ–ДУС на момент испытаний не содержались контуры коррекции температурного влияния.

Последовательность проведения видов испытаний:

- 1) испытания на воздействие температуры и вращения – определение смещения нулевого сигнала и погрешности коэффициента передачи;
- 2) испытания на механическое воздействие.

Испытания на воздействие температуры и вращения. Цель экспериментов – установление достигнутого на данном этапе работ уровня точности функционирования ВТГ–ДУС при измерении угловой скорости при различных температурах эксплуатации.

Испытания проводились на одноосном поворотном столе, совмещенном с термокамерой. Для каждой температуры алгоритм был следующий: выход термокамеры на режим со скоростью не более  $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ , выдержка не менее одного часа, вращение в диапазоне угловых скоростей с шагом  $30^\circ/\text{с}$  и записью выходного сигнала на

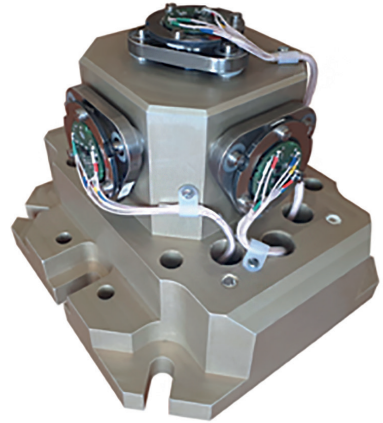


Рис. 15. Макетный образец трехосного измерительного модуля на ВТГ–ДУС



каждой угловой скорости не менее 2 мин при частоте обновления информации об угловой скорости 500 Гц. На температурах  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$  и  $+40^{\circ}\text{C}$  дополнительно записывался выходной сигнал при нулевой угловой скорости станда в течение не менее двух часов.

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

Результаты вычисления погрешности коэффициента передачи для различных значений температур приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

**Погрешности коэффициента передачи в зависимости от температуры**

Температура, $^{\circ}\text{C}$	-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

Коэффициент передачи, ввиду малых значений погрешностей в диапазоне измерения скоростей для фиксированных температур, обладает большой стабильностью. Тем не менее в диапазоне изменения температуры от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  он значительно зависит от температуры, так как коэффициенты теплового расширения материала резонатора, клея и пьезоэлементов различны. Следовательно, необходима температурная коррекция выходного сигнала ВТГ.

По длительным записям ( $\sim 2$  часа) выходного сигнала на неподвижном основании при температурах  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+21^{\circ}\text{C}$ ,  $+40^{\circ}\text{C}$  рассчитаны отклонения Аллана (рис. 16), из которых следуют характеристики точности ВТГ–ДУС, приведенные в табл. 3.

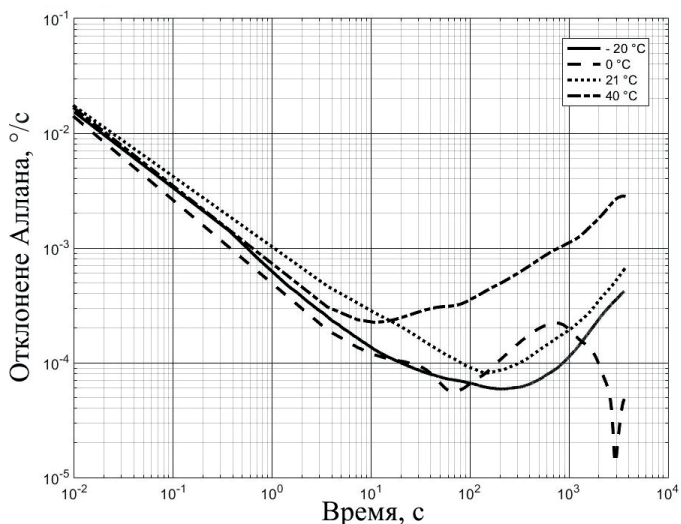


Рис. 16. Отклонение Аллана для различных значений температуры

Характеристики точности ВТГ–ДУС

Параметр	-20°C	0°C	+21°C	+40°C
Случайное блуждание, °/√ч	0,035	0,022	0,0182	0,0185
Нестабильность нуля, °/ч	0,2048	0,20016	0,1831	0,6139

При анализе результатов табл. 3. можно сделать заключение о стабильности случайного блуждания нуля во всем температурном диапазоне и дрейфа сигнала (нестабильность нуля в диапазоне температур от -20°C до +21°C).

Испытания на ударное воздействие. Целью этого вида испытаний было установить допустимые для данной конструктивной реализации и алгоритмов управления ВТГ–ДУС амплитуды ударных воздействий в направлении оси чувствительности и перпендикулярно ей.

Результаты позволяют сделать следующие выводы:

- с увеличением амплитуды удара увеличивается амплитуда выходного сигнала, но не пропорционально амплитуде удара;
- удар с амплитудой 441 м/с<sup>2</sup> 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;
- формы ударного воздействия и выходного сигнала ВТГ–ДУС существенно отличаются из-за наличия демпферов в узлах крепления корпуса.

Испытания на ударное воздействие в направлении оси перпендикулярной измерительной показали стойкость ВТГ–ДУС в диапазоне амплитуд ударных воздействий до 882 м/с<sup>2</sup>.

Испытания на вибрационное воздействие. Целью экспериментов было получить информацию о поведении резонатора и контура поддержания колебаний при действии вибрации. На основании полученных данных определены допустимые частотные и амплитудные границы воздействия, в которых возможно функционирование разработанного ВТГ–ДУС с требуемыми характеристиками 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°/с до 0,5°/с – амплитудное значение «от пика до пика») при включении оборудования в рабочем режиме без вибрации. Шум имеет нормальное распределение и не содержит постоянной составляющей.

Испытания на воздействие вибрации проводились в несколько этапов:

- 1) поиск резонансов конструкции (ускорение – 9,81 м/с<sup>2</sup>, диапазон частот – от 10 до 2500 Гц);

- 2) стойкость на воздействие повышенной вибрации (ускорение – от 9,81 м/с<sup>2</sup> до 98,1 м/с<sup>2</sup>, диапазон частот – от 10 до 2000 Гц);
- 3) стойкость на воздействие вибрации (ускорение – от 29,4 м/с<sup>2</sup> до 147,2 м/с<sup>2</sup>, диапазон частот – от 10 до 2000 Гц с большей скоростью изменения частоты вибрации).

На первом этапе выявлен резонанс демпфирующей опоры в диапазоне частот 300–450 Гц, на втором и третьем – в диапазоне частот 250–500 Гц амплитуда вибрационного воздействия была минимизирована.

Результаты второго этапа испытаний приведены на рис. 17. Из них следует наличие частот, при которых происходит существенное изменение реакции ВТГ–ДУС, но при этом режим работы поддерживается контуром управления. Наряду с этим отмечаются частоты, при которых работа контура поддержания колебаний срывается, но самостоятельно восстанавливается после изменения частоты вибрации.

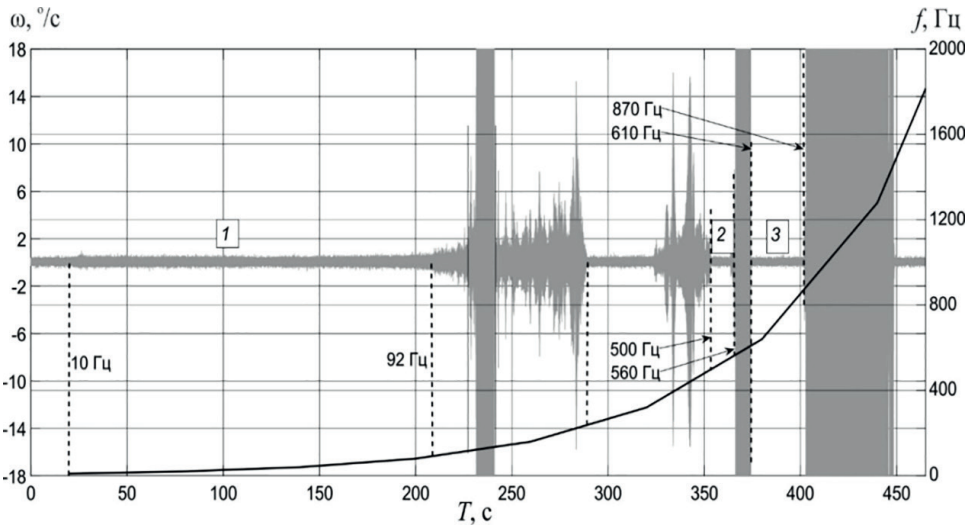


Рис. 17. Реакция на воздействие вибрации

Диапазон частот устойчивости к вибрации обозначен на рис. 17 цифрой 1 и составляет от 10 до 90 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 волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором, функционирующий в режиме датчика угловой скорости. Гироскоп изготовлен в составе опытной партии на серийном заводе по разработанной им технологии.

На стендовом оборудовании профильного предприятия проведены испытания ВТГ–ДУС по нормам аналогичным для приборов, применяемых на борту летательных аппаратов.

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

К настоящему времени достигнуты следующие результаты:

- случайный дрейф нулевого сигнала – не более  $0,03\text{ }^{\circ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ;
- шум покоя –  $0,0055\text{ }^{\circ}/\text{с}$ ;
- нестабильность смещения нуля – не более  $0,6\text{ }^{\circ}/\text{ч}$ ;
- случайный дрейф угловой скорости –  $0,014\text{ }^{\circ}/(\text{ч}\cdot\sqrt{\text{Гц}})$ ;
- нелинейность масштабного коэффициента при нормальных климатических условиях –  $0,012\%$ ;
- погрешность масштабного коэффициента в диапазоне температур и угловых скоростей –  $1,23\%$ ;
- сдвиг нуля в диапазоне температур и угловых скоростей –  $0,034\%$ ;
- диапазон виброустойчивости – до  $90\text{ Гц}$ .

Приведенные характеристики точности получены на ВТГ, изготовленном на серийном заводе, что предполагает повторяемость параметров конструкции, а после настройки и калибровки с блоком электроники – повторяемость характеристик точности. Этот научно-практический результат получен на Мичуринском заводе «Прогресс».

Полученные значения характеристик точности ВТГ–ДУС достаточны для его применения в течение нескольких часов в системах ориентации, стабилизации и навигации на подвижных объектах, испытывающих механические воздействия, интенсивность которых не нарушает виброустойчивость и ударную прочность гироскопа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бryan, G.H.**, On the Beatsinthe 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.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.
3. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 115с.
4. **Егармин Н.Е., Юрин В.Е.** Введение в теорию вибрационных гироскопов. М.: Бином, 1993. 111 с.
5. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика волнового твердотельного и микромеханических гироскопов. М.: Физматлит, 2009. 228 с.
6. **Лунин Б.С., Матвеев В.А.** Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.
7. **Lynch, D.D.**, Coriolis vibratory gyroscope, *IEEE standart specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros*, IEEE std. 1431 annex B, pp. 56–66.
8. **Lynch, D.**, Vibratory gyro analysis by the method of averaging, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> St. Petersburg conference on gyroscopic technology and navigation*, St. Petersburg, pp. 26–34.
9. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
10. **Волчихин И.А.** Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 59–78..
11. **Трутнев Г.А.** Нелинейность масштабного коэффициента волнового твердотельного гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 4. С. 138–143. DOI:10.22213/2410-9304-2018-4-138-144 EBN: YSUFJZ.
12. **Трутнев Г.А.** Компенсация дрейфа твердотельного волнового гироскопа // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2008. Т. 21. №3. С. 198–204. DOI: 10/22213/2413-1172-2018-3-198-204.
13. **Матвеев В.В., Лихошерст В.В.** Влияние перекрестной связи на динамику кориолисового вибрационного гироскопа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 22–29.
14. **Матвеев В.В.** Волновой твердотельный гироскоп // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 377–383.

15. Малютин Д.М., Королев М.Н. Гироскопическая система на волновых твердотельных гироскопах // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2020. С. 196–198.
16. Королев М.Н., Малютин Д.М. Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 8. С. 129–135.
17. Королев М.Н., Малютин Д.М. Динамика гироскопического стабилизатора с волновым твердотельным гироскопом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 249–255.
18. Малютин Д.М. Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. №2. С. 146–155.
19. Распопов В.Я., Волчихин И.А. Волновой твердотельный гироскоп. Обеспечение требуемых параметров точности // Сборник материалов юбилейной XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2018. С. 192–194.
20. Распопов В.Я., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Волчихин И.А., Ведешкин Ю.В., Шепилов С.И. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Разработка и производство // Справочник. Инженерный журнал с приложениями. 2020. № 3 (276). С. 11–20.
21. Егоров С.В., Распопов В.Я. Проектирование резонатора волнового твердотельного гироскопа и верификация конечно-элементной модели // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021, № 10. С. 227–235.
22. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором: монография / под ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 189 с.
23. Распопов В.Я., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Калибровка волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором с блоком электроники // Сборник материалов XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2019. С. 170–172.
24. 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.
25. Распопов В.Я., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Конкурентноспособный твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. №12. С. 777–787.
26. Распопов В.Я., Лихошерст В.В. Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором для систем ориентации, стабилизации и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. №7. С. 374–382.
27. Распопов В.Я., Лихошерст В.В., Каликанов А.В. Волновые твердотельные гироскопы отечественной разработки для бортовых систем летательных аппаратов // Авиационная техника. 2021. № 4. С. 148–153.
28. Мейер Д., Розелле Д. Измерительная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. №3 (78). С. 45–54.
29. United States Patent № US006474, 161B1, 4.11.2002. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof / Alain Jeanroy (FR), Pierre Leger (FR).
30. Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С. 24–34.
31. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. № 4 (103). С. 3–13. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013.
32. Chokovani, V.V., Yatsenko, Yu. A., Kovalenko, V.A., Shcerban, V.I., Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG, Proc. Symposium Gyro Technology Stuttgart, 2006, pp. 4.0–4.7.
33. United States Patent # US009322655B2, 26.04.2016. Axally symmetrical coriolis force gyroscope (variants) / Valery Valentinovich Chikovani, Kiev (UA); Yurii Alekseevich Yatzenko, Kiev (UA).



**Raspopov, V.Ya. and Likhosherst, V.V.** (Tula State University, St. Petersburg, Russia)

Wave Solid-State Gyroscopes with a Metal Resonator, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 1 (120), pp. 26–44.

**Abstract.** A review of publications on the development of wave solid-state gyroscopes (SWG) with a metal resonator is presented; a typical design with piezoelectric elements used in the excitation and sensitivity modes is considered. The transfer functions of the angular rate sensor (ARS) based on the SWG (SWG-ARS) and the integrating gyroscope (SWG-IG) are obtained. The main technological features of the resonator manufacturing process are briefly described. The numerical values of unbalanced resonator edge vibrations are given. The SWG design is discussed, and the block diagram of the electronic module for the SWG-ARS operating in the compensation mode is given. The goals and features of tuning and calibration are described.

Temperature dependences of accuracy characteristics within specified ranges of angular rate and temperature variations are given.

Allan variances are analyzed, including those for different temperatures. The results of rotation, temperature, vibration and shock tests and the achieved accuracy of the SWG-ARS are discussed.

**Key words:** solid-state gyroscope wave, metal resonator, angular rate sensor, integrating gyroscope, balancing, tuning, calibration.

Материал поступил 17.01.2023