

УДК 681.2; 681.51

Р.А. Денисов<sup>1</sup>, В.И. Обухов<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА НА ЕГО МАСШТАБНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ**ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»<sup>1</sup>,  
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Предмет, тема, цель работы:** проведение анализа принципов работы твердотельных волновых гироскопов (ТВГ), состояния их производства, их точностных возможностей, выявление возможностей повышения их точности с целью использования в системах ориентации и навигации летательных аппаратов.

**Методология проведения работы:** проведены исследования технических характеристик промышленно выпускаемых ТВГ отечественными и зарубежными предприятиями и анализ их погрешностей.

**Результаты:** выработаны рекомендации по увеличению масштабного коэффициента ТВГ.

**Значение исследования:** состоит в возможности применения предложений авторов при проектировании ТВГ, пригодных для систем ориентации и навигации летательных аппаратов.

**Новизна/ценность:** состоит в повышении точности ТВГ за счет увеличения значения масштабного коэффициента.

*Ключевые слова:* твердотельный волновой гироскоп, навигационный гироскоп, чувствительность, масштабный коэффициент, технические характеристики.

**Введение**

Одним из перспективных направлений в развитии гироскопии считаются твердотельные волновые гироскопы (ТВГ). Принцип работы ТВГ и математический аппарат подробно описаны [1-3]. Источником инерциальной информации является стоячая волна упругих колебаний. При этом измерения производятся в режиме свободных колебаний чувствительного элемента (ЧЭ). Вращение основания, на котором установлен ЧЭ, вызывает поворот волны на меньший, но известный, угол, т.е. упругая волна, как целое, прецессирует [1]. Точность вычисления угла поворота (угловой скорости) зависит от точности масштабного коэффициента ТВГ, который в свою очередь определяется конструктивными характеристиками ЧЭ: геометрическими параметрами, используемым материалом.

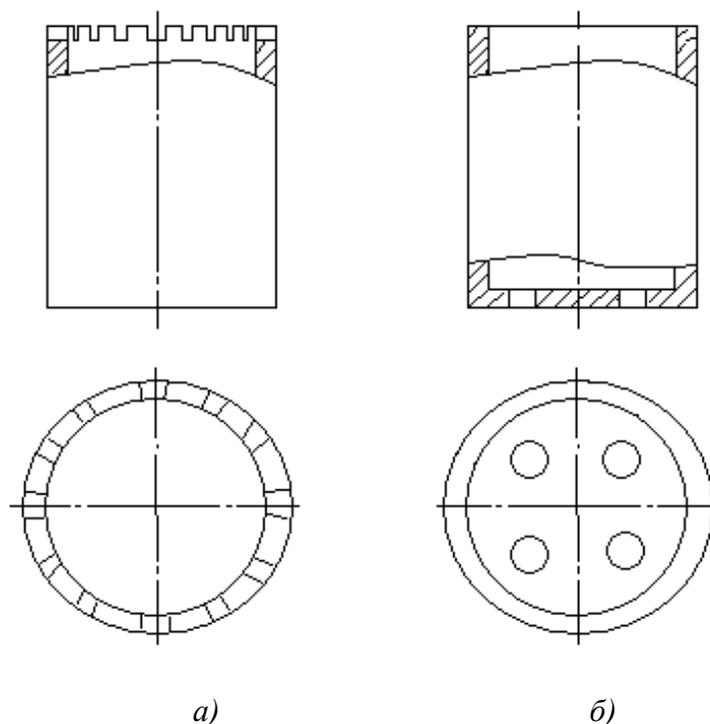
*Целью работы* является исследование влияния геометрических параметров ЧЭ на изменение масштабного коэффициента ТВГ.

**Анализ масштабного коэффициента ТВГ**

Конструкция ЧЭ может быть реализована в виде осесимметричного тела, имеющего форму полусферы, цилиндра, кольца, диска, полутороида, сферы и др. Для ЧЭ, выполняемых в виде полусферы, чаще всего в качестве конструктивного материала применяется кварцевое стекло, обладающее высокими термостабильными упругими свойствами, либо сапфир - неметаллический материал с высокой добротностью. Для изготовления цилиндрических ЧЭ используются металлические сплавы, чаще всего прецизионные, с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Такие сплавы обладают стабильными упруго-пластичными свойствами и не склонны к накоплению внутренних напряжений, обладают хорошими технологическими свойствами. Для колец и дисков в основном используется полупроводниковый кремний.

При изготовлении цилиндрических ЧЭ механические и геометрические параметры (соосность, округлость, различные дислокации кристаллической решетки) могут иметь

большие разбросы. Это приводит к зависимости поведения стоячей волны от ее ориентации в ЧЭ. Данный эффект, называемый динамической неоднородностью ЧЭ, способствует распаду волновой картины и, как следствие, увеличению погрешности измерения датчика в целом [4]. Для уменьшения влияния технологических дефектов, возникающих при изготовлении ЧЭ, используют различные способы балансировки: формируют зубцы, круглые отверстия в основании и утолщения в теле его конструкции (см. рис. 1).



**Рис. 1. Возможные варианты конструктивного исполнения ЧЭ:**

*a* – с зубцами по верхнему торцу;

*б* – с цилиндрическими отверстиями в основании

Применение конкретной конструкции ЧЭ ТВГ с учетом его геометрических характеристик, используемого материала и способа балансировки определяется требованиями к тактико-техническим характеристикам датчика, степенью освоения технологий на предприятии-изготовителе и из экономических соображений.

Функционирование системы съема колебаний ЧЭ может быть основано на электростатическом, электромагнитном, пьезоэлектрическом и фотоэлектронном принципах. В некоторых случаях применяются комбинированные методы. Например, предварительная раскочка осуществляется электромагнитным способом, а поддержание упругой стоячей волны обеспечивается электростатическим или пьезоэлектрическим способами.

Обработка результатов и формирование управляющего и/или корректирующего воздействия осуществляются с помощью электроники обработки сигнала (предусилитель, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), микропроцессоры и др.).

При всей сложности измерительного устройства (ТВГ) следует отметить, что наиболее ответственным элементом его конструкции является ЧЭ, так как, первоначально, именно от его конструктивных параметров в большей степени зависят параметры волновой картины колебаний и, как следствие, точность измерения входного сигнала.

В настоящее время в научно-технических источниках встречается большое количество разнообразных конструкций ТВГ. Наиболее распространенными из них являются ТВГ с

ЧЭ в виде полусферы и цилиндра. Нами в настоящее время изучаются возможности использования в качестве ЧЭ цилиндрических резонаторов, как наиболее технологичных, невысоких по стоимости, способных обеспечить достаточную стабильность. В частности, исследуется влияние утолщения в теле конструкции ЧЭ.

Для достижения поставленной цели рассмотрим более подробно принцип работы ТВГ и установим основные геометрические параметры, влияющие на масштабный коэффициент цилиндрического ЧЭ.

В сечении осесимметричного ЧЭ возбуждается стоячая волна. При повороте ЧЭ вокруг входной оси с угловой скоростью  $\Omega$  волновая картина отстает от ЧЭ на угол прецессии  $\varphi(t)$ , определяемый соотношением [2]:

$$\varphi(t) = -k \int_0^t \Omega(t) dt, \quad (1)$$

где  $k$  – масштабный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров ЧЭ.

При рассмотрении (1) в качестве максимизируемой целевой функции выберем масштабный коэффициент гироскопа  $k$ , связывающий измеряемый угол прецессии волновой картины колебаний ЧЭ с интегралом от угловой скорости основания.

Наличие угловой скорости основания приводит к расщеплению частот колебаний ЧЭ по основной рабочей форме колебаний на две близкие частоты. Расщепление частот прямо пропорционально угловой скорости основания с коэффициентом  $2k$  [1, с. 27].

Масштабный коэффициент  $k$  гироскопа для основной низкочастотной формы колебаний ЧЭ вычисляется следующим образом [1, с. 126]:

$$K = \frac{\int_0^{\alpha_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha}{2n \int_0^{\alpha_1} (U_n^2(\alpha) + V_n^2(\alpha) + W_n^2(\alpha)) d\alpha}, \quad (2)$$

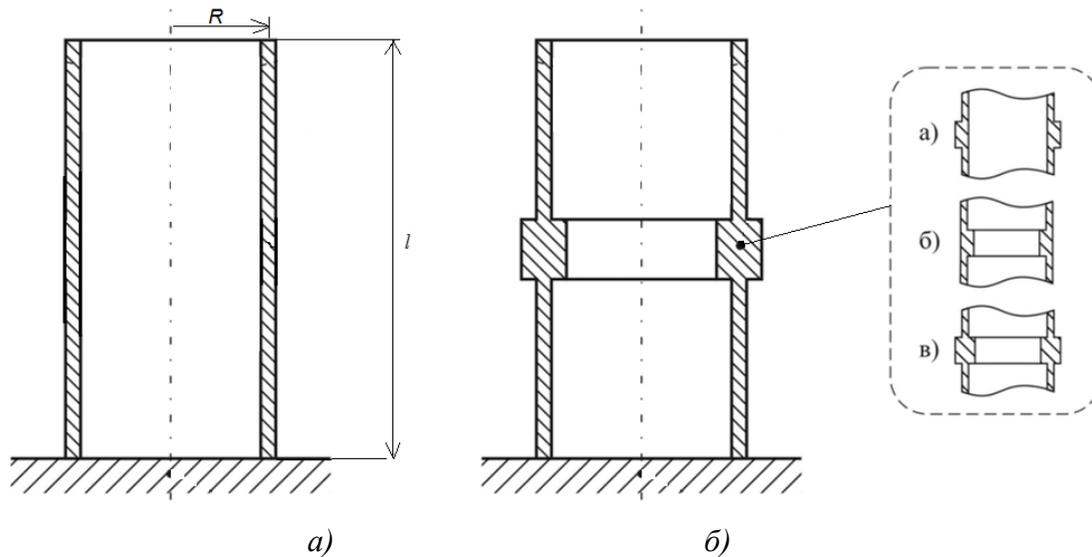
где  $U_n, V_n, W_n$  – решения краевой задачи для заданной геометрии резонатора.

В случае шарнирного способа закрепления ЧЭ в форме цилиндра (цилиндрическая оболочка с нерастяжимой срединной поверхностью) в составе ТВГ, масштабный коэффициент принимает значение:

$$K = \frac{8\alpha_1^2}{20\alpha_1^2 + \pi^2}, \quad \alpha_1 = l/R. \quad (3)$$

При увеличении длины оболочки  $l$  по отношению к радиусу  $R$  масштабный коэффициент стремится к максимальному значению 0,4.

Для случая консольного закрепления рассмотрим вопрос о целесообразности создания ЧЭ с утолщением в виде кольца (см. рис. 2, а). Учитывая исходные положения теории тонких упругих оболочек, будем считать утолщение достаточно малым и не превосходящим удвоенной толщины оболочки. Утолщение в виде кольца может быть выполнено в трех вариантах, как показано на рис. 2, б, при этом отношение максимальной толщины оболочки к ее радиусу должно быть не более 1/10.



**Рис. 2. Возможные варианты конструктивного исполнения ЧЭ с утолщение в виде кольца:**

*a* – утолщение с внешней стороны; *б* – утолщение с внутренней стороны;  
*в* – утолщение с внешней и внутренней сторон

Рассмотрим возможные вариации более подробно. Учитывая, что формы колебаний ЧЭ с постоянной толщиной известны, применим методику Бубнова-Галеркина для уточнения параметров математической модели ЧЭ – приведенной массы, жесткости и коэффициентов гироскопических сил [1]. Будем считать, что радиус срединной поверхности ЧЭ изменяется незначительно при добавлении утолщения. Величину утолщения зададим в долях от номинальной толщины ЧЭ, т.е. в виде  $\zeta h$ , для примера зададим величину утолщения, равную двум толщинам ЧЭ  $\zeta = 2$ . Высоту  $l_1$ , на которой располагается нижний край кольцевого утолщения, будем отсчитывать от основания ЧЭ (см. рис. 3).

Таким образом, масштабный коэффициент зависит от различных вариантов геометрии и расположения дополнительного кольца (дополнительных колец) жесткости на образующей ЧЭ. Зависимость масштабного коэффициента от этих факторов может быть записана в следующем виде:

$$K = \frac{h \int_0^{l_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha + \zeta h \int_{l_1}^{l_1+l_2} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha + h \int_{l_1+l_2}^{\alpha_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha}{2n \left( h \int_0^{l_1} I d\alpha + \zeta h \int_{l_1}^{l_1+l_2} I d\alpha + h \int_{l_1+l_2}^{\alpha_1} I d\alpha \right)}$$

где  $I = U_n^2(\alpha) + V_n^2(\alpha) + W_n^2(\alpha)$

Результаты вычисления интегралов для ЧЭ, высота которого равна пяти радиусам ( $\alpha_1 = 5$ ), отображены на рис. 4. При построении графика необходимо учитывать ограничения, накладываемые на геометрические параметры ЧЭ:  $l_1 + l_2 \leq \alpha_1$ .

Используя полученные аналитические зависимости масштабного коэффициента от геометрических параметров ЧЭ, определим экстремальные значения масштабного коэффициента при ограничениях:  $l_1 + l_2 \leq \alpha_1$ ,  $\zeta \leq 2$ .

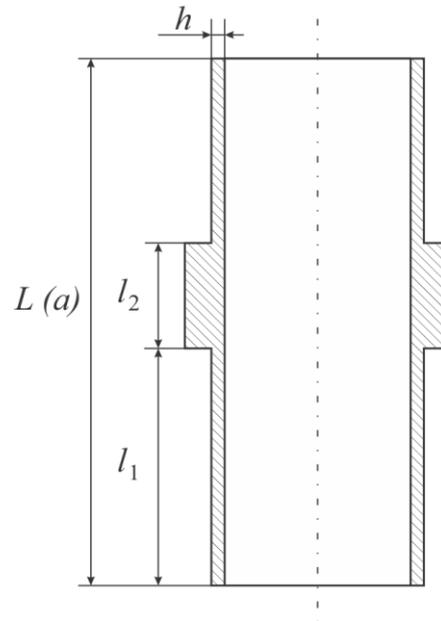


Рис. 3. Геометрические параметры ЧЭ ТВГ

Максимальное значение  $K=0,398$  достигается на границе допустимой области при  $l_1=3,686$  мм,  $l_2=1,314$  мм,  $\zeta = 2$ , т.е. при максимальном утолщении, удаленном от неподвижного жестко закрепленного края ЧЭ на максимальное расстояние. Полученное решение согласуется с результатами работ [1], согласно которым, большая часть кинетической энергии ЧЭ создается вблизи его свободного края.

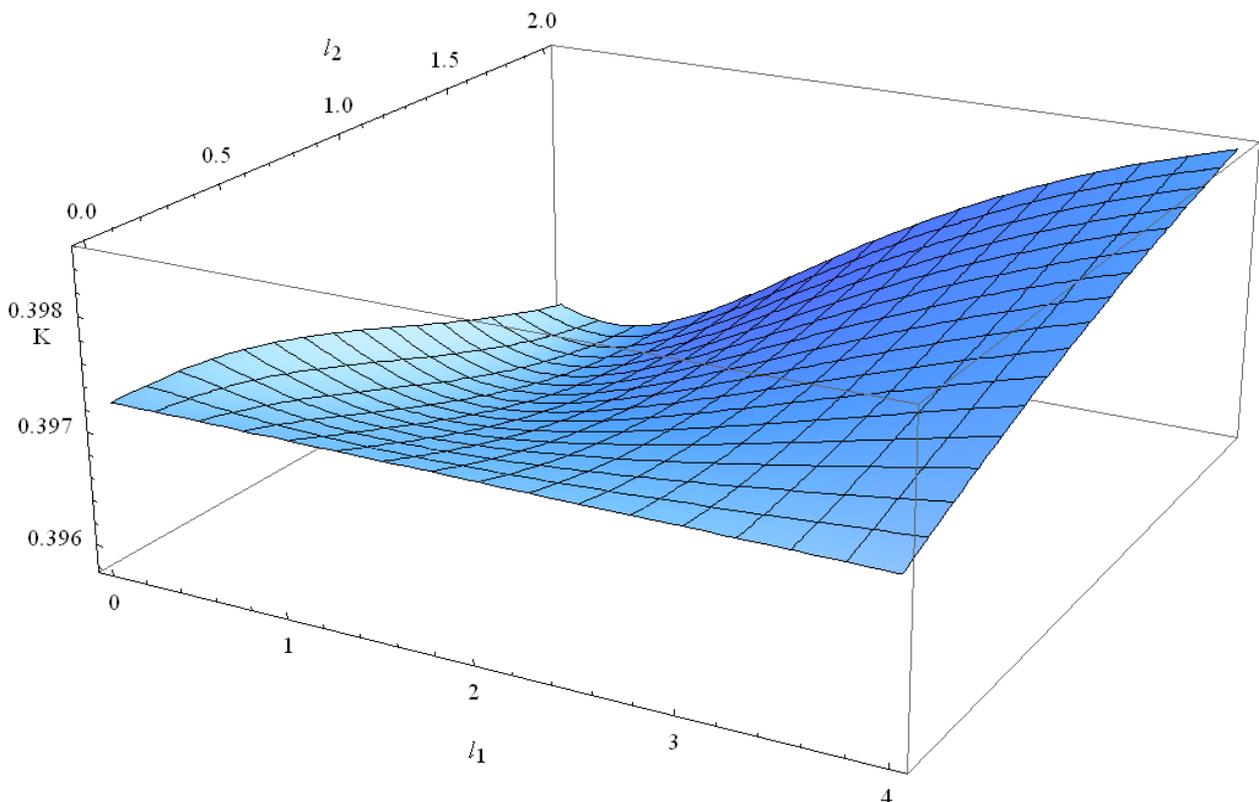


Рис. 4. Зависимость масштабного коэффициента от геометрических параметров ЧЭ

### Заключение

В результате наших исследований можно сделать следующие выводы:

1) за счет конструктивного изменения ЧЭ (введение дополнительного кольца жесткости) масштабный коэффициент увеличивается на 0,58%, что существенно для гироскопов навигационного применения;

2) дополнительное утолщение ЧЭ за счет кольца увеличивает его жесткость, и соответственно, увеличивается собственная частота колебаний ЧЭ. Полученный эффект может быть использован для корректировки собственных частот работы ТВГ в составе БИНС, с целью исключения возникновения резонансных явлений.

### Библиографический список

1. Меркурьев, И.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов / И.В. Меркурьев, В.В. Подалков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 228 с.
2. Матвеев, В.А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 168 с.
3. Матвеев, В.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах / В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 240 с.
4. Денисов, Р.А. Неоднородность распределения массы резонатора твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) // Инновационные технологии организации обучения на пути к новому качеству образования: сб. матер. VIII Всероссийской научно-практической конференции. – М.: Изд-во СГУ, 2011. – 524 с.

Дата поступления  
в редакцию 28.01.2015

R.A. Denisov<sup>1</sup>, V.I. Obukhov<sup>2</sup>

### THE STUDY BLAINE GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SENSING ELEMENT WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE ON ITS SCALE FACTOR

LLC «Arzamas instrument-making design Bureau»<sup>1</sup>,  
Arzamasskiy polytechnic institute (branch) NGTU n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** analysis of the principles of solid-state wave gyroscope (SWG), their production, their accuracy capabilities, identification of the main directions of improving their accuracy for use in the systems of orientation and navigation of aircraft.

**Design/methodology/approach:** studies of the technical characteristics of industrially produced wave solid-state gyroscopes domestic and foreign enterprises and the analysis of their errors.

**Findings:** made recommendations to increase the scale factor of SWG.

**Research limitations/implications:** consists in the possibility of applying the proposals of the authors in designing solid-state wave gyroscopes suitable for orientation and navigation of aircraft.

**Originality/value:** consists in increasing accuracy of SWG by increasing the scale factor.

*Key words:* solid-state wave gyroscope, gyroscope for navigation, sensitivity, scale factor, specifications.