

Стабильность вычисляется по формуле (2)

$$S = 100\% * \frac{\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{N-1} x_{ji} \text{ xor } x_{j(i-1)}}{N * S} \quad (2)$$

где  $N$  – количество экспериментов;  $S$  – количество ячеек;  $x_{ji}$  – значение  $j$ -той ячейки в  $i$ -том эксперименте.

**В результате проведенного сравнения мы пришли к следующему выводу:** реальные образцы статической памяти обладают меньшей стабильностью ячеек, чем эмуляция на ПЛИС, но при этом дают возможность получить соотношение нулей и единиц, близкое к идеальному.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность резиденту парка высоких технологий РБ СК

Hynix memory solutions Eastern Europe за предоставленное оборудование для проведения экспериментов.

#### Литература

1. Заливако, С. С. Обзор методов активной идентификации цифровых устройств / С. С. Заливако, А. А. Иванюк // Информатика. – 2016. – №3. – С. 38–47.
2. Tehranipoor, M. Counterfeit Integrated Circuits. Detection and Avoidance / M. Tehranipoor, U. Guin, D. Forte. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 269 p.
3. Pappu, R. Physical One-Way Functions: Ph.D. thesis / R. Pappu // MIT. – Boston, USA, 2001.
4. Physical one-way functions / R. Pappu [et al.] // Science. – 2002. – Vol. 297, № 5589. – P. 2026–2030.

УДК 531.383

### ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ

Каликанов А.В., Стрельцов Д.С., Матвеев В.В., Лихошерст В.В., Погорелов М.Г.

ФГБОУ «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследования волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором на подвижном основании, работающем в режиме свободной волны, показана возможность определения углового положения.

**Ключевые слова:** волновой твердотельный гироскоп, свободная волна, металлический резонатор, датчик угла.

#### WAVE SOLID STATE GYRO WITH METAL CAVITY OPERATING IN FREE WAVE MODE

Kalikanov A., Streltsov D. Matveev V. Likhosherst V. Pogorelov M.

Tula State University  
Tula, Russian Federation

**Abstract:** As a result of the studies of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator on a movable base operating in the free wave mode, the possibility of determining the angular position was found.

**Key words:** wave solid-state gyroscope, free wave, metal resonator, angle sensor.

Адрес для переписки: Каликанов А.В., пр. Ленина, 95, Тула 300012, Российская Федерация  
e-mail: kalikanov.aleksei@mail.ru

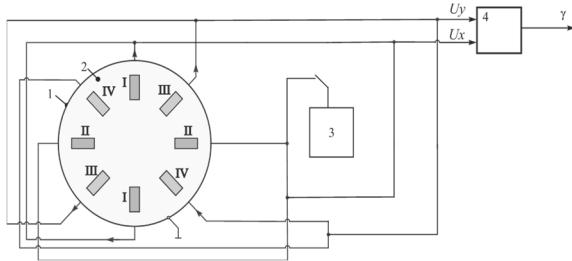
Как известно, существуют две основные схемы построения волнового твердотельного гироскопа (ВТГ): измеритель угла поворота (ВТГ-ИГ) и измеритель угловой скорости вращения (ВТГ-ДУС). В ВТГ-ИГ используется инерционное свойство стоячей волны и оценивается угол поворота основания, на котором установлен гироскоп, относительно положения волны через коэффициент пересчета (коэффициент Брайана). В ВТГ-ДУС реализуется удержание стоячей волны относительно корпуса гироскопа, а вторичная волна, возникающая при вращении основания, подавляется (компенсируется). Сила компенсации содержит информацию об угловой скорости вращения основания [1].

В настоящее время существует необходимость в создании ВТГ-ИГ среднего класса точности для применения в качестве датчика угловых

перемещений для беспилотного летательного аппарата, при этом ВТГ должен измерять не угловую скорость, а угол поворота основания. Для создания ВТГ в режиме датчика угловых перемещений необходимым условием является, чтобы стоячая волна, возбуждаемая в цилиндрической оболочке, не была бы «привязана» к основанию прибора, а существовала в резонаторе «свободно». В этом случае ВТГ можно уподобить маятнику Фуко, позволяющего фиксировать угол поворота основания.

В режиме свободной волны (рис. 1) в начальный промежуток времени с генератора синусоидальных сигналов на диаметрально противоположные пьезоэлементы I–I подается сигнал в виде синусоидального напряжения  $A \sin(\omega t)$ , где  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – частота подачи переменного сигнала, равная (или близкая) к собственной частоте

основной формы колебаний металлического цилиндрического резонатора. В следствие изгибных деформаций дна металлического цилиндрического резонатора возникает изгибающий момент, который вызывает эллиптические деформации на второй форме колебаний, в результате чего возбуждается стоячая волна с четырьмя областями, ориентированными вдоль пары пьезоэлементов I-I и II-II и четырьмя областями, расположенными вдоль пары пьезоэлементов III-III и IV-IV.



1 – резонатор; 2 – дно резонатора с парами пьезоэлементов; 3 – генератор; 4 – демодулятор

Рисунок 1 – ВТГ (режим свободной волны)

Через одну секунду после подачи управляющего сигнала генератор отключается и ВТГ приходит в рабочее состояние. При вращении колеблющегося металлического цилиндрического резонатора вокруг его оси симметрии, обусловленного поворотом на угол подвижного объекта, с постоянной угловой скоростью возникают Кориолисовы силы инерции, привязанные к запаздыванию стоячей волны. Полученный сигнал с первого контура и второго контура, сдвинутый по фазе на минус 90 градусов поступает в демодулятор, где осуществляется демодуляция сигналов и вычисление угла на основе соотношения

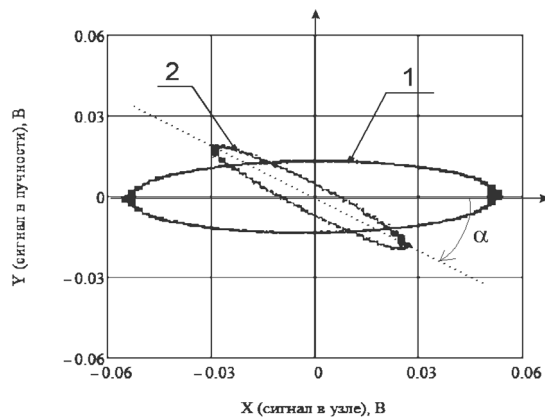
$$\alpha = \frac{1}{2K} = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (1)$$

где  $\alpha$  – вычисляемый угол;  $K$  – коэффициент прецессии волны коэффициент Брайана);  $Y$  – сигнал в узле,  $X$  – сигнал в пучности.

На кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета были проведены исследования на экспериментальном образце ВТГ с металлическим резонатором работающем в режиме «свободной волны» с целью подтверждения возможности вычисления углового положения.

Экспериментальный образец ВТГ с металлическим цилиндрическим резонатором был закреплен на поворотной платформе аттестованного одноосного стенде ACUITAS AG MODEL TES-V\_3-4\_TM оснащенной климатической камерой. После чего была проведена серия экспериментов при вращении основания на фиксированные углы. На рис. 1 приведены траектории, очерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях (сигналы в узле и пучности) – так называемая фигура Лиссажу, которая

имеет форму эллипса в следствие наличия квадратной составляющей.



1 – неподвижное основание;  
2 – основание повернуто на угол 50°

Рисунок 1 – Фигуры Лиссажу в координатах  $X - Y$

Для вычисления текущего угла поворота необходимо найти точки соответствующие максимальной амплитуде в узле (координата  $X$ ) и максимальной амплитуде в пучности (координата  $Y$ ) и выполнить вычисление по формуле (1). При повороте основания на угол 50 градусов, вычислим поворот эллипса, приняв коэффициент Брайана  $K = 0,7$ , получим  $\alpha = 49,565$  градусов. Что подтверждает возможность построения датчика перемещений на базе ВТГ с металлическим резонатором, работающим в режиме свободной волны. Но основная проблема использования ВТГ с металлическим резонатором в режиме «свободной волны» обусловлена низкой добротностью металлической оболочки, которая обычно не превышает 35000 [2]. На кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета в настоящее время ведется активная работа по реализации схмотехнического способа увеличения добротности ВТГ с металлическим резонатором для увеличения времени функционирования в режиме свободной волны.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)».

#### Литература

1. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / Распопов В. Я. [и др.]. – Под ред. В. Я. Распопова. – Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.
2. Lynch, D. D. Coriolis vibratory gyroscope / D. D. Lynch // Coriolis vibratory gyroscope / IEEE standard specification IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros. IEEE std.1431 annex B. 2004. P. 56–66.