УДК 583.381 DOI: 10.17587/mau.23.440-447

В. Я. Распопов[1], д-р техн. наук, проф., info@tsu.tula.ru,
В. В. Лихошерст[1], канд. техн. наук, доц., lvv_01@inbox.ru,
С. В. Егоров[1, 2], аспирант [1], начальник цеха[2], 022@mzp.su,
[1] Тульский государственный университет,
[2] АО "Мичуринский завод "Прогресс", г. Мичуринск

Исследование функционирования блока электроники и резонатора волнового твердотельного гироскопа в режиме датчика угловой скорости*

Описаны принципы работы волнового твердотельного гироскопа на примере конструкции металлического резонатора цилиндрической формы, в котором создание колебаний и съем сигнала осуществляются с помощью пьезоэлементов, расположенных на основании резонатора. Рассмотрен режим позиционного возбуждения первичных колебаний и формирование сигнала обратной связи для обеспечения работы резонатора в режиме датчика угловой скорости.

Приведена блок-схема последовательности преобразования сигнала, снимаемого с пьезоэлементов осей узлов и пучностей, для организации обратных связей. Рассмотрены подходы к построению контуров управления амплитудой и фазой колебаний для создания первичных колебаний и компенсации амплитуды колебаний оси узла. Наличие этих контуров позволяет обеспечить работу волнового твердотельного гироскопа в режиме датчика угловых скоростей. Для всех участков преобразования сигнала составлено математическое описание вычислительных процессов исходя из условия реализации вычислительных процедур цифровым вычислителем. Составлены математические зависимости, необходимые для коррекции выходного сигнала — обеспечения его линейности и стабильности в интервале температур эксплуатации и диапазоне измеряемых угловых скоростей. Приведены результаты испытаний, подтверждающие работоспособность волнового твердотельного гироскопа в режиме датчика угловой скорости.

Рассмотрен подход к построению модели резонатора на основе метода конечных элементов. Показан подход к верификации конечно-элементной модели путем сопоставления результатов экспериментального исследования характеристик резонатора с результатами моделирования.

Ключевые слова: *волновой твердотельный гироскоп, резонатор, модальный анализ, резонансные частоты, настройка, калибровка*

Введение

Физические принципы работы волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) основаны на эффекте прецессии волновой картины вибрирующей оболочки на вращающемся основании, открыты Дж. Х. Брайаном [1] и описаны в многочисленных работах, например [2—5]. В работах [1, 6] помимо теории ВТГ рассмотрены варианты схемотехники для возбуждения и измерения выходного сигнала ВТГ.

Впечатляющие результаты в практических разработках ВТГ и систем на их основе достигнуты в США и Франции [7, 8]. В России практические результаты в разработке ВТГ с металлическим резонатором достигнуты в ОАО "Темп-Авиа" (г. Арзамас), ОАО "Пермская НПК", Пензенский научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ, г. Пенза), АО "Мичуринский завод "Прогресс" (МЗП) совместно с кафедрой "Приборы управления" ТулГУ [9].

Необходимо отметить безусловное влияние на разработки ВТГ с металлическим резонатором в России результатов, полученных компанией *InnaLabs*. Это стало возможно благодаря маркетинговой деятельности компании *InnaLabs Ltd* в открытом доступе. Головное подразделение находится в г. Белфаст, Ирландия.

Цель данной статьи — математическое описание вычислительных процессов, реализуемых электронным блоком управления и обеспечивающих работу ВТГ в режиме датчика угловой скорости, описание особенностей проектирования резонатора.

Конструкция и обеспечение режима работы резонатора

Конструкция резонатора ВТГ приведена на рис. 1, *а*. Резонатор *1* состоит из двух сопряженных полых цилиндров, один из которых

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники "Разработка датчика угла крена на базе волнового твердотельного гироскопа" №ДС 1264 от 25.10.2021 г.

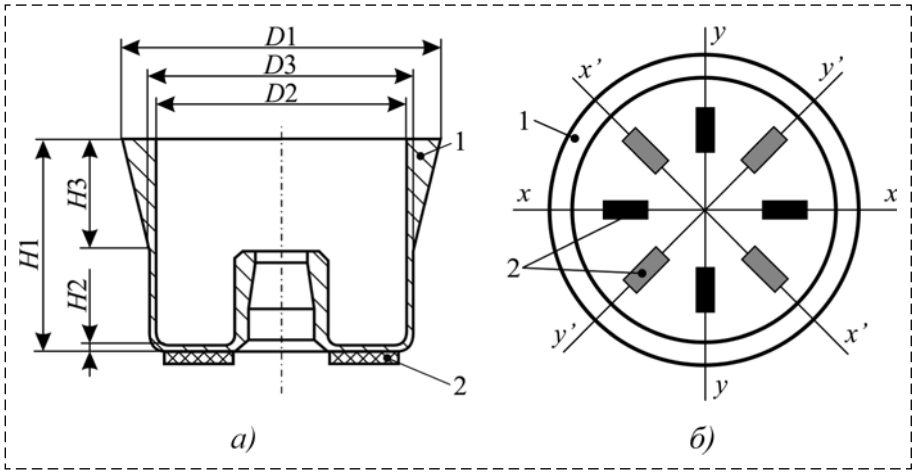

Рис. 1. Конструкция резонатора ВТГ в разрезе (*а*) и расположение пьезоэлементов на донышке (*б*):
1 — резонатор; *2* — пьезоэлемент

Fig. 1. The design of the VTG resonator in the section (*a*) and the location of the piezoelectric elements on the bottom (*б*):
1 — resonator; *2* — piezoelectric element

с переменной толщиной стенки (конус) является его рабочей зоной, а тонкостенный цилиндр, сопряженный с донышком, выполняет роль подвеса. На донышке расположены пьезоэлементы *2*, предназначенные для съема сигнала и управления резонатором. Расположение пьезоэлементов условно показано на рис. 1, *б*.

Работа ВТГ в режиме датчика угловых скоростей (ВТГ-ДУС) обеспечивается позиционным возбуждением резонатора, при котором положение актюаторов фиксировано относительно резонатора.

Возбуждение первичных колебаний генерируется двумя диаметрально расположенными пьезоэлементами (одной диаметральной парой), расположенными на одной оси x—x (рис. 1, *б*) на частоте собственных колебаний резонатора. Пары пьезодатчиков по осям x'—x', y—y обеспечивают съем сигнала. При этом сигнал пары y—y используется для формирования сигнала, поддерживающего первичные колебания. Сигнал пары x'—x' для режима ВТГ-ДУС при отсутствии вращения основания должен быть равен нулю. Пара пьезодатчиков y'—y' (рис. 1, *б*) используется для формирования сигнала обратной связи, которая приводит угол поворота колебательной картины резонатора к нулю.

Оси x—x и y—y называют осями пучностей, так как амплитуда деформации в направлении этих осей при работе ВТГ максимальна, а оси x'—x' и y'—y' — осями узлов, в них деформация практически отсутствует.

Математическое описание вычислительных процессов в блоке электроники ВТГ-ДУС

Для обеспечения работы ВТГ в режиме ДУС электронный блок управления должен решать следующие задачи:

— поддержание постоянной амплитуды первичных колебаний резонатора (ось x—x);

— обеспечение фазового сдвига между задаваемым сигналом возбуждения (ось x—x) и снимаемым сигналом деформации резонатора (ось y—y), равного 90°;

— компенсацию сигнала датчиков оси x'—x' (подавление амплитуды колебаний путем подачи сигнала на пьезоэлементы оси y'—y') при действии угловой скорости.

Для решения обозначенных задач в блоке электроники управления реализованы контуры обратных связей по сигналам, снимаемым с пьезоэлементов осей пучностей и узлов, осуществляющие коррекцию амплитуд и фаз колебаний. Исходя из требований быстродействия и точности контуры реализуют пропорционально-интегральный закон управления. Необходимость обеспечения высокой скорости и точности вычислительных процессов, а также стремление уменьшить влияние температурных факторов на работу электронного блока диктуют требования уменьшения числа аналоговых элементов и замены их цифровыми (дискретными) элементами. Таким образом, реализация контуров управления сводится к задаче определения типов и последовательности вычислительных операций с сигналами, снимаемыми с пьезоэлементов, т. е. к проектированию вычислительного алгоритма. Последовательность вычислительных процессов в блоке электроники, обеспечивающих режим ВТГ-ДУС, в виде блок-схемы приведена на рис. 2.

На рис. 2 введены следующие обозначения:

$A_{\text{возб}}$ — заданная амплитуда возбуждения первичных колебаний (раскачки);

$Y_{\text{возб}}$ — гармонический сигнал возбуждения первичных колебаний;

$\text{П}_{\text{инт}}$, $\text{П}_{\text{проп}}$ — интегральная и пропорциональная составляющие контура поддержания амплитуды первичных колебаний;

φ_i — текущая фаза сигнала возбуждения колебаний резонатора;

$X_{пу}$, $X_{уз}$ — сигналы, полученные с пьезоэлементов, расположенных по оси y—y и оси x'—x' (рис. 1, *б*), соответственно;

$A_{sпу}$, $A_{cпу}$, $A_{sуз}$, $A_{cуз}$ — амплитуды синусной и косинусной составляющих сигналов, полученных по осям y—y и x'—x';

$\varphi_{пу}$, $A_{пу}$ — фаза и амплитуда сигнала пучности;

$A_{sуз_ф}$, $A_{cуз_ф}$ — амплитуды синусной и косинусной составляющих сигнала узла после фильтрации;

$A_{кв}$, $A_{кор}$ — амплитуды квадратурной и кориолисовой составляющих сигнала коррекции узла;

$Y_{корр}$ — гармонический сигнал коррекции амплитуды колебаний узла;

$A_{кор_ф}$ — кориолисова составляющая сигнала узла после фильтрации;

$\Omega_{изм}$ — текущее измеренное значение угловой скорости основания.

Вычислительный алгоритм, приведенный на рис. 2, был реализован в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), за исключением процедур коррекции нулевого сигнала и коэффициента передачи, которые реализованы в контроллере. Применение ПЛИС обусловлено возможностью параллельного выполнения нескольких вычислительных операций, что необходимо для минимизации временных задержек между вычислением амплитуд и фаз снимаемых сигналов и формированием сигналов управления. Контроллер реализует коррекцию выходного сигнала об угловой скорости, передачу в энергонезависимую память блока электроники информации, необходимой для управления резонатором, и интерфейс связи с потребителем информации об угловой скорости.

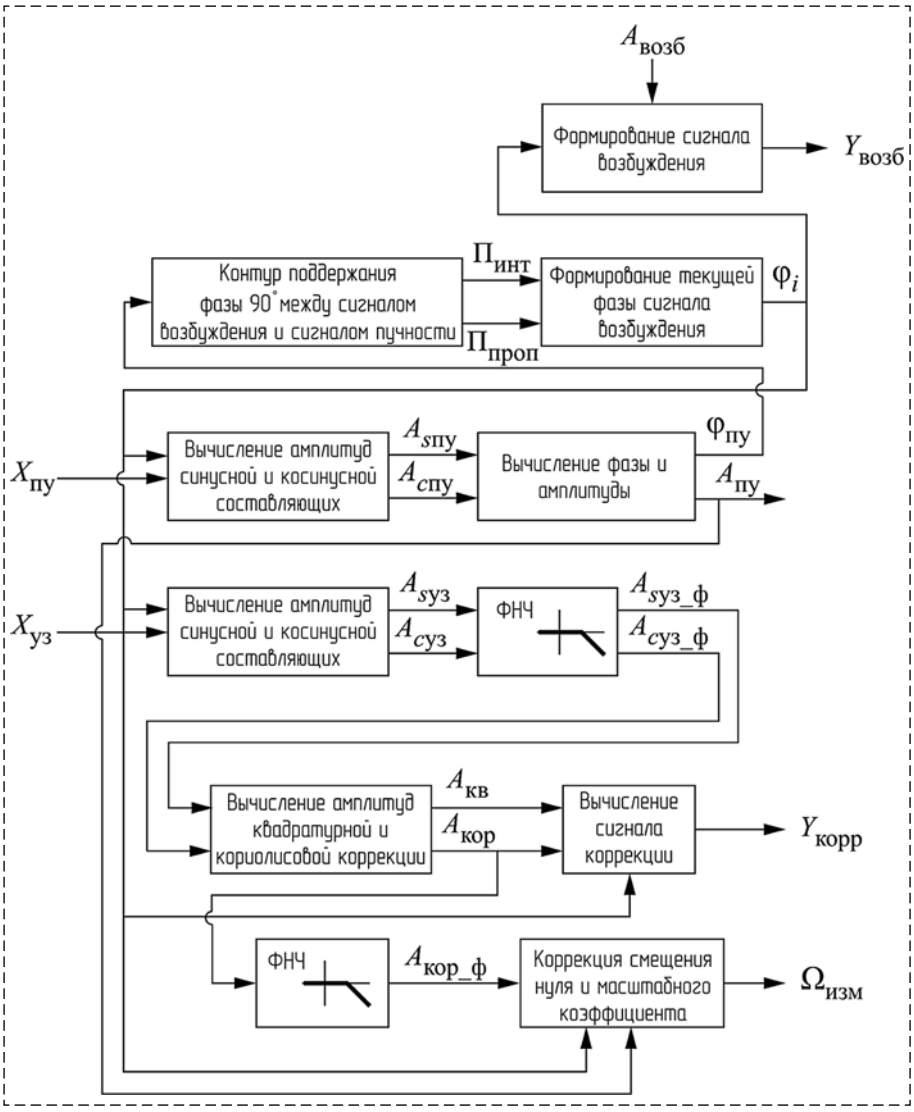

Рис. 2. Блок-схема вычислительных процессов
Fig. 2. Block diagram of computing processes

Все вычисления в ПЛИС осуществляются в целых числах со знаком или без знака. В зависимости от необходимой точности и типа вычислительной операции числа имеют различную разрядность от 16 до 32.

Входными данными для вычислительных процессов являются приведенные в цифровой вид сигналы с диаметральной пары пьезоэлементов оси пучности ($X_{пу}$) и оси узла ($X_{уз}$) резонатора.

Для каждого из этих сигналов вычисляются амплитуды синусных (A_s) и косинусных (A_c) составляющих, при этом в качестве опорного сигнала используется сигнал возбуждения колебаний. Для их вычисления используется метод наименьших квадратов. Сигналы аппроксимируются как сумма синусоиды и косинусоиды с амплитудами A_s и A_c, которые находятся из условия минимума суммы квадратов отклонения сигнала от его аппроксимации:

$$\sum_{i=0}^{N-1}[x_i - (A_s \sin(\varphi_i) + A_c \cos(\varphi_i))]^2 \to \min, \quad (1)$$

где N — число отсчетов за один период колебаний; x_i — входной гармонический сигнал в цифровых кодах АЦП; A_s, A_c — амплитуды синусной и косинусной составляющих входного гармонического сигнала в цифровых кодах АЦП; φ_i — текущая фаза сигнала возбуждения.

В соответствии с (1) выражения для вычисления амплитуды синусной и косинусной составляющих сигнала имеют следующий вид:

$$A_s = \frac{\Delta_s}{\Delta}, \quad A_c = \frac{\Delta_c}{\Delta},$$

где

$$\Delta = \sum_{i=0}^{N-1} \sin^2(\varphi_i) \sum_{i=0}^{N-1} \cos^2(\varphi_i) - \left(\sum_{i=0}^{N-1} \cos(\varphi_i) \cdot \sin(\varphi_i) \right)^2;$$

$$\Delta_s = \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi_i) x_i \sum_{i=0}^{N-1} \cos^2(\varphi_i) - \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\varphi_i) \sin(\varphi_i) \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\varphi_i) x_i;$$

$$\Delta_c = \sum_{i=0}^{N-1} \sin^2(\varphi_i) \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\varphi_i) x_i - \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi_i) x_i \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi_i) \cos(\varphi_i).$$

Для вычисления значений $A_{s\text{пу}}$, $A_{c\text{пу}}$ в качестве x_i подставляются значения сигнала $X_{\text{пу}}$, а для вычисления амплитуд узла $A_{s\text{уз}}$, $A_{c\text{уз}}$ — значения сигнала $X_{\text{уз}}$.

Вычисление фазы $\varphi_{\text{пу}}$ и амплитуды $A_{\text{пу}}$ сигнала пучности осуществляется на основе $A_{s\text{пу}}$ и $A_{c\text{пу}}$ по формулам

$$\varphi_{\text{пу}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{A_{s\text{пу}}}{A_{c\text{пу}}}\right), \quad A_{\text{пу}} = \sqrt{A_{s\text{пу}}^2 + A_{c\text{пу}}^2}.$$

Поддержание разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом, снимаемым по оси пучности, равной 90°, осуществляется контуром обратной связи, использующим интегральную $\Pi_{\text{ин}}$ и пропорциональную $\Pi_{\text{пр}}$ составляющие. Для вычисления этих составляющих рассчитывается разница фаз ($\Delta\varphi$) между углом 90° и текущей фазой сигнала пучности:

$$\Delta\varphi = 90^\circ - \varphi_{\text{пу}}. \quad (2)$$

Величина $\Pi_{\text{пр}} = \Delta\varphi/4$, а $\Pi_{\text{ин}}$ вычисляется по следующему правилу: если модуль разницы (2) превышает некое значение, определяемое в процессе настройки для каждого резонатора индивидуально на основе анализа точности поддержания амплитуды и фазы колебаний, то

$$\Pi_{\text{ин}} = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi > 0, \\ -1, & \Delta\varphi < 0; \end{cases}$$

если же модуль разницы (2) не превышает указанное значение, то $\Pi_{\text{ин}} = 0$.

Формирование текущей фазы сигнала возбуждения осуществляется по формуле

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + d\varphi_i + \Pi_{\text{пр}},$$

где $d\varphi_i = d\varphi_{i-1} + \Pi_{\text{ин}}$ — изменение фазы, вызванное интегральной составляющей.

Начальное значение $d\varphi_0$ определяется исходя из номинальной частоты резонатора. Под номинальной частотой резонатора понимается его собственная частота, полученная в процессе изготовления и измеренная при нормальных климатических условиях. Данный параметр является уникальным для каждого резонатора и задается на стадии настройки блока электроники управления.

Текущее значение сигнала возбуждения $Y_{\text{возб}}$ рассчитывается по формуле

$$Y_{\text{возб}} = A_{\text{возб}} \cos(\varphi_i),$$

где $A_{\text{возб}}$ — требуемая амплитуда возбуждения в единицах цифрового кода ЦАП.

Для фильтрации амплитуд синусной $A_{s\text{уз}}$ и косинусной $A_{c\text{уз}}$ составляющих сигнала узла $X_{\text{уз}}$ используется цифровой фильтр первого порядка с передаточной функцией, соответствующей апериодическому звену. Такой фильтр при постоянной времени $T = 0{,}000256$ с обеспечивает восьмикратное ослабление сигнала на частоте 5000 Гц и имеет простую реализацию:

$$A_{s\text{уз_ф}} = A_{s\text{уз}}/256 + 255A_{s\text{уз_ф}}/256;$$

$$A_{c\text{уз_ф}} = A_{c\text{уз}}/256 + 255A_{c\text{уз_ф}}/256,$$

где $A_{s\text{уз_ф}}$, $A_{c\text{уз_ф}}$ — фильтрованные значения синусной и косинусной составляющих.

Амплитуды сигналов квадратурной и кориолисовой коррекций вычисляются по формулам

$$A_{\text{кв}} = K_{\text{кв_пр}}\, A_{c\text{уз_ф}} + K_{\text{кв_ин}}\, A_{c\text{уз_ф_ин}};$$

$$A_{\text{кор}} = K_{\text{кор_пр}}\, A_{s\text{уз_ф}} + K_{\text{кор_ин}}\, A_{s\text{уз_ф_ин}}, \quad (3)$$

где $A_{c\text{уз_ф_ин}} = A_{c\text{уз_ф_ин}} + A_{c\text{уз_ф}}$; $A_{s\text{уз_ф_ин}} = A_{s\text{уз_ф_ин}} + A_{s\text{уз_ф}}$; $K_{\text{кв_пр}}$, $K_{\text{кв_ин}}$, $K_{\text{кор_пр}}$, $K_{\text{кор_ин}}$ — пропорциональные и интегральные коэффициенты квадратурной и кориолисовой коррекции соответственно.

Значения коэффициентов определяются на стадии настройки ВТГ по виду и характеру переходного процесса и требуемой полосе пропускания датчика.

Сигнал коррекции $Y_{\text{корр}}$ вычисляется по формуле

$$Y_{\text{корр}} = A_{\text{кв}}\sin(\varphi_i) + A_{\text{кор}}\cos(\varphi_i).$$

Вычисленное в ПЛИС значение $A_{\text{кор}}$ содержит в себе нежелательные высокочастотные компоненты, причем наибольшая амплитуда компонент проявляется на текущей частоте сигнала возбуждения $f_{\text{возб}}$. Для подавления высокочастотных компонент применяется фильтр нижних частот второго порядка. Передаточная функция фильтра имеет вид

$$\frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}.$$

Параметры K, T, ξ зависят от собственной частоты резонатора и его добротности, т. е. являются уникальными для каждого конкретного резонатора и должны быть определены и реализованы (занесены в энергонезависимую память электроники управления) на этапе настройки ВТГ-ДУС.

Реализация фильтра имеет вид

$$A_{\text{кор_ф}i} = k_{\text{ф1}}\, A_{\text{кор}} + k_{\text{ф2}}\, A_{\text{кор_ф}i\text{-}1} + k_{\text{ф3}}\, A_{\text{кор_ф}i\text{-}2}, \quad (4)$$

где коэффициенты $k_{\text{ф1}}$, $k_{\text{ф2}}$, $k_{\text{ф3}}$ рассчитываются из параметров K, T, ξ методом обратных разностей.

Вычисленный в соответствии с соотношением (4) сигнал $A_{\text{кор_ф}}$ является выходным сигналом ВТГ-ДУС и должен быть пропорционален угловой скорости вращения резонатора. Однако, как показали лабораторные исследования, пропорциональность нарушается, так как сигнал имеет зависимость смещения нуля от температуры и масштабного коэффициента от температуры и текущей угловой скорости. Для уменьшения влияния данных факторов вводится коррекция смещения нуля и масштабного коэффициента. Коррекция выходного сигнала выполняется микроконтроллером на основе функций зависимости выходного сигнала от угловой скорости и температуры. Вид функций и коэффициенты получены на основе обработки экспериментальных данных ВТГ-ДУС при действии угловой скорости и температуры. Последовательность процедур настройки и калибровки ВТГ-ДУС с блоком электроники изложены в работе [11].

На рис. 3 для ВТГ-ДУС, резонатор которого имеет характерные размеры (см. рис. 1, *а*) (мм): $D1 = 22 - 0{,}21$; $D2 = 20{,}6 + 0{,}021$; $D3 = 21{,}6 - 0{,}021$; $H1 = 16 - 0{,}11$; $H2 = 0{,}5 \pm 0{,}02$; $H3 = 10 \pm 0{,}1$, показана результирующая ошибка скорректированного выходного сигнала. Под результирующей ошибкой в данном случае понимается разница между заданной угловой скоростью стенда и измеренной ВТГ-ДУС угловой скоростью. Для обеспечения приведенного уровня ошибки используется корректирующая функция, описываемая полиномом 5-го порядка, коэффициенты которой получены в результате обработки выходных сигналов ВТГ-ДУС на различных температурах испытаний и угловых скоростях вращения основания.

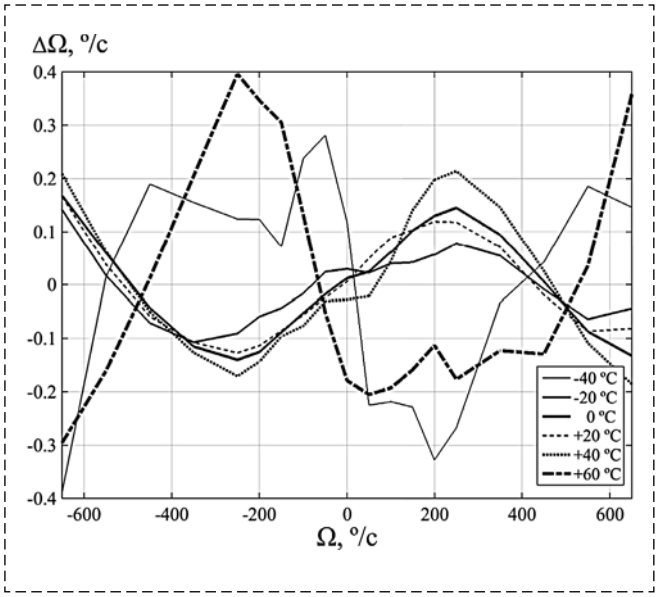

Рис. 3. Результирующая ошибка показаний ВТГ после коррекции во всем диапазоне температур для диапазона измерения ±650 °/с

Fig. 3. The resulting error in the WTG readings after correction over the entire temperature range for the measurement range of ±650 dps

Из анализа графиков на рис. 3 следует, что результирующая ошибка не превышает 0,4 °/с. Нелинейность масштабного коэффициента для полных диапазонов температур и измеряемой угловой скорости не превышает 0,03 %.

Таким образом, на основе математического описания вычислительных процедур и разработки на базе него программного обеспечения для блока электроники в составе ПЛИС и контроллера реализован ВТГ-ДУС с металлическим резонатором цилиндрической формы.

Приведенное описание показывает, что точность и стабильность измерительных характеристик ВТГ-ДУС существенно зависят от коэффициентов (обратных связей, функций коррекции, фильтров). Данные коэффициенты определяются параметрами резонатора, которые могут быть получены в результате экспериментального исследования резонатора, но гораздо более перспективным является проектирование и последующее изготовление резонаторов с известными, требуемыми характеристиками. Такой подход позволяет уменьшить время изготовления ВТГ-ДУС в целом и сократить его конечную стоимость за счет сокращения циклов испытаний. Реализация такого подхода предполагает разработку и верификацию модели резонатора. Исходя из принципа работы ВТГ наиболее подходящей моделью является конечно-элементная модель, верификацию которой следует осуществлять по характеристикам образцов резонаторов.

Модальный анализ

В реальном резонаторе распределение масс и плотностей по его объему является различным. Поэтому выделяют легкую ось, вдоль которой частота колебаний максимальна, и тяжелую, вдоль которой частота колебаний минимальна. Ориентация этих осей определяется относительно физических осей расположения преобразователей (пьезоэлементов).

Разница в частотах колебаний вдоль легкой и тяжелой осей (разночастотность) может достигать 2 Гц и более и обусловлена анизотропией жесткости, а разнодобротность — анизотропией вязкости материала резонатора. Разночастотность может быть уменьшена балансировкой резонатора.

В настоящее время, вероятно, единственным достоверным методом проектирования резонатора является его конечно-элементное (КЭ) моделирование и сравнение результатов модального анализа модели и результатов исследования реального резонатора.

Модальный анализ может быть выполнен акустическим методом на специальной установке и с помощью вибростенда.

По результатам сравнения параметров резонатора и модели уточняются тип и размеры конечных элементов, коэффициенты демпфирования всех элементов и среды. С помощью верифицированной таким образом КЭ модели можно прогнозировать частотный спектр резонатора с новыми размерами. Таким образом, на основе верифицированной модели можно осуществлять проектирование резонаторов с требуемыми характеристиками.

Наиболее простым методом анализа качества резонатора является акустический. Он позволяет определить собственные частоты, разночатотность, разнодобротность и выполнить разбраковку резонаторов до приклейки пьезоэлементов.

Сигнал, регистрируемый микрофоном после ударного воздействия на резонатор, имеет вид затухающих биений (рис. 4), что обусловлено двумя близкими резонансными частотами по легкой и тяжелой осям.

Разночастотность определяется зависимостью $\Delta F = 1/t$, где t — время между двумя соседними биениями — пиками колебаний.

По времени τ уменьшения амплитуд колебаний в **e** раз определяется добротность резонатора $Q = 2\pi f\tau$ (f — частота колебаний).

Нанося удары по резонатору в разных местах по окружному углу, можно определить разнодобротность.

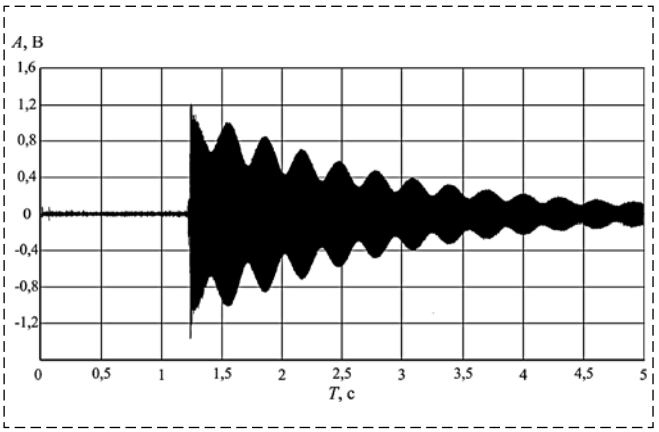

Рис. 4. Сигнал, регистрируемый микрофоном
Fig. 4. The signal recorded by the microphone

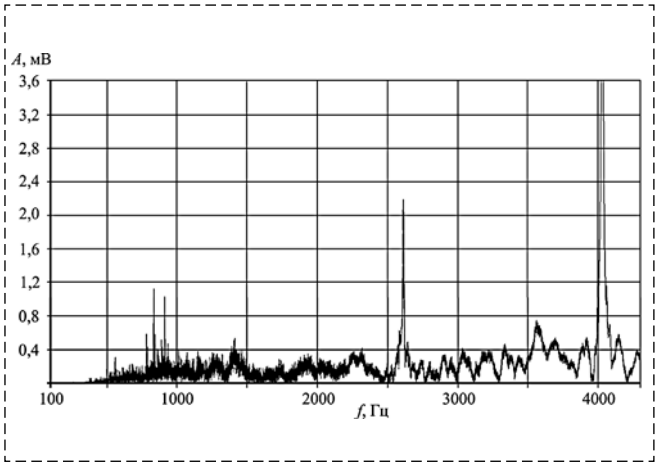

Рис. 5. Результаты быстрого преобразования Фурье
Fig. 5. FFT Results

На основании анализа сигнала с микрофона получены следующие результаты: разночастотность ΔF = 3,4 Гц; добротность Q = = 20616...23162,9; разнодобротность ΔQ = 2546,9.

Собственные частоты резонатора получены в результате быстрого преобразования Фурье (FFT) (рис. 5): 1412 Гц — изгибная форма колебания донышка относительно посадочного узла; 4028,2 Гц — изгибная мода (рабочая мода) кромки резонатора.

В результате коррекции КЭ сетки, коэффициентов материала и среды удалось добиться различия частот, полученных в результате модального анализа КЭ модели и акустического анализа, менее чем на 1 %, что позволяет говорить о достижении целей верификации. Однако, ввиду анизотропности используемого в КЭ модели материала резонатора, полученная по модели разночастотность, равная 1 Гц, существенно отличается от реальной, полученной при исследовании резонатора и равной 3,4 Гц. Так как разночастотность существенно уменьшается при балансировке, данным критерием оценки степени приближения модели к реальному образцу можно принебречь.

Модальный анализ с помощью КЭ моделирования позволяет выполнить коррекцию базовых размеров резонатора и обеспечить уменьшение влияния изгибных колебаний донышка на выходной сигнал. Кроме того, можно обеспечить разницу частот между соседними модами колебаний более 1000 Гц, что увеличивает соотношение сигнал/шум. На основании результатов КЭ моделирования можно получить параметры, необходимые для расчета коэффициентов контуров управления.

Заключение

Приведено математическое описание вычислительных процедур, обеспечивающих работу электроники ВТГ-ДУС в заданных диапазонах изменения угловой скорости и температуры. Составлена и верифицирована КЭ модель резонатора ВТГ, позволяющая осуществлять проектирование с достаточной точностью резонаторов с требуемыми характеристиками. Результаты КЭ моделирования резонатора позволяют рассчитать коэффициенты схем управления, фильтрации и коррекции, необходимые для функционирования блока электроники.

Список литературы

1. **Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А.** Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.

2. **Lynch D. D.** Vibration-induced drift in the hemispherical resonator gyro // Proc. Annual Meeting of the Institute of Navigation. 23—25 June 1987. Dayton, Ohio. P. 34—37.

3. **Журавлев В. Ф., Климов А. М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985.

4. **Егармин Н. Е., Юрин В. Е.** Введение в теорию вибрационных гироскопов. М.: Бином, 1993. 111 с.

5. **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.

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

8. **Жанруа А., Буве А., Ремилье Ж.** Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С.45—54.

9. **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: Изд-во ТулГУ, 2018. 189 с.

10. **Распопов В. Я., Алалуев Р. В., Ладокин 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.

Investigation of the Functioning of the Electronics Unit and the Resonator of a Wave Solid-State Gyroscope in the Mode Angular Velocity Sensor

V. Ya. Raspopov, info@tsu.tula.ru, **V. V. Likhosherst**, lvv_01@inbox.ru, **S. V. Egorov**, 022@mzp.su,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation

Corresponding author: **Raspopov Vladimir Ya.,** D., Professor,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: lvv_01@inbox.ru

Accepted on May 16, 2022

Abstract

The principles of operation of a wave solid-state gyroscope are described using the example of a cylindrical metal resonator design, in which oscillations are created and a signal is picked up by means of piezoelectric elements located on the base of the resonator. The mode of positional excitation of primary oscillations and the formation of a feedback signal to ensure the operation of the resonator in the mode of an angular velocity sensor are considered. A block diagram of the conversion sequence of the signal taken from the piezoelectric elements of the axes of nodes and antinodes for the organization of feedbacks is given. Approaches to the construction of control loops for the amplitude and phase of oscillations to create primary oscillations and compensate for the amplitude of oscillations of the node axis are considered. The presence of these circuits makes it possible to ensure the operation of a wave solid-state gyroscope in the mode of an angular velocity sensor. For all areas of signal conversion, a mathematical description of computational processes has been compiled, based on the condition for the implementation of computational procedures by a digital computer. Mathematical dependences necessary for correcting the output signal — ensuring its linearity and stability in the range of operating temperatures and the range of measured angular velocities are compiled. The results of tests confirming the operability of a wave solid-state gyroscope in the mode of an angular velocity sensor are presented. An approach to constructing a resonator model based on the finite element method is considered. An approach to the verification of a finite element model is shown by comparing the results of an experimental study of the characteristics of the resonator with the simulation results.

Keywords: *wave solid-state gyroscope, resonator, modal analysis, resonant frequencies, tuning, calibration*

Acknowledgements: The article was prepared with the financial support of the Grant of the Government of the Tula region in the field of science and technology "Development of a roll angle sensor based on a wave solid-state gyroscope" No. DS 1264 dated 10.25.2021.

For citation:

Raspopov V. Ya., Likhosherst V. V., Egorov S. V. Investigation of the Functioning of the Electronics Unit and the Resonator of a Wave Solid-State Gyroscope in the Mode Angular Velocity Sensor, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2022, vol. 23, no. 8, pp. 440—447.

DOI: 10.17587/mau.23.440-447

References

1. **Lunin B. S., Matveev V. A., Basarab M. A.** Wave solid-state gyroscope. Theory and technology, Moscow, Radio engineering, 2014, 176 p. (in Russian).

2. **Lynch D. D.** Vibration-induced drift in the hemispherical resonator gyro, *Proc. Annual Meeting of the Institute of Navigation,* June 23—25, 1987, Dayton, Ohio, pp. 34—37.

3. **Zhuravlev V. F., Klimov A. M.** Wave solid-state gyroscope, Moscow, Science, 1985 (in Russian).

4. **Egarmin N. E., Yurin V. E.** Introduction to the theory of vibrational gyroscopes, Moscow, Binom, 1993, 111 p. (in Russian).

5. **Raspopov V. Ya., Likhosherst V. V.** Angular velocity sensor based on a wave solid-state gyroscope with a metal resonator for orientation, stabilization and navigation systems, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 7, pp. 374—382 (in Russian).

6. **Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V.** Design of wave solid-state gyroscope, Moscow, Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 1997, 165 p. (in Russian).

7. **Lynch D.** View of the company "Northrop Grumman" on the development of inertial technologies, *Gyroscopy and Navigation*, 2008, no. 3, pp.102—106 (in Russian).

8. **Jeanroy A., Bouvet A., Remilier J.** Wave solid-state gyroscope and its application in marine instrumentation, *Gyroscopy and Navigation*, 2013, no. 4 (83), pp. 45—54 (in Russian).

9. **Raspopov V. Ya., Volchikhin I. A., Volchikhin A. I., Ladonkin A. V., Likhosherst V. V., Matveev V. V.** Wave solid-state gyroscope with a metal resonator, Tula, TulGU Publishing House, 2018, 189 p. (in Russian).

10. **Raspopov V. Ya., Alaluev R. V., Ladokin A. V., Likhosherst V. V., Shepilov S. I.** Adjustment and calibration of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator operating in the mode of an angular velocity sensor, *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 31—41 (in Russian).