

УДК.53.082.7

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-54-58

## Методика измерения углов поворота твердотельных волновых гироскопов с применением принципа частотного разделения

Е. С. Трифонова, аспирант, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе отмечается, что для точного позиционирования объектов в пространстве широко используются устройства, содержащие три и более твердотельных волновых гироскопов (ТВГ). В известных на сегодняшний день подобных устройствах каждый ТВГ использует индивидуальный набор электроники для каждого гироскопического датчика, выполненный в виде индивидуальных сборок печатных плат с монтажом. Безусловно, это сказывается на массогабаритных и надежности показателях приборов. Для улучшения этих показателей предлагается информацию от всех датчиков обрабатывать с помощью одного процессора, используя частотное разделение каналов передачи сигналов на плату обработки. В статье представлена методика измерения углов поворота ТВГ, использующая данный принцип построения системы измерения. На основе физических принципов формирования сигналов на обкладках емкостных датчиков ТВГ получены выражения для формы сигналов, снимаемых с  $i$ -го датчика. Представлена структурная схема формирования синусного и косинусного каналов передачи сигналов с датчиков, спектры которых не содержат высокочастотной несущей. Получены математические выражения и последовательность их обработки в процессоре, которые позволяют вычислить углы поворота каждого ТВГ в определенный момент времени.

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп (ТВГ), система управления, емкостной датчик, измерительная система, методы измерений, частотное разделение.

### Введение

ТВГ относятся к классу кориолисовых вибрационных гироскопов и используются для измерения угла поворота и угловой скорости движущихся объектов, что необходимо для решения задач навигации и управления. Преимуществом ТВГ является их простота в изготовлении, а также оптимальное соотношение точности и габаритов приборов [1].

Одной из особенностей приборов на основе ТВГ является наличие большого количества обслуживающей электроники, что особенно выражено в приборах с тремя и более ТВГ, необ-

ходимыми для точного позиционирования объекта в пространстве. Во многих разработанных многоосных приборах на основе ТВГ каждый из гироскопических датчиков обслуживается своим набором электроники [2–4]. Это приводит к увеличению массогабаритных и снижению надежности показателей.

Для того чтобы уменьшить габариты и повысить надежность, необходима система измерения, позволяющая обрабатывать информацию одновременно со всех ТВГ. Данная система описана в [5] и представлена на рис. 1 в виде блок-схемы.

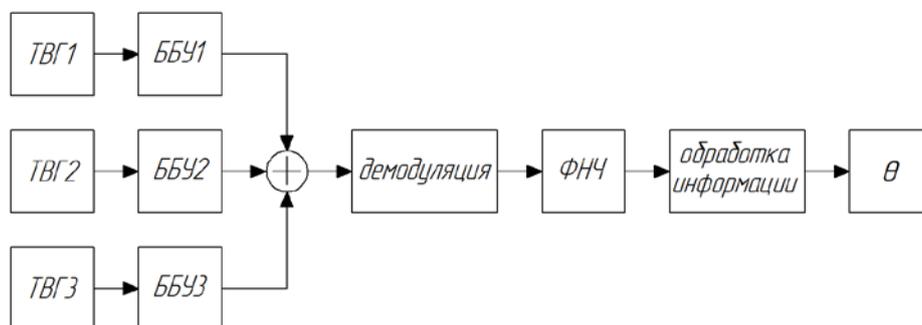


Рис. 1. Блок-схема системы измерения сигналов с ТВГ с применением принципа частотного разделения ( $\theta$  – угол поворота ТВГ)

Целью работы является разработка методики измерения углов поворота каждого из ТВГ, использующей новую структуру системы измере-

ния, в которой были бы представлены необходимые математические операции над сигналами, снимаемыми с датчиков ТВГ, и их последо-

вательность, позволяющие сформировать сигналы задания углов поворота. Такая методика может служить основой создания имитационной модели системы управления какой-либо инерциальной системы навигации.

**Формирование и определение значения угла поворота ТВГ**

Определение значения угла поворота ТВГ производится с помощью емкостных датчиков, в которых обкладки конденсатора образуются нанесенной проводящей поверхностью внутри резонатора и электродами, нанесенными на поверхность основания и отделенными от резонатора зазором.

Определение угла происходит в режиме стоячих волн, задача сохранения которого решается с помощью системы управления. На рис. 2 изображен процесс деформации резонатора во время колебаний по второй форме своих колебаний [6].

Резонатор колеблется на своей резонансной частоте, при этом образуются пучности *A, B, C, D* (рис. 2), с помощью которых определяется ось

колебания и, соответственно, информация об угле поворота ТВГ [7, 8].

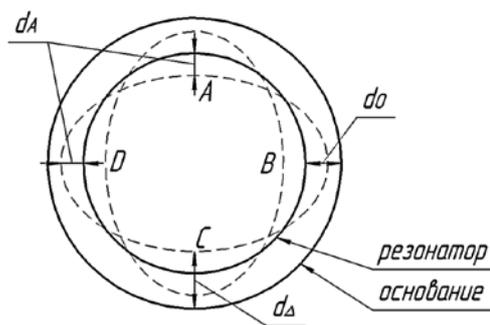


Рис. 2. Деформация резонатора во время колебаний ( $d_0$  – зазор в невозбужденном состоянии,  $d_Δ$  – максимальный зазор в возбужденном состоянии,  $d_A$  – амплитуда колебания резонатора)

Следовательно, выражение для изменения величины зазора зависит от угловой ориентации стоячей волны [9], и тогда зазоры на каждом из датчиков описываются выражениями:

$$C1, C5: d_i = d_0 \pm d_Δ = d_0 + d_A \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t); \tag{1a}$$

$$C2, C6: d_i = d_0 \pm d_Δ = d_0 + d_A \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t); \tag{1б}$$

$$C3, C7: d_i = d_0 \pm d_Δ = d_0 - d_A \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t); \tag{1в}$$

$$C4, C8: d_i = d_0 \pm d_Δ = d_0 - d_A \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t); \tag{1г}$$

где  $d_0$  – зазор в невозбужденном состоянии;  $d_Δ$  – максимальный зазор в возбужденном состоянии;  $d_A$  – амплитуда колебания резонатора;  $\theta$  – угловое положение стоячей волны;  $\omega_p$  – резонансная частота колебания резонатора.

Принимая во внимание, что резонатор изготавливается из кварцевого стекла, амплитуда колебания  $d_A \ll d_0$ .

Тогда емкость каждого из восьми датчиков [10] имеет вид:

$$C_i(t) = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d_i}, \tag{2}$$

где  $\epsilon = 1$  Ф/м – относительная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $S$  – площадь обкладки емкостного датчика.

При подаче на одну из обкладок емкостного датчика (резонатор) высокочастотного (ВЧ) сигнала с частотой  $\omega_n \gg \omega_p$  и амплитудой  $A_n$ , на другой обкладке (основании) появляется сигнал, который определяется выражением:

$$Im_i(t) = \frac{U_n(t)}{Xc_i} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot A_n \cdot \omega_n \cdot \frac{\sin(\omega_n \cdot t)}{d_0 + d_A \cdot \sin(\omega_p \cdot t)}, \tag{3}$$

где  $U_n(t) = A_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t)$  – ВЧ-сигнал, являющийся несущим;  $Xc_i = \frac{1}{\omega_n \cdot C_i(t)}$  – сопротивление емкостного датчика.

Поскольку при уменьшении расстояния между электродами на основании и резонаторе емкость образовавшегося конденсатора увеличивается, а при увеличении – уменьшается, то ВЧ-сигнал, поданный на резонатор, модулируется изменяющейся емкостью датчиков.

Поскольку амплитуда сигналов  $Im_i(t)$  имеет малое значение, то для повышения точности требуется дополнительное усиление сигналов. С учетом этого для измерения используется структурная схема, указанная на рис. 3 [11, 12].

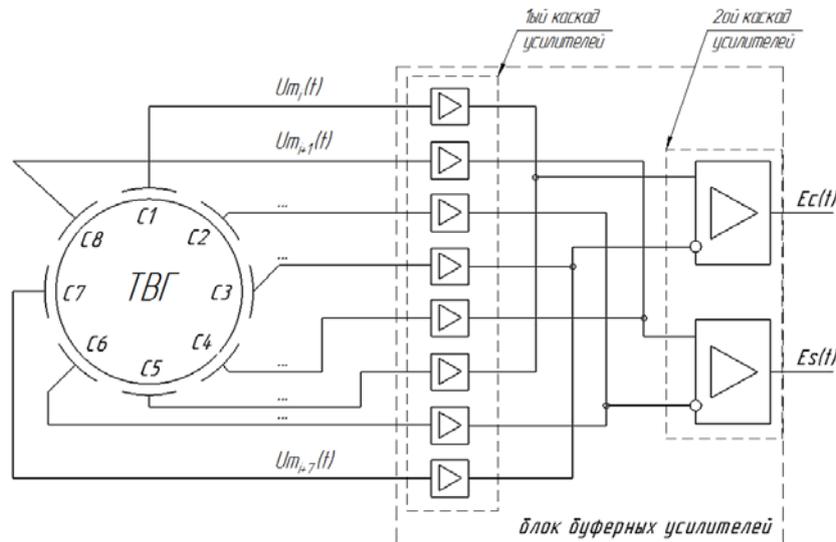


Рис. 3. Структурная схема измерения сигналов с ТВГ

С учетом колебаний резонатора амплитудно-модулированные сигналы на первом каскаде определяются выражениями:

$$C1, C5: Um_i(t) = \frac{\alpha \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0 + d_A \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t)}; \quad (4a)$$

$$C2, C6: Um_i(t) = \frac{\alpha \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0 + d_A \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t)}; \quad (4б)$$

$$C3, C7: Um_i(t) = \frac{\alpha \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0 - d_A \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t)}; \quad (4в)$$

$$C4, C8: Um_i(t) = \frac{\alpha \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0 - d_A \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t)}; \quad (4г)$$

где  $\alpha = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot A_n \cdot \omega_n \cdot K_i$ ;  $K_i$  – коэффициент усиления на первых каскадах.

Для повышения энергетической эффективности передачи сигналов на втором каскаде усилителей используется схема дифференциального усилителя. Сигналы, поступающие с датчиков  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ , образуют так называемый косинусный канал информации  $Ec(t)$ . Сигналы датчиков  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$  образуют синусный канал информации  $Es(t)$  (рис. 3). Таким образом, сигналы  $Ec(t)$  и  $Es(t)$  являются балансно-модулированными сигналами.

Учитывая малое значение амплитуды колебания резонатора  $d_A$ , в формуле сигналов  $Ec(t)$  и  $Es(t)$  можно оставить только линейную часть, тогда сигналы со второго каскада усилителей записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} Ec(t) &= Um_1 + Um_5 - Um_3 - Um_7 = \\ &= \frac{4 \cdot \alpha \cdot d_A \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0^2 - d_A^2 \cdot \cos(2\theta)^2 \cdot \sin(\omega_p \cdot t)^2} \approx \\ &\approx \beta \cdot \cos(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t); \quad (5a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Es(t) &= Um_2 + Um_6 - Um_4 - Um_8 = \\ &= \frac{4 \cdot \alpha \cdot d_A \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t)}{d_0^2 - d_A^2 \cdot \cos(2\theta)^2 \cdot \sin(\omega_p \cdot t)^2} \approx \\ &\approx \beta \cdot \sin(2\theta) \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot t), \quad (5б) \end{aligned}$$

где

$$\beta = 4 \cdot \alpha \cdot d_A / d_0^2 = 4 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot A_n \cdot \omega_n \cdot K_i \cdot d_A / d_0^2.$$

### Математическое описание методики измерения

Рассмотрим методику определения угла поворота ТВГ  $\theta$  с применением принципа частотного разделения. Согласно рис. 1, сигналы с трех ТВГ складываются и имеют вид:

$$Ec_\Sigma(t) = Ec_1(t) + Ec_2(t) + Ec_3(t); \quad (6a)$$

$$Es_\Sigma(t) = Es_1(t) + Es_2(t) + Es_3(t), \quad (6б)$$

где  $Ec_1(t)$ ,  $Es_1(t)$ ,  $Ec_2(t)$ ,  $Es_2(t)$ ,  $Ec_3(t)$ ,  $Es_3(t)$  – сигналы с первого, второго и третьего ТВГ соответственно.

При этом частота  $\omega_{ni}$  несущих ВЧ-сигналов, подаваемых на каждый из трех резонаторов, должна отличаться для осуществления частотного разделения [13], то есть должно выполняться следующее условие:

$$\omega_{n1} \neq \omega_{n2} \neq \omega_{n3}. \quad (7)$$

Известно, что любой полосовой сигнал можно записать с помощью его синфазной и квадратурной компонент. Тогда сигналы примут вид:

$$E_{c_{\Sigma}}(t) = I_{c_1}(t) \cdot \cos(\omega_{n1} \cdot t) + I_{c_2}(t) \cdot \cos(\omega_{n2} \cdot t) + I_{c_3}(t) \cdot \cos(\omega_{n3} \cdot t) - Q_{c_1}(t) \cdot \sin(\omega_{n1} \cdot t) - Q_{c_2}(t) \cdot \sin(\omega_{n2} \cdot t) - Q_{c_3}(t) \cdot \sin(\omega_{n3} \cdot t); \quad (8a)$$

$$E_{s_{\Sigma}}(t) = I_{s_1}(t) \cdot \cos(\omega_{n1} \cdot t) + I_{s_2}(t) \cdot \cos(\omega_{n2} \cdot t) + I_{s_3}(t) \cdot \cos(\omega_{n3} \cdot t) - Q_{s_1}(t) \cdot \sin(\omega_{n1} \cdot t) - Q_{s_2}(t) \cdot \sin(\omega_{n2} \cdot t) - Q_{s_3}(t) \cdot \sin(\omega_{n3} \cdot t), \quad (8б)$$

где  $\omega_{ni}$  – частота несущих сигналов;  $I_{ci}(t)$  – синфазные составляющие косинусных каналов;  $Q_{ci}(t)$  – квадратурные составляющие косинусных каналов;  $I_{si}(t)$  – синфазные составляющие синусных каналов;  $Q_{si}(t)$  – квадратурные составляющие синусных каналов.

Для выделения синфазной и квадратурной компонент огибающих сигналов  $E_{ci}(t)$  и  $E_{si}(t)$  производится квадратурная демодуляция для каждого слагаемого формулы (8). Также для подавления слагаемых с другой частотой несущего сигнала и слагаемых с удвоенными частотами необходимо использовать ФНЧ с частотой среза  $\omega_{cpi} \approx 1,1 \cdot \omega_{ni}$ . После данных операций амплитуды огибающих сигналов описываются следующим образом:

$$a_{ci}(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{I_{ci}(t) + Q_{ci}(t)} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \cos(2\theta_i) \cdot \sin(\omega_p \cdot t); \quad (9a)$$

$$a_{si}(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{I_{si}(t) + Q_{si}(t)} = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \sin(2\theta_i) \cdot \sin(\omega_p \cdot t). \quad (9б)$$

Тогда углы поворота ТВГ определяются выражением:

$$\theta_i = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{a_{si}(t)}{a_{ci}(t)}. \quad (10)$$

### Выводы

В данной работе была представлена методика измерения углов поворота ТВГ, использующая частотное разделение, в виде последовательности вычислений. Были получены выражения, которые описывают принцип работы данной методики. Также были выведены выражения, которые описывают формирование и определение значения угла поворота ТВГ.

На основании описанной методики измерения предполагается разработать имитационную

модель, необходимую для дальнейшего изучения работы системы, которая будет отражать основные параметры данной системы измерения. Это является одной из следующих задач исследования.

### Библиографические ссылки

1. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets // Advances in the Astronautical Sciences. 2009. No. 134. Pp. 1157-1178.
2. Girard O., Caron J.M., Berthier P. HRG technology: a promising gyrometer space equipment / O. Girard // In Proceedings of the 6th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems. Loutraki, Greece, 17–20 October 2005. Том 606. URL: <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2006ESASP.606E.14G> (дата обращения: 14.11.2020).
3. Delhayе F. HRG by Safran - The game-changing technology / F. Delhayе // In Proceedings of the IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL) 2018. Moltrasio, Italy, 26–29 March 2018. С. 1–4. DOI: 10.1109/ISISS.2018.8358163
4. Rosellini L., Caron J.M. REGYS 20: A promising HRG-based IMU for space application / L. Rosellini // In Proceedings of the 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems. Tralee, County Kerry, Ireland, 2008. URL: <https://ru.scribd.com/document/223246595/03-Rosellini> (дата обращения: 14.11.2020).
5. Трифонова Е. С., Малых Д. В. Система измерения сигналов емкостных датчиков твердотельного волнового гироскопа с применением принципа частотного разделения каналов // Перспективы науки. 2020. № 7 (130). С. 47–53.
6. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография. М. : Радиотехника, 2014. 176 с.
7. Шишаков К. В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция : монография. Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. 264 с.
8. Мельников Р. В., Щенятский А. В., Трутнев Г. А. Подходы к расчету технических характеристик твердотельного волнового гироскопа // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 1. С. 7–11.
9. Журавлев В. Ф. Двумерный осциллятор Ван дер Поля с внешним управлением // Нелинейная динамика. 2016. № 2. С. 211–222. DOI: 10/20537/nd1602004.
10. Датчики: Справочное пособие / В. М. Шарпов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой и др. М. : Техносфера, 2012. 624 с.
11. Измерительно-вычислительный комплекс «Твердотельный волновой гироскоп» / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. № 3. С. 62–72. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.
12. Трутнев Г. А., Перевозчиков К. К., Назаров С. Б. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2020.

№ 1 (130). С. 50-63. DOI: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63.

13. Першин В. Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2013. 614 с.

### References

1. Rozelle D. (2009). The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets. *Advances in the Astronautical Sciences*, no. 134, pp. 1157-1178.

2. Girard O., Caron J.M., Berthier P. HRG Technology: A Promising Gyrometer Space Equipment. In *Proceedings of the 6th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems, Loutraki, Greece, 17–20 October 2005*, vol. 606. Available at <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2006ESASP.606E.14G> (accessed November 14, 2020).

3. Delhaye, F. HRG by SAFRAN: The Game-Changing Technology. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL) 2018, Moltrasio, Italy, 26–29 March 2018*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISISS.2018.8358163

4. Rosellini L., Caron J.M. (2008). REGYS 20: A promising HRG-based IMU for space application. In *Proceedings of the 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, Tralee, County Kerry, Ireland, 2-5 June 2008*. Available at <https://ru.scribd.com/document/223246595/03-Rosellini> (accessed November 14, 2020).

5. Trifonova E.S., Malykh D.V. [Signal measurement system for capacitive sensors of hemispherical resonator gyroscope using the frequency-division multiplexing]. *Перспективы науки*. 2020. No. 7, pp. 47-53 (in Russ.).

6. Lunin B.S., Marveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoj tverdotel'nyj giroskop. Teoriya I tekhnologiya. Monografiya* [Hemispherical resonator gyroscope. Theory and Technology. Monograph]. Moscow: Radiotekhnika publ., 2014. (in Russ.).

7. Shishakov K.V. (2018). *Tverdotel'nye volnovye giroskopy: volnovye processy, upravlenie, sistemnaya integraciya: monografiya* [Hemispherical resonator gyroscopes: wave process, control, system integration: monograph]. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova (in Russ.).

8. Melnikov R.V., Shchenyatskiy A.V., Trutnev G.A. *Podhodi k raschetu tekhnicheskikh karakteristik tverdotel'nogo volnovogo giroskopa* [Approaches to calculation of technical characteristics solid-state wave gyroscope]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2018. Vol. 21, no. 1, pp. 7-11 (in Russ.).

9. Zhuravlev V.F. [Van der Pol's controlled 2D oscillator]. *Nelinejnaya dinamika. Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2016. Vol. 12, no. 2, pp. 211-222 (in Russ.). DOI: 10/20537/nd1602004

10. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Koshevoj H.D., et al. (2012). *Datchiki: Spravochnoe Posobie* [Sensors: Reference Book]. Moscow: Technosfera. (in Russ.).

11. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K., Shchenyatskiy A.V. [Measurement calculation system «Solid-state resonator gyroscope»]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2017. Vol. 15, no. 3, pp. 62-72 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

12. Trutnev G.A., Perevozchikov K.K., Nazarov S.B. [Sensing system and methods for measuring oscillations in the resonator of a hemispherical resonator gyroscope]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya Priborostroenie*. 2020. No. 1, pp. 50-63 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63

13. Pershin V.T. (2013). *Formirovanie I generirovanie signalov v cifrovoi radiosvyazi: uchebnoe posobie* [Formation and generation of signals in digital radio communication: study guide]. Moscow: INFRA-M publ. (in Russ.).

\*\*\*

### Method for Measuring the Rotation Angles of Hemispherical Resonator Gyroscope Using the Frequency Division

E. S. Trifonova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

P. A. Ushakov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper notes that devices containing three or more hemispherical resonator gyroscopes (HRG) are widely used for accurate positioning of objects in space. In such devices known to date, each HRG uses an individual set of electronics for each gyroscopic sensor, made in the form of individual assemblies of printed circuit boards with surface mounting. Of course, this affects the weight and size and reliability of devices. To improve these indicators, it is proposed to process information from all sensors by means of a single processor using frequency division of signal transmission channels on the processing board. The paper presents a method for measuring the angles of rotation of HRG, using this principle of building a measurement system. Based on the physical principles of signal generation on the plates of capacitive HRG sensors, expressions are obtained for the shape of signals taken from the  $i$ -th sensor. A block diagram of the formation of sine and cosine channels for transmitting signals from sensors whose spectra do not contain a high-frequency carrier is presented. Mathematical expressions and the sequence of their processing in the processor are obtained, which allow calculating the rotation angles of each HRG at a certain time.

**Keywords:** hemispherical resonator gyroscope (HRG), control system, capacitive sensor, measuring system, method of measuring, frequency division.

Получено: 15.12.2020