

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.587.72

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-4-10

Влияние конструктивных параметров тороидального резонатора ТВГ на частоту второй моды колебаний

И. Д. Измestьев, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Данная статья относится к изучению конструкции чувствительного элемента ТВГ, выполненного в виде тора. В статье рассмотрены наиболее распространенные формы резонаторов твердотельных волновых гироскопов. Определены выгодные особенности тороидальной формы по отношению к классическим чувствительным элементам, изготовленным методами токарной обработки. Показана необходимость перехода к производству резонаторов мини-ТВГ путем выдувания кварцевого стекла, так как при этой технологии исключаются вибрации заготовки и повышается предельно достижимая точность. На основе обобщения информации от зарубежных исследователей представлена технология производства тороидальных мини-резонаторов методом выдувания. Подняты вопросы о технологии производства, требующие дополнительного изучения, с целью повышения тактико-технических характеристик мини-ТВГ, с резонатором тороидальной формы. С использованием метода конечных элементов установлена зависимость между частотой второй моды собственных колебаний тороидального резонатора и параметрами, определяющими его форму. Диаметр исследуемого чувствительного элемента варьируется от 1,5 до 10 мм. Высота принимает значения от 0,33 до 3,3 мм. Выявлена обратно пропорциональная зависимость частоты от диаметра основания тороидального резонатора. Составлено уравнение регрессии. Исследование второй моды колебаний, которая является рабочей, проведено с целью поиска оптимального соотношения размеров тороидального чувствительного элемента. Под оптимальной понимается такая форма и размеры резонатора, которые обеспечат необходимую механическую прочность, дадут минимальную частоту рабочих колебаний с максимальным относительным перемещением кромки чувствительного элемента. Общая цель работы: уменьшение массогабаритов ТВГ за счет использования тороидального резонатора и термомеханического способа его получения при обеспечении высокой точности гироскопа.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, метод конечных элементов, тороидальный чувствительный элемент.

Введение

Твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) являются перспективным направлением развития гироскопических датчиков [1]. В ТВГ имеется жестко зафиксированный чувствительный элемент (резонатор), в котором электростатическими силами возбуждается стоячая волна. Скорость вращения определяется по прецессии

этой волны под действием сил Кориолиса (эффект Брайана) [2].

Создание миниатюрных и точных гироскопов – актуальная задача, которая рассматривается многими исследователями [3–7]. Данная статья относится к изучению конструкции уменьшенного чувствительного элемента ТВГ, выполненного в виде тора (рис. 1, г).

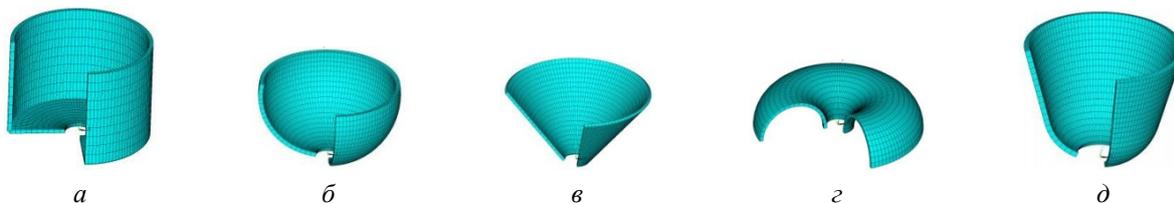


Рис. 1. Возможные формы чувствительного элемента ТВГ [8]: а – цилиндрический, б – полусферический, в – конический, г – тороидальный, д – колоколообразный [9]

Fig. 1. Possible shapes of the TVG sensing element [8]: а) cylindrical, б) hemispherical, в) conical, г) toroidal, д) conical [9].

Тороидальная форма, как показано в [10], выгодно отличается более высокой технологичностью производства. В отличие от полусферических [11], стержневых [12] и цилиндрических [13] резонаторов, которые изготавливают точением, тороидальные изготавливаются методом выдувания [14]. При таком методе производства исключаются трудности, связанные с подводом режущего инструмента, отсутствуют вибрации, ухудшающие поверхность резонатора [15].

Системы навигации включают в свой состав не только твердотельные волновые гироскопы, но и электронное оборудование, программное обеспечение, питание и другие компоненты [16]. Высокие рабочие частоты ТВГ требуют применения больших вычислительных мощностей, что не всегда возможно достичь при малых габаритных размерах изделия. Следовательно, установление зависимости ТТХ ТВГ от геометрических характеристик резонатора,

а также закономерности изменения частот и амплитуд от существующих допусков на изготовление являются важной научной и практической задачей.

Постановка задачи численного эксперимента расчета частот

На начальном этапе стояла задача определения связи между геометрией чувствительного элемента и частотой колебаний второй моды.

Анализ существующей литературы [17] показал, что частота и амплитуда тороидального резонатора зависят от внешнего и внутреннего диаметров тора, толщины стенки и высоты резонатора. С точки зрения материала наиболее эффективным является кварцевое стекло в силу большой изотропности свойств. Для исследования собственных частот второй моды колебаний для резонаторов разных размеров применили ПО Ansys (рис. 2), в основе которого лежит метод конечных элементов [18].

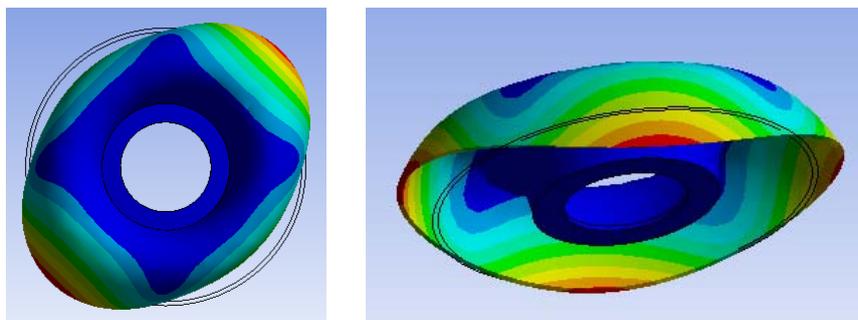


Рис. 2. Вторая мода колебаний тороидального резонатора. Результат моделирования конечных элементов ПО Ansys (номер лицензии: ANSYS16.1 №607 281)

Fig. 2. The second mode of oscillation of the toroidal resonator. The result of finite element modeling BY Ansys (License number: ANSYS 16.1 №607 281)

Для выбранного предмета исследования разработана параметрическая модель тороидально-чувствительного элемента (рис. 3). Диаметр основания резонатора d определяет общий размер чувствительного элемента.

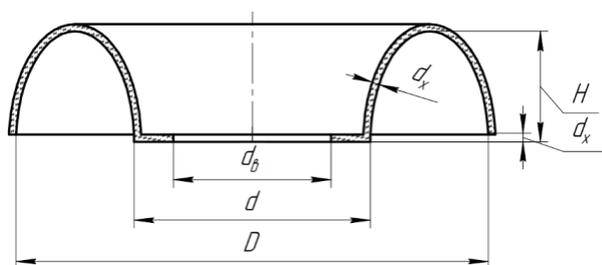


Рис. 3. Схема тороидального резонатора

Fig. 3. Sketch of a toroidal resonator

Границы параметров модели указаны в табл. 1. Диаметр основания больше 5 мм не исследуется, так как противоречит требованию миниатюризации. Диаметр менее 2 не исследуется по причине больших собственных частот – более 100 кГц по результатам предварительных исследований (рис. 4). Для исключения влияния масштабного фактора все геометрические параметры отнесены к диаметру основания d :

$$D = K_d \cdot d; H = K_h \cdot d; dx = K_x \cdot d;$$

где K_d – коэффициент диаметра, K_h – коэффициент высоты, K_x – коэффициент толщины.

Для уменьшения числа расчетов и определения наиболее эффективных границ факторов, влияющих на ТТХ ТВГ, учли полученные ранее отношения K_d , K_h и K_x , отраженные в результатах экспериментов авторов А. М. Шкель и JintangShang [19–21].

Таблица 1. Границы факторов, определяющих форму резонатора

Table 1. Boundaries of factors determining the shape of the resonator

№	Наименование	Мин. значение	Макс. значение
1	d	2 мм	5 мм
2	K_d	1,5	2,5
3	K_h	0,33	0,66
4	K_x	0,02	0,05

В качестве материала резонатора использовано отечественное кварцевое стекло КУ1 [22] (табл. 2).

Таблица 2. Параметры моделирования стекла КУ1

Table 2. Parameters of glass modeling KU1

№	Наименование	Значение
1	Плотность	2210 кг/м ³
2	Модуль Юнга	$7,36 \cdot 10^{10}$ Н/м ²
3	Коэффициент Пуассона	0,17
4	Предел прочности	39 МПа
5	Коэффициент внутреннего трения	10^{-4}
6	Температура	22 °С

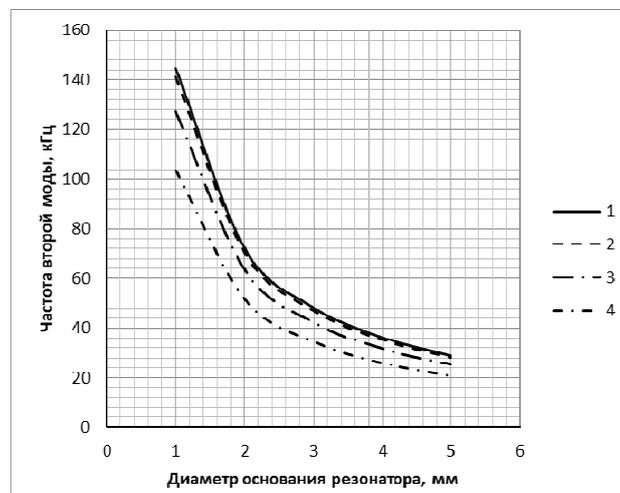


Рис. 4. Результаты расчета собственных частот тороидального резонатора из кварцевого стекла КУ1: 1 – $K_d=1,5$ $K_h=0,33$ $K_x=0,02$; 2 – $K_d=1,5$ $K_h=0,66$ $K_x=0,05$; 3 – $K_d=2$ $K_h=0,33$ $K_x=0,05$; 4 – $K_d=1,75$ $K_h=0,5$ $K_x=0,03$

Fig. 4. Results of calculation of natural frequencies of a toroidal resonator made of quartz glass KU1: 1 – $K_d=1,5$ $K_h=0,33$ $K_x=0,02$; 2 – $K_d=1,5$ $K_h=0,66$ $K_x=0,05$; 3 – $K_d=2$ $K_h=0,33$ $K_x=0,05$; 4 – $K_d=1,75$ $K_h=0,5$ $K_x=0,03$

Анализ результатов численного эксперимента расчета частот

Проведенное исследование позволило получить эмпирическую зависимость частоты от геометрии тороидального резонатора (1) для выбранного отечественного материала. Функция (1) получена в результате многофакторного эксперимента. Малозначимые коэффициенты были исключены. Доверительный интервал 95 %, в диапазоне варьирования величин, указанном в табл. 1, равняется

$$F = \frac{649 + 85K_d^2 - 479K_d - 416K_h + 6625K_x}{d} + \frac{199K_dK_h - 1721K_dK_x - 3048K_hK_x}{d}, \quad (1)$$

где F – частота второй моды колебаний в кГц.

Поверхности отклика, получаемые для уравнения регрессии (1), представлены на рис. 5.

С их помощью можно определить влияние формы резонатора на частоту второй моды колебания.

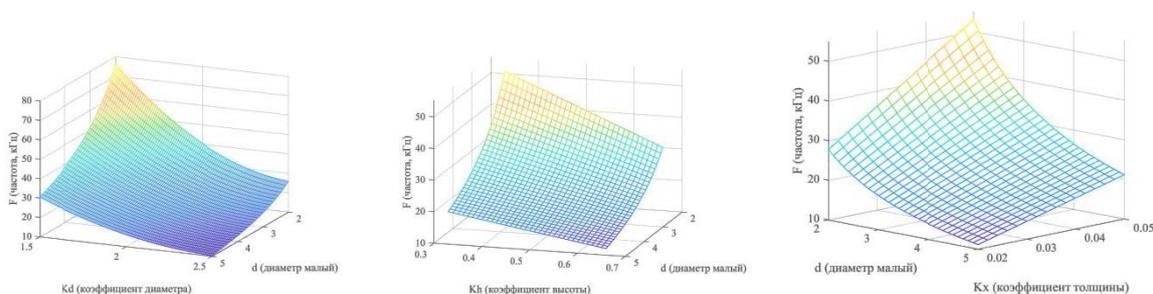


Рис. 5. Поверхность, создаваемая выражением (1)

Fig. 5. The surface created by expression (1)

Расчеты на прочность резонаторов из стекла КУ1 при равномерных линейных ускорениях 100g показали, что в границах исследования резонаторы имеют достаточный коэффициент запаса. Однако чувствительные элементы с $K_h = 0,5-0,6$ и $K_x = 0,04-0,05$ наиболее равномерно воспринимают внешнюю нагрузку. Величина перемещения наружной кромки резонатора (НКР) под действием перегрузок на два-три порядка меньше рабочей амплитуды колебаний НКР, следовательно, защитный зазор между электродами управления и резонатором не нужен.

Минимизация габаритов чувствительного элемента приводит к необходимости уменьшения размеров электродов, что необходимо для размещения последних в корпусе ТВГ с учетом отсутствия взаимодействия между соседними проводниками. Уменьшение этих размеров требует увеличения напряжения между электродом и резонатором для сохранения управляемости ТВГ.

Известно, что сила, вызывающая деформацию ЧЭ [23], определяется зависимостью:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 S, \quad (2)$$

где S – площадь электрода; E – напряженность электрического поля в зазоре; ϵ – электрические постоянные; $\epsilon_0 = 8,85e - 12$. Так как в корпусе ТВГ создают вакуум, для исключения потерь на трение о воздух, то коэффициент ϵ равен 1.

На рис. 6 показана зависимость перемещений НКР в зависимости от диаметра основания резонатора. Параметры исследованного резонатора: $K_d = 2$; $K_h = 0,5$; $K_x = 0,03$. Напряжение при исследовании зависимости от диаметра и зазора: 600 В. В результате исследования влияния управляющего напряжения и величины зазора на напряженно-деформированное состояние ЧЭ определено, что для обеспечения требуемого уровня сигнала ТВГ с тороидальным мини-резонатором из кварцевого стекла КУ1 необходимо обеспечить зазор чувствительного элемента не более 5 мкм и напряжение не менее 400 В.

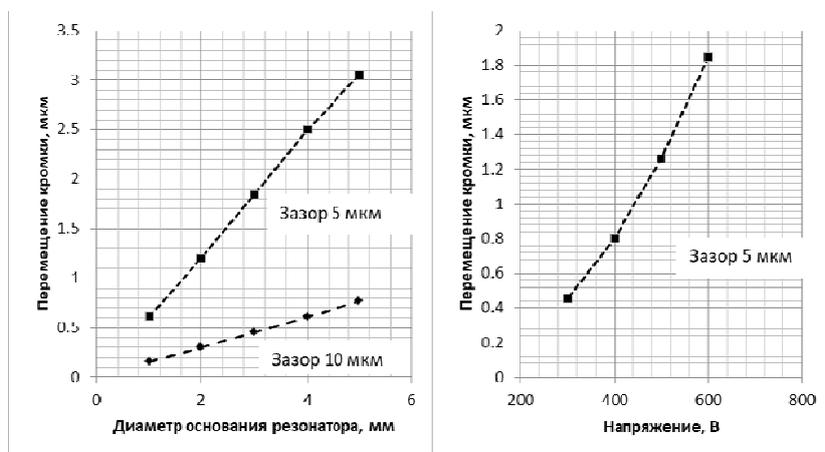


Рис. 6. Величина перемещения НКР резонатора ($K_d = 2$; $K_h = 0,5$; $K_x = 0,03$) под действием электростатической силы в зависимости от диаметра (слева); в зависимости от напряжения (справа)

Fig. 6. The magnitude of the displacement of the resonator ($K_d = 2$; $K_h = 0.5$; $K_x = 0.03$) under the action of an electrostatic force, depending on the diameter (left); depending on the voltage (right)

Заключение

В статье рассмотрены наиболее распространенные формы резонаторов, определены выгодные особенности чувствительных элементов тороидальной формы.

На основе проведенных расчетов дана рекомендация обеспечить зазор, близкий к 5 мкм, и напряжение порядка 400 В, чтобы обеспечить управляемость ТВГ.

На основе результатов численного моделирования МКЭ установлена зависимость между соотношениями конструктивных параметров резонатора и частотой второй моды собственных колебаний. Выявлена обратно пропорциональная зависимость частоты от диаметра основания тороидального резонатора. Составлено уравнение регрессии.

Анализ уравнения показывает, что определяющее влияние на частоту второй моды собственных колебаний резонатора оказывает диаметр основания резонатора. Следующими по значимости являются коэффициенты диаметра и толщины тороидального элемента. Изменение высоты резонатора в меньшей степени влияет на собственную частоту резонатора, но является существенным. Совместное влияние факторов на исследуемые параметры имеется и определяет нелинейную зависимость. Следовательно, при разработке конструкции резонатора требуется учитывать все приведенные в исследовании факторы, определяющие размеры и форму. Особого внимания заслуживает изучение влияния качества поверхности и отклонение размеров чувствительного элемента на реальные характеристики прибора.

Библиографические ссылки

1. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / И. А. Волчихин, А. И. Волчихин, Д. М. Малютин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 59–78.
2. Bryan G. H. On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell // Proc. of Cambridge Phil. Soc. Nov. 1890. Vol. VII. No. III. Pp. 101-111.
3. Asadian M.H., Wang Y., & Shkel A.M. (2019). Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. Journal of Microelectromechanical Systems, 28, 954-964. DOI:10.1109/JMEMS.2019.2945713.
4. Farrokh Ayazi, Hsiao H. Chen, FatihKocer, Guohong He. A High Aspect-Ratio Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope Jan. 2000.
5. Guohong He, K. Najafi. Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on // A single-crystal silicon vibrating ring gyroscope. 2002.
6. Lu K., Xi X., Li W., Shi Y., Hou Z., Zhuo M., Wu X., Wu Y., & Xiao D. (2019). Research on precise mechanical trimming of a micro shell resonator with T-shape masses using femtosecond laser ablation. Sensors and Actuators A: Physical. DOI:10.1016/J.SNA.2019.03.025
7. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов / М. А. Басараб, Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, А. В. Фомичев, Е. А. Чуманкин, А. В. Юрин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. Vol. 4. Pp. 80-96.
8. Вахлярский Д. С. Оптимизация формы резонатора волнового твердотельного гироскопа по критерию минимума расщепления собственных частот : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019.
9. Su Zhong, Fu Mengyin, Li Qing, Liu Ning, Liu Hong. Research on Bell-Shaped Vibratory Angular Rate Gyro's Character of Resonator // Sensors. 2013. No. 13. Pp. 4724-4741
10. Li W., Xi X., Lu K., Shi Y., Hou Z., Wu Y., Wu X., & Xiao D. (2019). A Novel High Transduction Efficiency Micro Shell Resonator Gyroscope With 16 T-Shape Masses Using Out-of-Plane Electrodes. IEEE Sensors Journal, 19, 4820-4828. DOI:10.1109/JSEN.2019.2903199.
11. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets // Advances in the Astronautical Sciences. Jan. 2009. No. 134. Pp. 1157-1178.
12. Котельников М. А., Щенятский А. В. Влияние материалов на технические характеристики чувствительных элементов навигационных приборов // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2018. № 1 (1). С. 71–77.
13. Valeri Chikovani, I.M. Okon. Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION // A set of high accuracy low cost metallic resonator CVG. 2008.
14. Senkal Doruk, Ahamed Mohammed, Askari Sina, Shkel A. M. (2014). 1 MILLION Q-FACTOR DEMONSTRATED ON MICRO-GLASSBLOWN FUSED SILICA WINEGLASS RESONATORS WITH OUT-OF-PLANE ELECTROSTATIC TRANSDUCTION. 68-71. 10.31438/trf.hh2014.18.
15. Башиарова А. А., Котельников М. А., Щенятский А. В. Технологические подходы к обработке деталей из кварцевого стекла // Вестник современных технологий. 2020. № 4 (20). С. 19–23.
16. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М. : Радиотехника, 2014. 176 с.
17. Вахлярский Д. С. Оптимизация формы резонатора волнового твердотельного гироскопа по критерию минимума расщепления собственных частот : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.
18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
19. Asadian M.H., Wang D., Wang Y., & Shkel A.M. (2020). 3D Dual-Shell Micro-Resonators for Harsh Environments. 2020 IEEE/ION Position, Location and

Navigation Symposium (PLANS), 1467-1471. DOI:10.1109/PLANS46316.2020.9109972.

20. Asadian M.H., & Shkel A.M. (2019). Fused Quartz Dual Shell Resonator. 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 1-4. DOI:10.1109/ISISS.2019.8739671.

21. Zhang J., Shang J., Luo B., & Su Z. (2019). Micro Fountain-Like Resonators. 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 890-895. DOI:10.1109/ECTC.2019.00139.

22. ГОСТ 15130–86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия (с изменениями N 1, 2). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023786>.

23. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. М. : Наука, 1985.

References

1. Volchikhin I.A., Volchikhin A.I., Malyutin D.M. [Wave solid-state gyroscopes (analytical review)]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017. No. 9-2. Pp. 59-78 (in Russ.).

2. Bryan G. H. On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell // Proc. of Cambridge Phil. Soc. Nov. 1890. Vol. VII. No. III. Pp. 101-111.

3. Asadian, M.H., Wang, Y., & Shkel, A.M. (2019). Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. Journal of Microelectromechanical Systems, 28, 954-964. DOI:10.1109/JMEMS.2019.2945713.

4. Farrokh Ayazi, Hsiao H. Chen, FatihKocer, Guohong He. A High Aspect-Ratio Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope Jan. 2000.

5. Guohong He, K. Najafi. Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on. In A single-crystal silicon vibrating ring gyroscope. 2002.

6. Lu, K., Xi, X., Li, W., Shi, Y., Hou, Z., Zhuo, M., Wu, X., Wu, Y., & Xiao, D. (2019). Research on precise mechanical trimming of a micro shell resonator with T-shape masses using femtosecond laser ablation. Sensors and Actuators A: Physical. DOI:10.1016/J.SNA.2019.03.025.

7. Basarab M.A., Lunin B.S., Matveev V.A., Fomichev A.V., Chumankin E.A., Yurin A.V. [Miniature wave solid-state gyroscopes for small spacecraft]. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana*. 2014. Vol. 4. Pp. 80-96 (in Russ.).

8. Vakhlyarsky D.S. *Optimizatsiya formy rezonatora volnovogo tverdotel'nogo giroskopa po kriteriyu minimuma rasshchepeniya sobstvennykh chastot* [Optimization of the resonator shape of a wave solid-state gyroscope by the criterion of the minimum splitting of natural frequencies]: PhD thesis. Moscow, Bauman State Technical University, 2019 (in Russ.).

9. Su Zhong, Fu Mengyin, Li Qing, Liu Ning, Liu Hong. Research on Bell-Shaped Vibratory Angular Rate Gyro's Character of Resonator. In Sensors. 2013. No. 13. Pp. 4724-4741.

10. Li, W., Xi, X., Lu, K., Shi, Y., Hou, Z., Wu, Y., Wu, X., & Xiao, D. (2019). A Novel High Transduc-

tion Efficiency Micro Shell Resonator Gyroscope With 16 T-Shape Masses Using Out-of-Plane Electrodes. IEEE Sensors Journal, 19, 4820-4828. DOI:10.1109/JSEN.2019.2903199.

11. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets. In Advances in the Astronautical Sciences. Jan. 2009. No. 134. Pp. 1157-1178.

12. Kotelnikov M.A., Schenyatsky A.V. [The influence of materials on the technical characteristics of sensitive elements of navigation devices]. *Avtomatizatsiya I izmereniya v mashino- priborostroenii*. 2018. No. 1. Pp. 71-77 (in Russ.).

13. Valeri Chikovani, I.M. Okon. Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION // A set of high accuracy low cost metallic resonator CVG. 2008.

14. SenkalDoruk, Ahamed Mohammed, AskariSina, Shkel A.M. (2014). 1 MILLION Q-FACTOR DEMONSTRATED ON MICRO-GLASSBLOWN FUSED SILICA WINEGLASS RESONATORS WITH OUT-OF-PLANE ELECTROSTATIC TRANSDUCTION. 68-71. 10.31438/trf.hh2014.18.

15. Basharova A.A., Kotelnikov M.A., Schenyatsky A.V. [Technological approaches to the processing of quartz glass parts]. *Vestnik sovremennykh tekhnologij*. 2020. No. 4. Pp. 19-23 (in Russ.).

16. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop. Teoriya i tekhnologiya* [Wave solid-state gyroscope. Theory and technology]. Moscow: Radio Engineering, 2014. 176 p. (in Russ.).

17. Vakhlyarsky D.S. *Optimizatsiya formy rezonatora volnovogo tverdotel'nogo giroskopa po kriteriyu minimuma rasshchepeniya sobstvennykh chastot* [Optimization of the resonator shape of a wave solid-state gyroscope by the criterion of the minimum splitting of natural frequencies]: PhD thesis. Moscow, Bauman State Technical University, 2019 (in Russ.).

18. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p. (in Russ.).

19. Asadian M.H., Wang D., Wang Y., & Shkel A.M. (2020). 3D Dual-Shell Micro-Resonators for Harsh Environments. 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 1467-1471. DOI:10.1109/PLANS46316.2020.9109972.

20. Asadian M.H., & Shkel A.M. (2019). Fused Quartz Dual Shell Resonator. 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 1-4. DOI:10.1109/ISISS.2019.8739671.

21. Zhang, J., Shang, J., Luo, B., & Su, Z. (2019). Micro Fountain-Like Resonators. 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 890-895. DOI:10.1109/ECTC.2019.00139.

22. *GOST 15130–86 Steklo kvartsevoe opticheskoe. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniyami N 1, 2)* [GOST 15130-86 Steklo kvarcevoe opticheskoe. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniyami N 1, 2)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200023786> (in Russ.).

23. Zhuravlev V. F., Klimov D. M. *Volnovoy tverdotel'nyy giroskop* [Wave solid state gyroscope]. Moscow: Nauka Publ., 1985 (in Russ.).

Investigation of the Solid-State Wave Gyroscope Toroidal Resonator Design Parameters Effect on the Second Mode Frequency

I. D. Izmestyev, Master's Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

A. V. Schenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

This article relates to the study of the solid-state wave gyroscope sensitive element design, made as a torus. The article discusses the most common shapes of solid-state wave gyroscope resonators. The advantageous features of the toroidal shape are determined with respect to the classical sensitive elements manufactured by turning methods. The necessity of production transition into mini-SSWG resonators by blowing quartz glass is shown, since the technology eliminates vibrations of the workpiece, and increases maximum achievable accuracy. Based on the generalization of information from foreign researchers, the technology of toroidal mini-resonators production by blowing is presented. Questions are raised about the production technology that requires additional study in order to improve the tactical and technical characteristics of the mini-SSWG, with a toroidal resonator. Using the finite element method, the relation between frequency of the second mode of toroidal resonator natural oscillations and parameters determining its shape is established. The test sensor diameter varies from 1.5 mm to 10 mm. The height takes values from 0.33 mm to 3.3 mm. An inversely proportional relation of the frequency and the diameter of the toroidal resonator base is revealed. A regression equation has been compiled. The study of the second oscillation mode, which is a working one, was carried out in order to find the optimal size ratio of the toroidal sensing element. Optimal is understood as such a shape and dimensions of a resonator that provides the required mechanical strength and gives minimum operating vibration frequency, with maximum relative displacement of the sensing element edge. The general purpose of the work is to reduce the mass and dimensions of the SSWG by using toroidal resonator and thermomechanical method of its obtaining while ensuring high accuracy of the gyroscope.

Keywords: solid-state wave gyroscope (SSWG), finite element method, toroidal sensing element.

Получено: 25.10.22

Образец цитирования

Измestьев И. Д., Щенятский А. В. Влияние конструктивных параметров тороидального резонатора ТВГ на частоту второй моды колебаний // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-4-10.

For Citation

Izmestyev I.D., Schenyatsky A.V. [Investigation of the solid-state wave gyroscope toroidal resonator design parameters effect on the second mode frequency]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 4-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-4-10.