

УДК 531.383-11:534.1
DOI 10.17285/0869-7035.0019

В. Я. РАСПОПОВ, Р. В. АЛАЛУЕВ, А. В. ЛАДОНКИН, В. В. ЛИХОШЕРСТ, С. И. ШЕПИЛОВ

НАСТРОЙКА И КАЛИБРОВКА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Рассмотрены особенности настройки и калибровки волнового твердотельного гироскопа, работающего в режиме датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС), с металлическим резонатором. С учетом того что выходной сигнал содержит кориолисову и квадратурную составляющие, компенсирующий сигнал в канале обратной связи формируется на основе алгоритма двухступенчатой коррекции. Приведены результаты испытаний ВТГ-ДУС с блоком электроники, в котором реализованы функции двухступенчатой коррекции.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, резонатор, настройка, калибровка, корректирующая функция.

В работе изложены особенности настройки и калибровки ВТГ-ДУС с металлическим резонатором, разработанного совместно специалистами кафедры «Приборы управления» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (ТулГУ) и опытной лаборатории АО «Мичуринский завод «Прогресс» (МЗП).

Введение

Теоретические основы функционирования ВТГ-ДУС, базирующиеся на основополагающем исследовании Брайана [1], обнаружившего и объяснившего инерцию и прецессию стоячих волн звуковой частоты, освещены в многочисленных публикациях, например [2, 3, 4, 5, 6]. Работа ВТГ поддерживается электроникой, в состав которой входят аналоговый и цифровой модули.

Аналоговый модуль служит для усиления сигналов датчиков перемещений и для передачи сигналов управления и коррекции на датчики силы. Цифровой модуль производит оцифровку сигналов с аналогового модуля, их демодуляцию (определение амплитуды, фазы и т.д.), формирует сигналы управления и коррекции, модулирует

Распопов Владимир Яковлевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». Заслуженный деятель науки РФ.

Алалуев Роман Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Ладонкин Александр Валериевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Лихошерст Владимир Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Шепилов Сергей Игоревич. Начальник серийного конструкторского бюро, АО «Мичуринский завод «Прогресс».

их и переводит в аналоговую форму посредством цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

В известных публикациях [5, 6], а также в [7] приведены функциональные схемы электроники, обеспечивающей работу ВТГ в режиме ДУС, но отсутствует информация о схемотехнике элементов аналогового и цифрового модулей, которая является базой для разработки принципиальных электрических схем.

В работах [8, 9] приведены результаты испытаний ВТГ с резонаторами, изготовленными из аморфных материалов, а в [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] – ВТГ с металлическим резонатором. В этих публикациях, а также на сайте фирмы InnaLabs Ltd [17, 18, 19], серийно выпускающей ВТГ-ДУС с металлическим резонатором, отсутствует какая-либо информация о процедурах настройки и калибровки. Один из вариантов калибровки ВТГ рассмотрен в [20, 21] для резонатора, изготовленного в виде полусферы из кварцевого стекла.

В настоящей статье описывается разработанная структура преобразования сигналов при построении ВТГ-ДУС на базе цилиндрического резонатора, показаны особенности настройки и калибровки ВТГ-ДУС с предложенной схемой управления и обработки сигналов и некоторые достигнутые характеристики.

Конструкция ВТГ и структура электронного модуля

Конструкция ВТГ приведена на рис. 1, а. Резонатор 1 с пьезоэлементами 3, наклеенными на доньшко, образуют чувствительный элемент, который с помощью узла крепления 2 смонтирован на корпусе 5, 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).

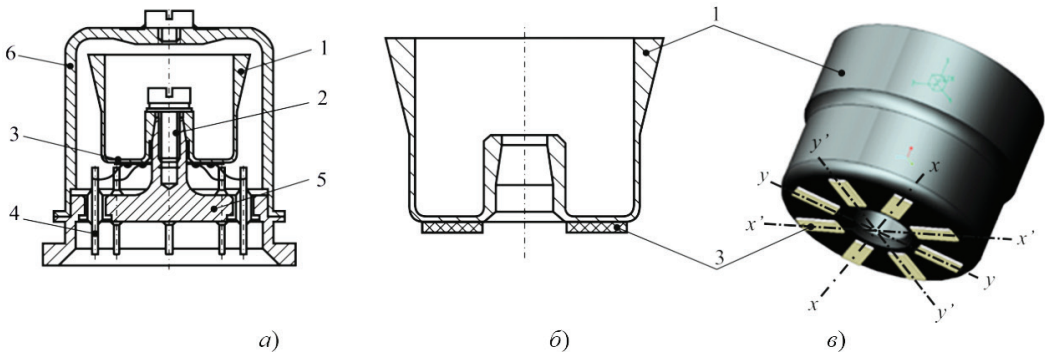


Рис. 1. ВТГ с металлическим резонатором:
 а – ВТГ в сборе (фронтальный разрез); б – резонатор ВТГ (фронтальный разрез);
 в – резонатор ВТГ (объемная модель).
 1 – резонатор; 2 – узел крепления; 3 – пьезоэлемент; 4 – гермовывод;
 5 – основание (корпус); 6 – крышка (кожух)

Резонатор состоит из двух сопряженных элементов, один из которых конусной формы с большей толщиной является его рабочей зоной, а тонкостенный цилиндр,

сопряженный с доньшком, выполняет роль подвеса. Вместе с доньшком изготавливается часть узла крепления.

Резонатор изготовлен из сплава 21НКМТ-ВИ, а конусная форма рабочей зоны обеспечивает лучшую локализацию стоячих волн на кромке резонатора (рис. 1, б).

Возбуждение колебаний и измерение перемещений кромки резонатора в узлах и пучностях производятся опосредованно путем создания и измерения деформации доньшка с помощью наклеенных на него восьми пьезоэлементов (рис. 1, в). Возбуждение первичных колебаний производится парой пьезоэлементов, расположенных по оси $x-x$, а по $x'-x'$ размещены пьезоэлементы возбуждения колебаний по сигналам коррекции. По оси $y-y$ расположены пьезоэлементы измерения сигнала в пучностях, который необходим для контроля за отклонениями от заданных значений резонансной частоты и амплитуды колебаний. По оси $y'-y'$ помещаются пьезоэлементы для измерения сигналов в узлах.

Структурная схема электронного модуля ВТГ-ДУС приведена на рис. 2 [22]. В данной схеме выделены два основных блока: аналоговый и цифровой вычислитель (области, выделенные пунктирной линией на рис. 2). Аналоговый блок закрепляется непосредственно на гермовыводах 4 (рис. 1, а) чувствительного элемента. Цифровой вычислитель состоит из программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и контроллера и может осуществлять управление работой от одного до трех резонаторов.

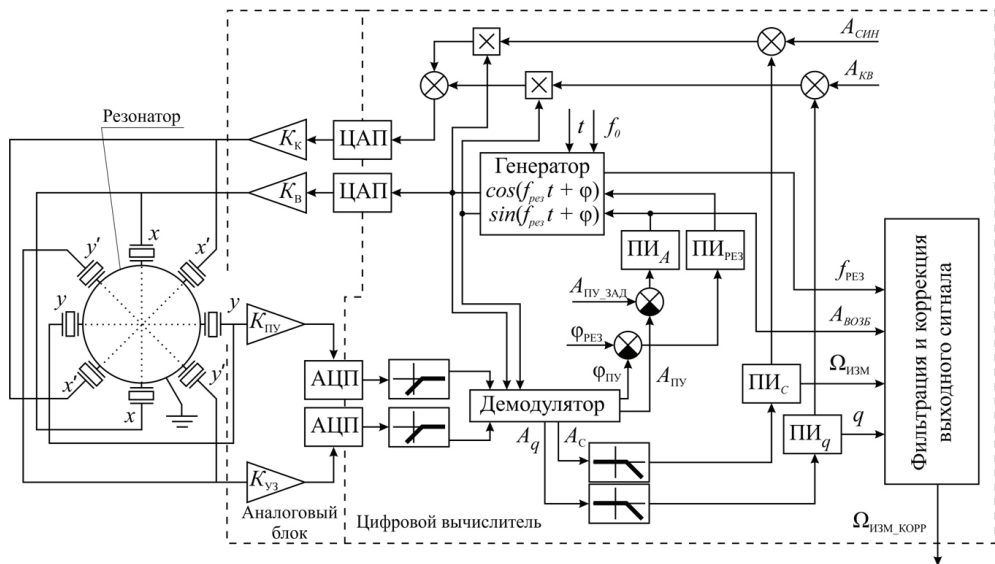


Рис. 2. Структурная схема электронного модуля ВТГ, реализующая ДУС в компенсационном режиме

На рис. 2 введены следующие обозначения:

$K_к, K_в, K_пу, K_уз$ – аналоговые усилители сигналов коррекции и возбуждения пучности и узла соответственно;

$A_пу, A_пу_зад$ – текущая и заданная амплитуды сигнала пучности;

$\varphi_пу, \varphi_рез$ – 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;

$A_{\text{СИН}}$, $A_{\text{КВ}}$ – постоянные поправки синфазной и квадратурной составляющих, предназначены для коррекции характеристик резонатора после изготовления (минимизация колебаний в узле при отсутствии измеряемой угловой скорости);

f_0 – резонансная частота, определенная на стадии изготовления резонатора;

ПИ_A , $\text{ПИ}_{\text{рез}}$, ПИ_c , ПИ_q – пропорционально-интегральные регуляторы контуров: поддержания амплитуды сигнала пучности, резонансной частоты, формирования сигналов коррекции кориолисовой и квадратурной составляющих перемещения узла соответственно;

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

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

q – текущая амплитуда сигнала компенсации квадратурной составляющей;

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

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

Особенностью функционирования ПЛИС является параллельная работа всех блоков, что позволяет существенно сократить (по сравнению с алгоритмами последовательного расчета) время вычисления параметров, необходимых для управления ВТГ. В ПЛИС реализованы алгоритмы расчета текущей частоты колебаний, фаз и амплитуд сигналов в узлах и пучностях.

Блок «генератор» на рис. 2 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, определяет коэффициенты 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. 2, рассмотрены в работе [22]. Выходной интерфейс ВТГ-ДУС – CAN.

Настройка блока электроники

Настройка обеспечивает резонансный режим работы ВТГ и выполняется в следующей последовательности:

- 1) определение фазы сигнала пучности по отношению к сигналу возбуждения на резонансной частоте, при которой амплитуда сигнала пучности максимальна (резонансная фаза). Полученная фаза корректируется на величину фазового запаздывания контура управления (обусловлена конечным временем прохождения сигнала от цифрового модуля непосредственно к пьезоэлементам);
- 2) определение коэффициентов ПИ-регулятора, поддерживающего резонансную фазу постоянной по простому правилу: если разность текущей и резонансной фаз положительна, то текущую частоту сигнала возбуждения нужно уменьшить, если отрицательна – увеличить;

- 3) настройка ПИ-регулятора в контуре поддержания постоянной амплитуды пучности, значение которой пропорционально диапазону измеряемых угловых скоростей;
- 4) определение коэффициентов ПИ-регулятора контура компенсации кориолисовой и квадратурной составляющих сигнала в узле исходя из компромисса между полосой пропускания и уровнем шума выходного сигнала.

Выполнение процедур настройки по первым двум пунктам обеспечивает работу ВТГ в режиме разомкнутого контура, или полного угла (Whole Angle), а при настройке по всем четырем пунктам – в режиме замкнутого контура, или в компенсационном режиме (Force Rebalance) [23], то есть режиме ВТГ-ДУС.

Для выполнения пунктов 3 и 4 необходимо испытательное оборудование – поворотный стенд.

Для реализации процедур настройки ВТГ-ДУС разработано программное обеспечение, позволяющее без перепрограммирования электронного блока изменять амплитуду раскочки (изменение диапазона измерения), коэффициенты ПИ-регуляторов, коэффициенты фильтров и контуров компенсации. Все перечисленные параметры сохраняются в энергонезависимой памяти электронного модуля и могут быть изменены по желанию пользователя через интерфейс программного обеспечения.

Калибровка

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 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 на заданной температуре не менее одного часа, после чего 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. Данные 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 (ф. Asuitas) в виде поворотного стола 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 $y-y$ (рис. 2).

Это обеспечивается за счет изменения амплитуды напряжения, приложенного к пьезоэлементам возбуждения колебаний, которые расположены по оси $x-x$ (рис. 2). Математически данная зависимость может быть представлена в виде

$$U_{\text{возб}} = (A_0 + A(t, \Omega)) \cos(f_{\text{рез}}t + \varphi_{\text{рез}}),$$

где $U_{\text{возб}}$ – напряжение возбуждения, формируемое ЦАП; A_0 – начальная амплитуда возбуждения; $A(t, \Omega)$ – добавка к амплитуде возбуждения, обеспечивающая постоянство амплитуды сигнала в пучности при действии температуры и угловой скорости (рис. 4); $f_{\text{рез}}$, $\varphi_{\text{рез}}$ – частота и фаза сигнала возбуждения.

Зависимость добавки к начальной амплитуде сигнала возбуждения от температуры и угловой скорости является практически линейной с коэффициентом $6 \cdot 10^{-5}$ В/(град/с). 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 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 представляет собой линейную комбинацию 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. 3. Результирующий сигнал, приложенный к резонатору по оси $x'-x'$, имеет вид

$$U_{\text{корр}} = A_{\text{синф}} \cdot \cos(f_{\text{рез}}t + \varphi_{\text{рез}}) + A_{\text{кв}} \cdot \sin(f_{\text{рез}}t + \varphi_{\text{рез}}),$$

где $A_{\text{синф}}$ и $A_{\text{кв}}$ – амплитуды сигналов подавления синфазной и квадратурной составляющих.

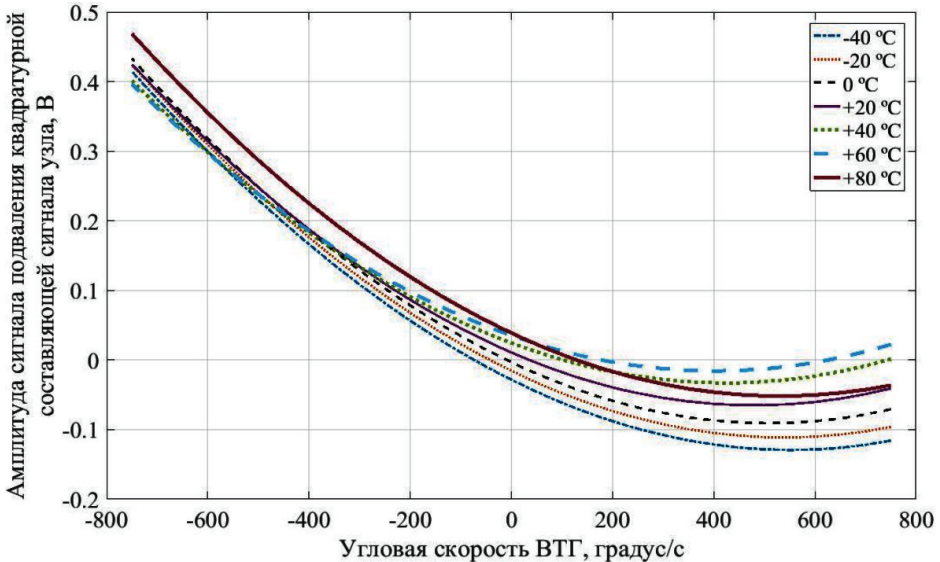


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала подавления квадратурной составляющей от температуры и угловой скорости вращения ВТГ

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 (рис. 3). Зависимость масштабного коэффициента от температуры составляет 0,0125 В/(град/с). При этом вычисление измеряемой угловой скорости по выходному сигналу с постоянным масштабным коэффициентом приводит к недопустимо большой погрешности.

Для минимизации данной погрешности выходной сигнал $\Omega_{изм}$ представляется как линейная комбинация амплитуд подавления кориолисового $A_{кор}$ и квадратурного $A_{кв}$ сигналов:

$$\Omega_{изм} = K_{кор} \cdot A_{кор} + K_{кв} \cdot A_{кв} + s, \quad (1)$$

где $K_{кор}$, $K_{кв}$, s – коэффициенты, зависящие от температуры.

Для аппроксимации (1) на рис. 4 приведены зависимости погрешности ВТГ в рабочих диапазонах измерения 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.

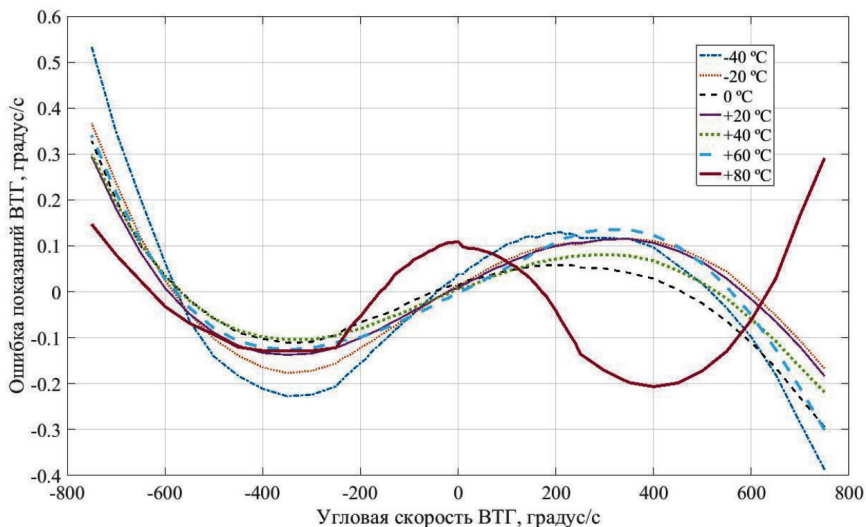


Рис. 4. Погрешности показаний ВТГ при представлении выходного сигнала как линейной комбинации амплитуд сигналов подавления квадратурной и кориолисовой составляющих

Линейная аппроксимация (1) выходного сигнала и соответствующие калибровочные коэффициенты (коэффициенты аппроксимации) могут быть достаточными для обеспечения требуемой точности ВТГ-ДУС с диапазоном измерения угловой скорости до ± 400 °/с. При этом максимальная погрешность измерения не превышает 0,25°/с, а нелинейность выходного сигнала составляет не более 0,02%.

Из рис. 4 следует, что на границах диапазона ± 750 °/с погрешности измерений существенно возрастают. Для увеличенного диапазона измеряемых угловых скоростей

выходной сигнал аппроксимируется полиномом пятой степени (2) от сигнала предыдущей аппроксимации (3), представляющей линейную комбинацию полиномов не выше пятой степени:

$$\Omega_{\text{ИЗМ2}} = \sum_{i=0}^{M_2} K_i \Omega_{\text{ИЗМ1}}^i, \quad (2)$$

$$\Omega_{\text{ИЗМ1}} = A_{\text{КОР}} \sum_{i=0}^{M_1} C_i f_B^i + A_{\text{КВ}} \sum_{i=0}^{M_1} Q_i f_B^i + \sum_{i=0}^{M_1} Z_i f_B^i, \quad (3)$$

где $\Omega_{\text{ИЗМ1}}$, $\Omega_{\text{ИЗМ2}}$ – измеренная угловая скорость после первой и второй коррекции; M_1 , M_2 – максимальные степени полиномов (не выше пятой); C_i , Q_i , Z_i , K_i – постоянные полиномов, не зависящие от температуры; $A_{\text{КОР}}$, $A_{\text{КВ}}$ – амплитуды (В) в контурах подавления кориолисовой и квадратурной составляющих демодулированного сигнала; f_B – текущая резонансная частота возбуждения.

На рис. 5 приведены погрешности показаний ВТГ в результате двухступенчатой коррекции (2, 3) для диапазона измерения $\pm 750^\circ/\text{с}$.

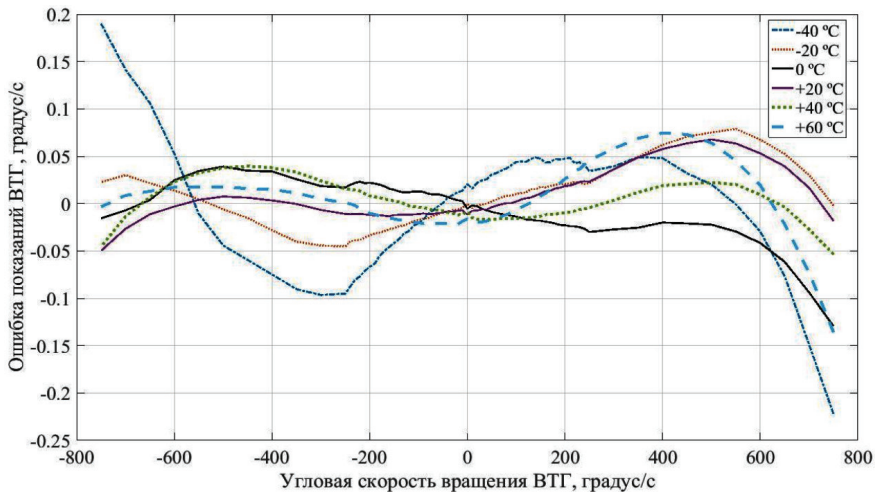


Рис. 5. Погрешности показаний ВТГ при аппроксимации выходного сигнала полиномами пятой степени от сигнала предыдущей коррекции

Из рис. 5 следует, что двухступенчатая коррекция ВТГ обеспечивает на границах диапазона измеряемых угловых скоростей погрешность не более $0,2^\circ/\text{с}$ при нелинейности выходного сигнала не более $0,01\%$ во всем температурном диапазоне. Корректирующие функции (2, 3) реализованы в управляющей программе электронного модуля ВТГ-ДУС, и зависимости на рис. 5 являются результатами его испытаний.

На рис. 6 приведены отклонения Аллана, построенные на основе показаний ВТГ-ДУС при проведении цикла испытаний в апреле (1 на рис. 6), мае (2 на рис. 6) и июле (3 на рис. 6). При испытаниях использовался единый набор коэффициентов коррекции. Графики 1 и 2 получены на оборудовании ТулГУ при поддержании температуры ВТГ-ДУС 20°C на протяжении всего времени записи показаний. График 3 (рис. 6) получен при проведении испытаний на оборудовании сторонней организации. ВТГ-ДУС находился в лаборатории без помещения в термокамеру, т.е. испытания проводились без стабилизации температуры.

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 $0,03^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

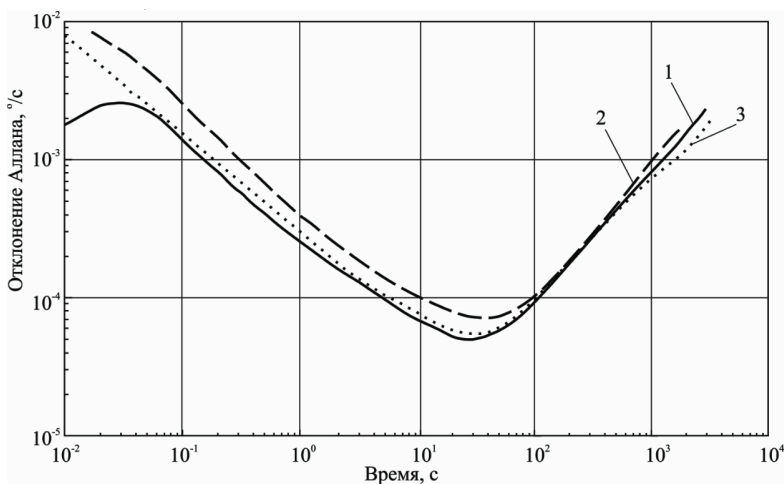


Рис. 6. Отклонения Аллана ВТГ-ДУС с коническим резонатором (1 – апрель, 2 – май, 3 – июль)

Анализ полученных результатов позволяет говорить о стабильности калибровки по крайней мере в течение четырех месяцев.

Реализация

В соответствии с рис. 1 в МЗП изготовлены ВТГ-ДУС в двух вариантах, отличающихся способом крепления к носителю: по цилиндрическому ободу на крышке чувствительного элемента и на трехточечной опоре в основании с амортизаторами или без них. На базе ВТГ-ДУС на трехточечной опоре с амортизаторами изготовлен и прошел полный цикл испытаний макет трехосного измерительного модуля.

Заключение

Преимуществом предлагаемого подхода к настройке и калибровке является учет особенностей (технологических) каждого резонатора, что в итоге приводит к увеличению точностных показателей прибора.

К недостаткам следует отнести:

- длительное время калибровки одного ВТГ-ДУС (2-3 дня с учетом проверки достигнутой точности повторными испытаниями);
- большое количество коэффициентов, увеличивающее вычислительную нагрузку электронного модуля;

- качество калибровки существенно зависит от количества точек разбиения температурного диапазона эксплуатации: чем больше точек, тем выше качество, но при этом увеличивается время калибровки.

Авторы отмечают, что некоторые недостатки рассмотренного метода являются общими при настройке и калибровке любых гироскопических приборов.

По результатам настройки и калибровки ВТГ-ДУС с металлическим резонатором и диапазоном измерения ± 750 °/с в температурном диапазоне от -40 °С до $+80$ °С имеет следующие характеристики: нестабильность нулевого сигнала не более $0,3^\circ/\text{ч}$, случайное блуждание не более $0,03^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, погрешность масштабного коэффициента во всем диапазоне температур не более $0,01\%$, амплитуда шума покоя не более $0,02^\circ/\text{с}$.

ЛИТЕРАТУРА

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. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.
3. **Линч Д.** Взгляд компании «НОРТРОП ГРУММАН» на развитие инерциальных технологий // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 102–106.
4. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика волнового твердотельного и микромеханических гироскопов. М.: Физматлит, 2009. 228 с.
5. **Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А.** Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 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. **Матвеев В.А., Басараб М.А., Лунин Б.С., Чуманкин Е.А., Юрин А.В.** Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором // Вестник РФФИ. Фундаментальная инженерия. 2015. №3 (87). С. 84–96.
8. **Лунин Б.С.** Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. М.: МАИ, 2005. 224 с.
9. **Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж.** Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. №4 (83). С. 45–54.
10. **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.
11. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Барабашов А.С., Щербань В.И., Марусик П.И., Коваленко В.А.** Оптимизация теплофизических параметров КВГ с металлическим резонатором и результаты температурных испытаний // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: ФГУП РФ ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 71–75.
12. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Барабашов А.С., Марусик П.И., Умаханов И.О.** Увеличение точности вибрационного гироскопа с металлическим резонатором // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: ГНЦ РФ ФГУП ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 27–31.
13. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Миколишин И.Т.** Результаты испытаний кориолисового вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность к вибрации и удару // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С. 83–88.
14. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А.** Исследования точности измерения азимута кориолисовым вибрационным гироскопом с металлическим резонатором // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 26–31.
15. **Чуманкин Е.А.** Результаты проектирования и испытаний датчика угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа. // Гироскопия и навигация. 2013. № 2 (81). С. 104–111.
16. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ «ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 315 с.

17. **Техническая документация** на GI-CVG-N2x00D [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: http://www.innalabs.com/uploads/products/brochures/IN-IR-MPD-72-104_GI-GVC-N2x00D_DS_rev1.1.pdf (дата обращения: 26.06.2019).
18. **Техническая документация** на GI-CVG-N1x00A [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: http://www.innalabs.com/uploads/products/brochures/IN-IR-MPD-72-107_GI-GVC-N1x00A_DS_rev1.2.pdf (дата обращения: 26.06.2019).
19. **Техническая документация** на GI-CVG-U1x00D [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: http://www.innalabs.com/uploads/products/brochures/IN-IR-MPD-72-110_GI-GVC-U1x00D_DS_rev1.2.pdf (дата обращения: 26.06.2019).
20. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Требухов А.В., Некрасов А.В.** Нейросетевой алгоритм калибровки волнового твердотельного гироскопа // Инженерная физика. №9. 2010. С. 13–20.
21. **Некрасов А.В.** Нейросетевой алгоритм калибровки волнового твердотельного гироскопа. Дисс. канд. техн. наук. Москва, 2010.
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 / Под ред. В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. 189 с.
23. **Мейер Д., Зозелле Д.** Измерительная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. №3 (78). С. 45–54.

Raspopov, V.Ya., Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V., Likhosherst, V.V. (Tula State University, Russia), **Shepilov, S.I.** (Michurinsk Plant «Progress», JSC, Michurinsk, Russia)

Tuning and Calibration of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Metal Resonator to Operate in Angular Rate Sensor Mode, *Гироскопия и Навигация*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31–41.

Abstract. The paper discusses the specific features of tuning and calibration of a hemispherical resonator gyroscope (HRG) with a metal resonator for the angular rate sensor (ARS) mode. Since the output signal contains the Coriolis and quadrature components, the compensating signal in the feedback loop is formed on the basis of two-stage correction algorithm. The results of the HRG-ARS testing using an electronic unit with the two-stage correction functions are presented.

Key words: hemispherical resonator gyroscope, resonator, tuning, calibration, correction function.

Материал поступил 24.07.2019