

А. А. МАСЛОВ, Д. А. МАСЛОВ, И. Г. НИНАЛАЛОВ, И. В. МЕРКУРЬЕВ

ВОЛНОВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГИРОСКОПЫ: ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

Описывается состояние разработок волнового твердотельного гироскопа (ВТГ). Показано, что в настоящее время ВТГ становится наиболее перспективным гироскопом для навигационных систем различных сфер применения. Уникальные свойства позволили ему занять лидирующее положение в космической технике. Он обеспечивает высокую навигационную точность при более низкой стоимости массового производства и меньших размерах по сравнению с кольцевыми лазерными, а также волоконно-оптическими гироскопами. Существует достаточно обширная литература, посвященная исследованиям и описанию гироскопов. Предлагается краткий обзор публикаций, предоставляющий возможность ознакомиться с современным состоянием разработок ВТГ, анализируются перспективы их дальнейшего совершенствования и применения.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, резонатор, полусферический, цилиндрический, кольцевой, балансировка, автокалибровка.

Введение

Создание высокоточных миниатюрных приборов и аппаратуры, предназначенных для навигации, ориентации и управления движением подвижных объектов, является актуальной задачей для многих отраслей промышленности, включая авиационную, космическую, транспортную и нефтедобывающую.

Маслов Александр Анатольевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, НИУ «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») (Москва).

Маслов Дмитрий Александрович. Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики, НИУ «МЭИ».

Ниналалов Ибрагим Гусейнович. Аспирант кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, НИУ «МЭИ».

Меркурьев Игорь Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, НИУ «МЭИ»; исполняющий обязанности директора, Институт энергомашиностроения и механики МЭИ. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Новые физические принципы измерений движения в инерциальном пространстве и новые конструкционные материалы и технологии микроэлектромеханических систем позволяют снизить массогабаритные характеристики, энергопотребление и стоимость датчиков инерциальной информации – гироскопов, акселерометров, а также навигационных систем на их основе. Чтобы обеспечить конкурентные преимущества датчиков, необходимо при их разработке учитывать погрешности изготовления чувствительных элементов, изменяющиеся условия функционирования на подвижном и вибрирующем основании. Бортовое программное обеспечение создаваемых приборов и аппаратуры должно обеспечить автоматическую настройку диапазонов и режимов измерения движения подвижного объекта, алгоритмическую и силовую компенсацию систематических и случайных погрешностей в измерениях.

В работе академика РАН В.Г. Пешехонова [1] подробно проанализированы состояние и перспективы развития гироскопов в мире, в том числе лазерных, волоконно-оптических, волновых твердотельных, микромеханических. Показано, что сочетание высоких точностных и уникальных эксплуатационных характеристик ВТГ является неоспоримым преимуществом, однако высокая стоимость пока ограничивает их применение. В [2] указывается, что ВТГ обеспечит снижение объема бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) примерно вдвое по сравнению с БИНС на лазерных и волоконно-оптических гироскопах при сопоставимой в настоящее время точности.

Анализ публикаций и докладов, сделанных на международных конференциях, показывает [3, 4, 5], что масштаб исследований и разработок ВТГ в ближайшее время увеличится, что будет способствовать повышению точности гироскопов. В результате ВТГ представляется наиболее перспективным типом гироскопа для навигационных систем различных сфер применения [6–8].

В [9–14] описаны отдельные узлы прибора и технологии их изготовления. Подробный обзор теоретических исследований на эту тему можно найти в [14–21]. В последнее время интенсивно ведутся работы, связанные с совершенствованием технологии изготовления резонатора ВТГ. Предполагается, что это позволит удешевить ВТГ и уменьшить его габариты [14, 22–25].

Сегодня приборостроительные компании Northrop Grumman, Safran Electronics&Defence, Raytheon Anschutz активно работают над микромеханической реализацией ВТГ [5, 26, 27]. На базе ВТГ построена серийная инерциальная навигационная система SpaceNaute, предназначенная для применения на европейских ракетах-носителях «Ариан-6» [8], а также целый ряд БИНС авиационного, наземного и морского применения [4, 5].

Большим достижением французской компании Safran Electronics&Defence стало создание высокоточного ВТГ [1, 5]. В результате испытаний ВТГ-20 (HRG-Crystal™) с кварцевым полусферическим резонатором диаметром 20 мм показал следующие основные технические характеристики [8]:

- 1) нестабильность коэффициента масштабирования – менее 1 ppm;
- 2) случайный дрейф угла – менее 0,0002 град/√ч;
- 3) стабильность смещения нуля – 0,005 град/ч.

Автокалибровка систематических погрешностей в процессе эксплуатации гироскопа повышает его точность на порядок [2, 28]. На базе ВТГ-20 налажено производство малогабаритной инерциальной системы для морских и океанских кораблей, а также точной БИНС наземного применения.

В России исследованиями и разработкой ВТГ занимаются: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН [15, 16], Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [6, 18], Национальный исследовательский университет «МИЭТ» [29], МГУ им. М.В. Ломоносова [13, 14], АО «Государственный НИИ приборостроения» и Национальный исследовательский университет «МАИ» (г. Москва) [30], Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения [31], АО «Инерциальные технологии технокомплекса» и АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Раменское) [10, 32], ЗАО «НПП «Медикон» (г. Миасс) [7, 33], АО «Ижевский электромеханический завод «Купол» и Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова [19, 20], АО «Арзамасский приборостроительный завод имени П.И. Пландина» [34], АО «Мичуринский завод «Прогресс» и Тульский государственный университет [9, 11], Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. [35] и др.

Из зарубежных компаний, кроме уже упомянутых, исследованиями в области ВТГ занимаются также Innalabs (Ирландия), Delco Electronics (Индия), General Motors Corp. (США), Marconi (Италия), Badin-Crouzet (Франция), British Aerospace Systems and Equipment (BAE Systems) (Великобритания), Sumitomo Precision Products Company Ltd (Япония) и др.

В настоящей статье с целью анализа на основе публикаций состояния разработок ВТГ и перспектив его дальнейшего совершенствования и применения рассматриваются следующие вопросы:

- принцип функционирования этого гироскопа;
- его математические модели;
- методы повышения точности;
- технологические проблемы создания прецизионного ВТГ;
- алгоритмы управления, оценивания и идентификации.

Принцип функционирования ВТГ

Принцип функционирования ВТГ основан на эффекте инертности упругих волн колебаний осесимметричного резонатора, выполненного в виде либо упругого кольца, либо осесимметричной упругой оболочки. В конструкциях ВТГ обычно используют тонкостенные полусферические, цилиндрические и кольцевые резонаторы (рис. 1).

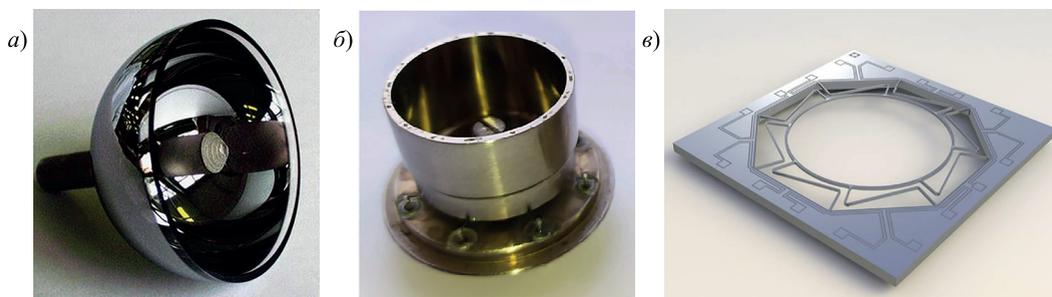


Рис. 1. Типы резонаторов ВТГ

Полусферический резонатор (рис. 1, а) изготавливается из кварцевого стекла, обладающего высокими изотропными свойствами и добротностью. Металлизиро-

ванная поверхность резонатора вместе с электродами образует электростатические датчики управления и съема информации. ВТГ с полусферическим резонатором относится к гироскопам высоких и средних точностей. Достижение высокой точности для ВТГ возможно в случае, если полусферический резонатор имеет высокую добротность ($Q \sim 10^7$), а также качественно выполнен и точно отбалансирован, что значительно снижает влияние анизотропных свойств резонатора на получаемые измерения. К недостаткам ВТГ относят сложность изготовления кварцевого полусферического резонатора и его высокую стоимость, обусловленную рядом прецизионных технологических операций [14].

ВТГ с цилиндрическим резонатором (рис. 1, б) относится к гироскопам средней и низкой точности, применяемым в БИНС [6]. Широкое распространение получили приборы с пьезоэлектрическими датчиками, наклеенными на металлический цилиндрический резонатор [11]. Пьезоэлектрические датчики, расположенные на резонаторе, а также материал, из которого он изготавливается, снижают его добротность ($Q \sim 3-5 \cdot 10^4$) и точность гироскопа.

ВТГ с кольцевым резонатором (рис. 1, в) представляет собой микромеханическое устройство [12, 36]. Применение микроэлектромеханических технологий, которые основаны на полупроводниковых интегральных микросхемах, позволяет производить недорогие приборы малых размеров с низким энергопотреблением. Наличие упругих торсионов, поддерживающих кольцевой резонатор, существенно снижает добротность колебательного контура и уменьшает точность гироскопа.

Схема одного из первых вариантов ВТГ – с полусферическим кварцевым резонатором, закрепленным в корпусе на ножке [37], показана на рис. 2. Металлизированная поверхность резонатора вместе с электродами представляет собой электростатические датчики управления и съема информации.

Разные типы датчиков (магнитоэлектрические, электростатические, электромагнитные, пьезоэлектрические) могут возбуждать колебания резонатора в различных конструктивных схемах и управлять ими [9]. Функция нормального прогиба резонатора гироскопа также измеряется с помощью указанных датчиков, при этом дополнительно могут быть использованы миниатюрные оптико-электронные средства измерений. Ось чувствительности гироскопа ортогональна плоскости колебаний свободной кромки резонатора (полусферического, цилиндрического и кольцевого).

В работах [38, 39] показано, что в зависимости от реализации схемы системы управления стоячей волной прибор может работать в двух режимах – датчика угла (интегрирующий гироскоп) и датчика угловой скорости (ДУС). Рассмотрена принципиальная возможность реализации на базе малогабаритного интегрирующего гироскопа нового комбинированного режима функционирования – измерения одним прибором углов ориентации и угловой скорости основания. Приведены результаты эксперимента, подтверждающего практическую возможность реализации нового комбинированного режима ВТГ. Обычно в ВТГ используется вторая мода колебаний. Резонатор можно возбуждать и на более высоких модах. В патенте [40] и статье [41] описаны основные способы реализации двухмодового режима работы ВТГ. В [42] предлагается в качестве резонатора использовать полу сферическую оболочку, что позволит определять три компоненты вращательного движения подвижного объекта. Таким образом, один прибор может быть использован в БИНС вместо трех одноосных ВТГ.

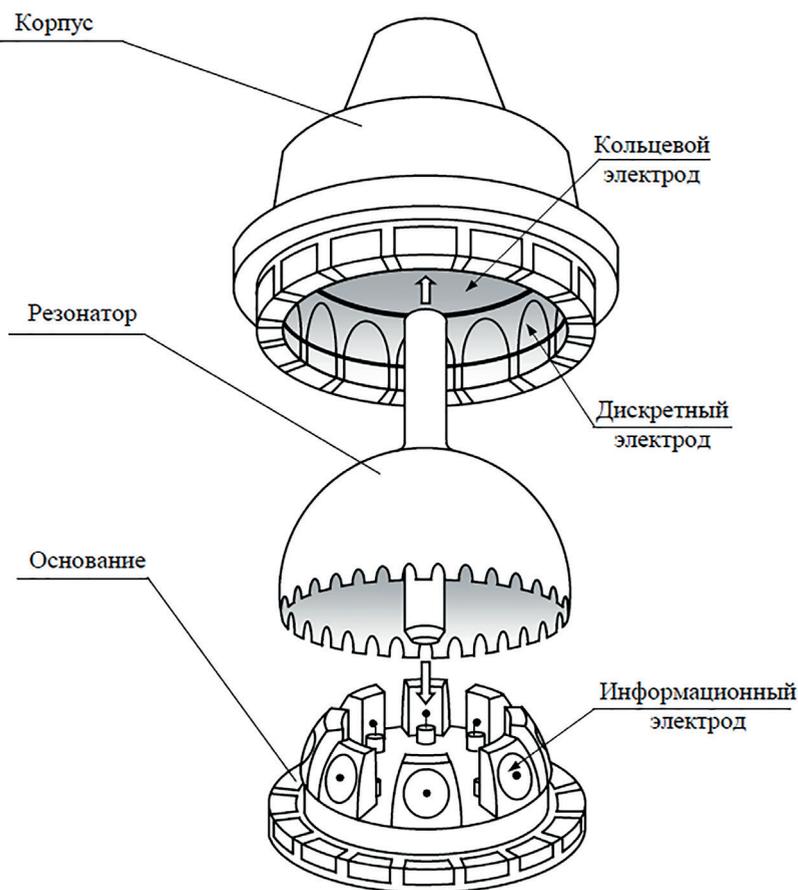


Рис. 2. Схема конструкции электромеханической части одного из первых вариантов ВТГ с полусферическим резонатором и электростатическими датчиками управления

В конце XIX века британский физик Дж. Брайан продемонстрировал эффект прецессии стоящей волны в упругой осесимметричной оболочке, вращающейся с постоянной угловой скоростью вокруг оси симметрии. Кроме того, он математически описал этот эффект для тонкого упругого кольца. Д. Линч [43] применительно к кварцевой полусфере провел уникальный эксперимент и первым получил коэффициент Брайана для случая произвольной угловой скорости вращения основания прибора. При этом он ошибочно сослался на эксперимент Брайана [4]. В.Ф. Журавлев и Д.М. Климов первыми доказали справедливость эксперимента Д. Линча для произвольной угловой скорости вращения основания вокруг оси чувствительности гироскопа [15, 16]. В [44] рассмотрена динамика сферического резонатора ВТГ и показано, что эффект инерции упругих волн колебаний является пространственным.

Математические модели ВТГ

Вопросы теории ВТГ и прикладные аспекты его практической реализации подробно рассмотрены в трудах известных российских академиков Д.М. Климова

и В.Ф. Журавлева [15, 16], а из зарубежных ученых наибольший вклад в создание ВТГ внес Д. Линч (США) [45]. В [15] построена математическая модель динамики идеального упругого нерастяжимого кольца:

$$\frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial \theta^2} - \ddot{w} + 4\Omega \frac{\partial \dot{w}}{\partial \theta} + 2\dot{\Omega} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \chi^2 \left(\frac{\partial^6 w}{\partial \theta^6} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = \frac{1}{\rho S} \left(\frac{\partial^2 q_0}{\partial \theta^2} - \frac{\partial p_0}{\partial \theta} \right), \quad (1)$$

где w – функция нормального прогиба; Ω – угловая скорость основания; θ – окружной угол; $\chi^2 = EI / (\rho SR^4)$; E – модуль упругости; I – момент инерции поперечного сечения кольца; p_0 и q_0 – проекции удельных внешних сил (сила на единицу длины кольца); ρ – плотность материала кольца; S – площадь поперечного сечения; R – радиус кольца по средней линии; точка над буквой означает дифференцирование по времени.

В уравнении (1) опущены члены, содержащие множитель Ω^2 , и в тех случаях, когда угловая скорость вращения мала, оно может использоваться для анализа динамики кольца.

Представляя функцию нормального прогиба, соответствующую основной второй моде колебаний, в виде

$$w = f \cos 2\theta + g \sin 2\theta,$$

где f и g – функции времени, и предполагая, что $p_0 = q_0 = \dot{\Omega} = 0$, приходим к обыкновенным дифференциальным уравнениям для функций f и g :

$$\begin{aligned} 5\ddot{f} - 8\Omega\dot{g} + 36\chi^2 f &= 0, \\ 5\ddot{g} + 8\Omega\dot{f} + 36\chi^2 g &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) используются для анализа работы кольцевого резонатора во многих работах, например в [10, 14–19]. Один из способов решения уравнения (1) при $p_0 = q_0 = 0$ предложен в [46].

В [15] обоснован эффект инерции упругих волн колебаний, получены формулы для угла прецессии стоячей волны колебаний в кольцевом резонаторе как с нерастяжимой, так и с растяжимой срединной линией. Показано, что для угла поворота $\varphi(t)$ стоячей волны во вращающемся с переменной скоростью $\Omega(t)$ резонаторе относительно него самого имеет место следующее соотношение [15]:

$$\varphi(t) = -K \int_0^t \Omega(t) dt,$$

где K – масштабный коэффициент (коэффициент Брайана), t – время.

Выражение масштабного коэффициента упругого нерастяжимого кольца для n -й моды колебаний:

$$K = \frac{2}{n^2 + 1}.$$

Для второй моды колебаний, которая обычно используются в ВТГ, масштабный коэффициент равен 0,4.

С учетом наиболее общего [16] представления действующих на резонатор возмущений линейные уравнения динамики могут быть записаны в следующем векторно-матричном виде:

$$\ddot{\mathbf{x}} + \omega^2 \mathbf{x} = (C + H + N)\mathbf{x} + (B + G + \Gamma)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F},$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix}, \quad H = h \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix}, \quad N = n \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$B = \begin{pmatrix} -\gamma & 0 \\ 0 & -\gamma \end{pmatrix}, \quad G = b \begin{pmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & -\cos 2\beta \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} 0 & \nu \\ -\nu & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x / m \\ F_y / m \end{pmatrix}.$$

Здесь f, g – обобщенные координаты основной формы колебаний резонатора, равные смещению его кромки в двух фиксированных точках, отстоящих друг от друга на угол $\pi/4$; ω – характерная частота собственных колебаний; $\omega^2 = k/m$, k и m – приведенные жесткость и масса резонатора; γ – коэффициент демпфирования; h, b – коэффициенты, характеризующие разночастотность и анизотропию демпфирования соответственно; α и β – углы, определяющие положение главных осей жесткости и осей диссипации относительно отсчетных осей; c и n – коэффициенты, характеризующие погрешность частоты собственных колебаний и наличие циркуляционных сил соответственно; ν – параметр, характеризующий угловую скорость основания гироскопа; F_x, F_y – управляющие воздействия.

Способы формирования управляющих воздействий F_x, F_y определяют режим работы гироскопа. Для того чтобы стоячая волна обладала инерциальными свойствами, необходимо стабилизировать амплитуду вибраций на заданном значении, а квадратуру удерживать на нулевом уровне [16]. Формируются также силы, компенсирующие разночастотность и анизотропию демпфирования, с целью снижения динамических погрешностей при больших угловых скоростях основания прибора и для повышения качества подавления квадратуры [38]. При устранении погрешностей или при пренебрежении ими получим более простой вид уравнений:

$$\ddot{f} + \gamma \dot{f} + \omega^2 f = \nu \dot{g} + F_x / m,$$

$$\ddot{g} + \gamma \dot{g} + \omega^2 g = -\nu \dot{f} + F_y / m. \quad (4)$$

В различных публикациях, например в [10, 14, 16–19, 27], уравнения (3) и (4) используются для анализа работы ВТГ с кольцевыми, цилиндрическими и полусферическими резонаторами. Способы формирования управляющих воздействий для работы гироскопа в режиме датчиков угла и угловой скорости, а также в комбинированном режиме предложены в [16, 17, 38].

Во многих приборах для управления колебаниями используется огибающие q_1, p_1, q_2, p_2 сигналов f, g . Для перехода к уравнениям динамики в огибающих сигналах q_1, p_1, q_2, p_2 , называемых также медленными переменными, используются формулы:

$$f = p_1 \sin \omega_0 t + q_1 \cos \omega_0 t,$$

$$g = p_2 \sin \omega_0 t + q_2 \cos \omega_0 t.$$

Предположим, что

$$F_x / m = -u_1^* \sin \omega_0 t + u_2^* \cos \omega_0 t, \quad F_y / m = -u_3^* \sin \omega_0 t + u_4^* \cos \omega_0 t,$$

где $u_i^* = \eta u_i$, $i = 1 \dots 4$; η – коэффициент, зависящий от опорного напряжения и от емкости конденсатора; u_i – нормализованные по отношению к опорному напряжению амплитуды управляющих сигналов; ω_0 – частота внешнего гармонического возбуждения колебаний резонатора, близкая к резонансной частоте второй формы колебаний.

Применяя метод усреднения Крылова–Боголюбова, получим уравнения вида

$$\dot{\mathbf{z}} = D\mathbf{z} + \mathbf{U}, \quad (5)$$

где $\mathbf{z} = (q_1, p_1, q_2, p_2)^T$ – вектор медленных переменных;

$$D = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -\gamma - b_c & \tilde{c} + h_c - 2\lambda & v - b_s & \tilde{n} + h_s \\ -\tilde{c} - h_c + 2\lambda & -\gamma - b_c & -\tilde{n} - h_s & v - b_s \\ -v - b_s & -\tilde{n} + h_s & -\gamma + b_c & \tilde{c} - h_c - 2\lambda \\ \tilde{n} - h_s & -v - b_s + 2\lambda & -\tilde{c} + h_c & -\gamma + b_c \end{pmatrix} \text{ – матрица параметров;}$$

$$\mathbf{U} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_1^*, \tilde{u}_2^*, \tilde{u}_3^*, \tilde{u}_4^*)^T \text{ – вектор управляющих воздействий;}$$

$\lambda = \omega_0 - \omega$ – частотная настройка;

$$b_c = b \cos 2\beta, b_s = b \sin 2\beta, h_c = (h \cos 2\alpha) / \omega, h_s = (h \sin 2\alpha) / \omega, \tilde{c} = c / \omega, \tilde{n} = n / \omega, \tilde{u}_i^* = u_i^* / \omega.$$

В электронном контуре гироскопа физически реализуется схема осреднения [17]: с помощью емкостной системы электродов измеряются высокочастотные функции времени f, g , а с помощью контуров обработки сигналов выделяются огибающие q_1, p_1, q_2, p_2 . Таким образом, переменные q_1, p_1, q_2, p_2 системы являются измеряемыми. Уравнения в медленных переменных применялись при исследовании динамики ВТГ в работах [10, 15–17, 19, 47]. Для описания функции нормального прогиба резонатора w , характеризующего волновую картину колебаний, в [16, 17] используются также медленно изменяющиеся тороидальные координаты, называемые в механике элементами орбиты колебаний.

Затухание колебаний приводит к необходимости их поддерживать внешними силами. Существуют два типа возбуждения незатухающих колебаний: позиционное и параметрическое. Первое из них обеспечивает работу ВТГ в режиме ДУС, второе используется для поддержания колебаний в резонаторе с сохранением интегрирующего эффекта, без привязки к вращающемуся основанию. Для этого на кольцевой электрод подается переменное напряжение. Динамика резонатора при позиционном и параметрическом возбуждениях колебаний рассмотрена в монографиях [15, 16]. В этих же работах исследовано влияние электрических процессов в резонаторе и электродах управления, съема информации и возбуждения на эволюцию стоячих волн в гироскопе с полусферическим резонатором. Построена математическая модель динамики резонатора, которая показывает взаимосвязь электрических и механических колебаний. Исследовано также влияние электродов управления на динамику ВТГ в случае линейных колебаний. Математическая модель ВТГ с плоскими электродами представлена в [48]. Вид управляющих сигналов, формируемых по медленным переменным, для работы гироскопа в режиме датчика угла предложен в [17, 49].

В [50] показано, что основной вклад в формирование погрешностей ВТГ вносит четвертая гармоника разложения механической или геометрической неоднородности параметра резонатора в ряд Фурье по окружному углу. В [16] рассмотрены такие дефекты, как неоднородность материала, неравномерность упругих характеристик, переменность толщины резонатора и отклонение его формы от полусферы. В [16] продемонстрировано, что во всех этих случаях дрейф гироскопа пропорционален произведению относительной величины дефекта на квадратуру.

Для определения угла прецессии по переменным q_1, p_1, q_2, p_2 используется формула [15, 17, 37]

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2(q_1 q_2 + p_1 p_2)}{q_1^2 + p_1^2 - q_2^2 - p_2^2}.$$

Вследствие ряда причин стоячая волна может прецессировать даже в отсутствие внешнего вращения. Угловой дрейф может носить как случайный, так и систематический характер, его величина зависит от характеристик резонатора и определяет точность гироскопа. Модель дрейфа ВТГ, т.е. формула для его определения, приведена в [14]. Формула имеет довольно громоздкий вид. Из нее следует, что угловой дрейф зависит от коэффициента демпфирования, разностотности и анизотропии демпфирования, углов, определяющих положение главных осей жесткости и осей диссипации относительно отсчетных осей, стабильности амплитуды колебаний и квадратуры, частоты собственных колебаний.

В [16] показано, что все принципиальные вопросы теории целого класса новых гироскопических приборов, к которым относится ВТГ, могут рассматриваться в рамках одних и тех же уравнений, аналогичных уравнениям классического маятника Фуко. В связи с этим весь этот класс приборов инерциальной информации назван обобщенным маятником Фуко и отличается принципиальной особенностью, связанной с дополнительной прецессией орбиты колебаний чувствительного элемента из-за нелинейных эффектов различной физической природы.

В [51, 52] получены уравнения резонатора ВТГ с кубической, а также другими типами нелинейностей, вызванных влиянием нелинейных свойств электростатических датчиков управления. Кубическая нелинейность в уравнениях динамики ВТГ с кольцевым резонатором может быть также обусловлена нелинейной жесткостью торсионов упругого подвеса [53].

Среди важнейших характеристик гироскопа – масштабный коэффициент и его нелинейность. Одним из требований, предъявляемых к ВТГ, является обеспечение стабильности его масштабного коэффициента. Для ВТГ, функционирующего в режиме интегрирующего гироскопа, масштабный коэффициент определяется как отношение угла поворота волны относительно резонатора к углу поворота резонатора в инерциальном пространстве. Масштабный коэффициент для полусферического резонатора рассчитывался в работах [15–17, 50]. Показано, что он зависит от номера формы колебаний и характеристик материала. Масштабные коэффициенты цилиндрического кварцевого и металлического резонаторов для второй моды колебаний рассчитаны в [17, 54, 55]. В [55] рассмотрены резонаторы следующих форм: полусферический, цилиндрический, конический, тороидальный, колоколообразный. Для указанных форм резонаторов вычислены масштабные коэффициенты. В [15] показано, что для растяжимого кольца масштабный коэффициент зависит не только от номера формы колебаний, но и от размеров кольца и характеристик его материала, однако зависимость эта очень слабая.

Масштабный коэффициент гироскопа в режиме ДУС определяется как отношение изменения выходного сигнала гироскопа, которым обычно является напряжение, к изменению измеряемой угловой скорости основания. Масштабный коэффициент обусловлен не только геометрическими параметрами, формой упругих колебаний резонатора и его материалом, но и коэффициентами усиления, демпфирования, разно-

частотностью и разнородностью колебательного контура гироскопа. Формулы для определения масштабного коэффициента ВТГ в режиме ДУС получены в [29, 31, 56]. В [31] исследовано влияние коэффициента обратной связи и угловой скорости на масштабный коэффициент. В [56] произведена оценка влияния разнородности и разнородности резонатора на этот коэффициент.

В общем случае дрейф измерительного сигнала ВТГ и нелинейность масштабного коэффициента принято разделять на систематические и случайные составляющие. При этом систематические составляющие имеют некоторую закономерность и потому отчасти могут быть скорректированы посредством специальных аппроксимирующих функций в выходном сигнале ВТГ. Случайные составляющие, в свою очередь, слишком чувствительны к внутренним эксплуатационным параметрам ВТГ, чтобы их можно было заранее спрогнозировать и скомпенсировать. Они обусловлены большим числом неконтролируемых факторов и поэтому обычно оцениваются с помощью относительной погрешности или среднеквадратического отклонения.

Методы повышения точности ВТГ

Проблемы повышения точности ВТГ исследовались во многих работах, в частности в [10, 13–21, 54–66]. Рассматривались погрешности ВТГ, вызванные неоднородностью распределения массы резонатора, его разнородностью, вибрациями основания, температурой, уровнем вакуума и другими факторами. Из публикаций следует, что наиболее эффективным методом повышения точности ВТГ является балансировка резонатора, однако это одна из наиболее трудоемких и дорогих операций сборки и регулировки ВТГ. Необходимость в ней возникает из-за небольших отклонений от идеальной осесимметричной формы реального резонатора и появления дисбаланса, приводящего к расщеплению собственных частот резонатора и снижению его добротности за счет рассеяния энергии колебаний в опорах. От качества балансировки во многом зависят точностные характеристики прибора [14, 27].

В работах В.Ф. Журавлева, Ю.К. Жбанова и Н.В. Калёновой [58–60] рассмотрен ряд вопросов, связанных с балансировкой полусферического резонатора. Показано, что для получения высоких точностных характеристик, а также уменьшения погрешностей прибора в условиях воздействия линейных и вибрационных перегрузок необходимо проводить балансировку резонатора по первой, второй, третьей и четвертой гармоникам упругомассовых погрешностей.

Первые резонаторы, в том числе полусферические кварцевые, имели специальные балансировочные зубцы и отличались сложной технологией изготовления. Кроме того, устранение дисбаланса только на кромке резонатора с помощью удаления масс на зубцах не компенсирует моменты сил реакции в опоре. Это означает, что в местах крепления резонатора будут действовать силы реакции. При балансировке кромки резонатора дисбалансные массы удалялись в отдельных точках, например, с помощью лазера [64]. В несбалансированном полусферическом резонаторе неуравновешенная масса распределена по всей его оболочке. Так, типичной причиной возникновения первой гармоники дефекта масс является несовпадение центров внешней и внутренней полусфер. В связи с этим применение поверхностных методов обработки, позволяющих не компенсировать, а исправить конфигурацию стенки резонатора, представляется более рациональным. Кроме того, использование таких

методов позволяет обойтись без балансировочных зубцов, что значительно упрощает технологию изготовления резонатора.

Одним из наиболее перспективных способов балансировки беззубцовых кварцевых резонаторов является метод ионно-плазменного удаления вещества, предложенный Б.П. Бодуновым [33]. Его суть заключается в том, что резонатор закрепляют за ножку, на свободном конце которой устанавливают пьезоэлектрический датчик, возбуждают колебания, измеряют напряжение датчика для различных ориентаций стоячей волны в резонаторе, рассчитывают неуравновешенную массу с помощью математической обработки полученных экспериментальных данных и удаляют неуравновешенную массу ионным лучом с поверхности полусферической оболочки резонатора.

В [65, 66] предлагается выполнить балансировку четырех низших гармоник неоднородности углового распределения массы кварцевого полусферического беззубцового резонатора ВТГ химическим методом. Химическое травление неуравновешенной массы с поверхности частично погруженного резонатора осуществляется в соответствии с аналитическим алгоритмом расчета угла поворота резонатора вокруг оси симметрии, наклона и глубины его погружения в химическую ванну и времени процедуры. Предложенный метод балансировки позволяет сократить время и снизить трудоемкость балансировочного процесса по сравнению со способом ионно-плазменного травления.

В [14] приведены экспериментальные данные, демонстрирующие эффективность балансировки полусферических резонаторов путем ионного распыления. Дрейф ВТГ снизился на два порядка, а добротность увеличилась на порядок. При этом остаточная разночастотность составила 0,004 Гц.

Французская компания Safran Electronics&Defence [27] разработала процедуру, обеспечивающую балансировку резонатора и снижение рассогласования частот. Ее продолжительность составила несколько часов. В результате разночастотность не превышала 0,0005 Гц, добротность составляла 10^7 , а дрейф – менее 0,01 град/ч вне зависимости от механических воздействий, которым подвергается объект.

В рассматриваемых конструкциях кварцевых резонаторов ВТГ остаточное расщепление собственной частоты, оставшееся после механической балансировки, не превышало 0,004 Гц. Для дальнейшей коррекции остаточных дисбалансов без удаления материала в рабочем режиме гироскопа применяется электростатическая балансировка, основанная на эффекте отрицательной жесткости при подаче постоянного напряжения на отдельные электроды [10, 16].

Отбалансированные посредством этого метода резонаторы обладают очень стабильными характеристиками, и в режиме полного угла для них требуются очень слабые управляющие силы, что уменьшает чувствительность к дефектам электроники, а также к тепловым возмущениям окружающей среды [27].

Цилиндрические резонаторы, выполненные не из металла, а из кварцевого стекла, обладают значительно большей добротностью, что повышает точность ВТГ. По этой причине в [67] предложено изготавливать недорогие кварцевые цилиндрические резонаторы с использованием серийно производимых трубок из кварцевого стекла. Описаны конструкции и характеристики таких резонаторов, а также методы их балансировки. Работы по улучшению качества изготовления и балансировки цилиндрических резонаторов из плавленого кварца интенсивно ведутся в Китае [21, 68, 69].

При наличии первой, второй и третьей гармоник распределения массы резонатора по окружному углу при продольной или поперечной вибрации волновая картина имеет паразитную составляющую, которая искажает полезный сигнал. Это объясняется тем, что помимо основной формы колебаний в резонаторе возбуждается ряд побочных форм, приводящих к погрешности прибора. Балансировка резонатора по первым трем гармоникам дефекта плотности дает возможность применять гироскоп в жестких условиях воздействия вибраций. В работах [70–72] исследуются внешние вибрационные и ударные воздействия на динамику микромеханического гироскопа.

В [73–75] изучено влияние температур на добротность резонатора и точностные характеристики прибора. В статье В.Э. Джашитова и В.М. Панкратова [73] разработана математическая модель тепловых процессов ВТГ и проанализированы нестационарные температурные поля в корпусе прибора. В [74] рассмотрено влияние изменения температуры упругого осесимметричного резонатора ВТГ на дрейф в инерциальном пространстве возбужденной в нем стоячей волны. В работе [75] приводятся результаты температурных испытаний гироскопа с металлическим резонатором.

Технологические проблемы создания прецизионного ВТГ

Вопросы, связанные с технологией ВТГ, рассматриваются в работах [9–14, 22–24, 76].

Наиболее подробно освещены основные технологические процессы, используемые при производстве ВТГ с полусферическим кварцевым и цилиндрическим металлическим резонаторами [13, 14]. Показано, что добиться высоких характеристик ВТГ возможно в том случае, когда его резонатор имеет высокую добротность и упругомассовую симметрию. Жесткие требования предъявляются и к вакууму внутри прибора.

В качестве материала высокодобротных резонаторов практически всегда используется особо чистое кварцевое стекло. По величине внутреннего трения оно уступает лишь сапфиру, который наряду с указанным преимуществом имеет ряд недостатков: обладает свойственной кристаллу анизотропией свойств, очень сложен в обработке и дорог.

Для килогерцовых частот добротность кварцевого стекла максимальна при температуре 100...120°C, чем воспользовалась фирма «Делко» (США) при конструировании ВТГ типа HRG 130P [14], механический блок которого термостатирован при температуре около 120°C.

При производстве высокодобротных резонаторов ВТГ повышенные требования предъявляются к осевой симметрии резонатора и состоянию поверхности после механической обработки кварцевого стекла [76]. Это объясняется тем, что смещение центров внутренней и внешней полусфер резонатора и асимметрия ножки приводят к массовому дисбалансу резонатора, который придется устранять с помощью балансировки. Кроме того, во многом от состояния поверхности зависят рассеяние энергии колебаний и добротность резонатора.

Резонатор изготавливается в виде тонкостенной полусферы с крепежной ножкой (рис. 2), на его кромке имеются зубцы, предназначенные для его балансировки. Зубцы не деформируются при колебаниях, что позволяет сравнительно просто (например, с помощью лазера) удалять с них значительное количество неуравновешенной

массы без изменения жесткостных и диссипативных характеристик резонатора. Для обеспечения высокой эффективности работы емкостных электродов на внутреннюю и внешнюю поверхности полусферы нанесен тонкий проводящий металлический слой, служащий обкладкой емкостных датчиков. Технические решения, связанные с нанесением металлического покрытия, изложены в [14, 76].

Вакуум внутри ВТГ обеспечивается встроенным в прибор газопоглотителем. Для достижения высоких точностных характеристик ВТГ при его изготовлении используется вакуумирование. При откачке прибора через штенгель возможность уменьшить давление в объеме ВТГ ограничена недостаточно высокой скоростью удаления газов из-за малой проводимости штенгеля, а в ряде случаев и из-за малой проводимости внутренних коммуникаций самого прибора. По этой причине в настоящее время на некоторых предприятиях используют откачку без применения штенгеля.

Следующий шаг в развитии конструкции ВТГ стал возможен благодаря технологии балансировки резонатора ионным пучком, предложенной Б.П. Бодуновым [33]. Основным достоинством ионной технологии является возможность балансирования беззубцовых резонаторов, поскольку ионное травление практически не нарушает структуру кварцевого стекла и позволяет удалять материал прямо с поверхности полусферы. Ионная технология отличается простым балансировочным алгоритмом и высокой точностью балансировки, кроме того, она позволила значительно снизить стоимость кварцевых ВТГ и упростить их производство.

Наконец, еще одно усовершенствование конструкции ВТГ связано с упрощением электродного узла [14, 77, 78]. Известно, что кромка полусферического резонатора при колебаниях перемещается не только перпендикулярно его оси, но и параллельно ей. Амплитуда осевого смещения кромки равна половине амплитуды радиального смещения. Это обстоятельство позволяет разместить все электроды (рис. 3) [14] на плоском электродном узле, расположенном параллельно торцевой кромке полусферической оболочки резонатора. В новом варианте конструкции ВТГ металлическое покрытие наносится только на торцевую кромку полусферы, что значительно уменьшает внутреннее трение в резонаторе и упрощает технологию его изготовления. Это усовершенствование было запатентовано компанией Safran Electronics&Defence [77] и реализовано в конструкции ВТГ-20 (рис. 4). Гироскоп имеет небольшую массу порядка 50 г и размеры датчика 34×37×37 мм.

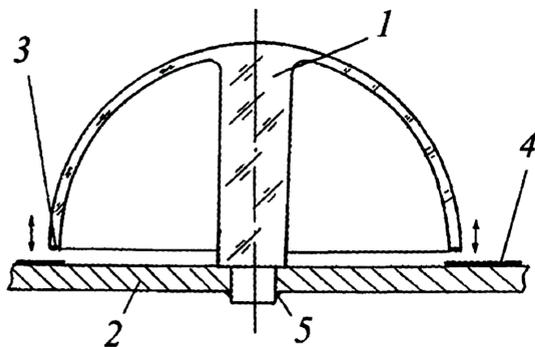


Рис. 3. ВТГ с плоским узлом электродов:
1 – резонатор; 2 – основание гироскопа;
3 – металлизированная поверхность резонатора;
4 – электрод; 5 – место соединения резонатора с основанием



Рис. 4. ВТГ-20 (HRG-Crystal™), разработанный компанией Safran Electronics&Defence

В статье [79] рассматривается зависимость добротности осесимметричной оболочки от свойств материала, рабочей температуры и размеров, позволяющих получить требуемую конфигурацию резонатора. По результатам изучения параметров чувствительного элемента предложена гибридная форма резонатора.

В [11, 14, 19, 21] описываются конструкция и технология изготовления ВГГ с цилиндрическими резонаторами. Особое внимание уделено балансировке, вакуумированию и калибровке прибора [23, 24, 34, 61].

Вопросы, связанные с конструкцией и технологией производства ВГГ с кольцевым резонатором изложены в работах [80, 81]. В гироскопах кроме магнитоэлектрических датчиков используются емкостные и пьезодатчики [82]. Кольцевой резонатор поддерживается внутренним или наружным подвесом. Материал резонатора ВГГ среди прочего характеризуется анизотропией упругих и диссипативных свойств, пренебрежение которой в случае монокристаллического резонатора может значительно увеличить погрешность гироскопа. В работе [17] показано, что при малом отклонении фактической плоскости среза кольца от главной плоскости монокристалла кремния возникает раздвоение частот колебаний, и стоячая волна начинает прецессировать при неподвижном основании прибора, вызывая тем самым дрейф гироскопа.

Балансировка кольцевого резонатора подробно рассматривается в [80]. Кольцевой резонатор удерживается торсионами, которые значительно снижают его добротность, поэтому ведутся работы по созданию высокодобротного миниатюрного симметричного резонатора без торсионов [25]. Для решения этой задачи развиваются следующие технологии: стеклодувная (на обычном стекле), высокотемпературная кварцевая стеклодувная, а также технология формирования алмазных микроструктур методом осаждения отдельных атомов [25, 83–86]. В [86] представлены последние разработки в области проектирования и изготовления полутороидальных оболочек из плавленного кварца (рис. 5). Собственная частота колебаний резонатора составляла 5 кГц, а добротность до 1,7 миллиона.

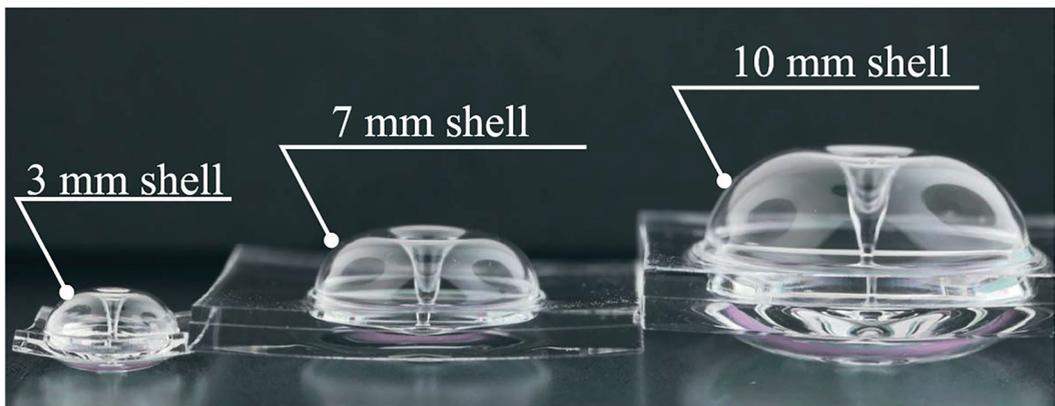


Рис. 5. Полутороидальные оболочки из плавленного кварца, изготовленные с использованием высокотемпературного процесса микровыдувания стекла

Наиболее подробно состояние и перспективы разработки волновых твердотельных микрогироскопов с резонатором в виде симметрической оболочки проанализированы в статье [25]. В настоящее время, как следует из публикаций, достаточно интенсивно работы в этом направлении ведутся в США [87, 88] и Китае [89, 90].

Алгоритмы управления, оценивания и идентификации

Повышение точности ВТГ возможно не только путем совершенствования технологии, но и с помощью алгоритмов управления колебаниями и фильтрации первичных измерительных сигналов.

Управление упругими колебаниями резонатора и измерение параметров волновой картины колебаний производится с помощью системы силовых и измерительных электростатических электродов. В электронном контуре прибора по измерениям функции нормального прогиба резонатора формируются медленно изменяющиеся переменные, посредством которых определяются параметры углового движения основания гироскопа, а также образуются обратные связи для управления и стабилизации формы упругих колебаний резонатора.

В [15, 16] рассматриваются вопросы, связанные с управлением и идентификацией. Показано, что высокоточный гироскоп может быть получен при введении обратных связей, позволяющих стабилизировать амплитуду колебаний на заданном значении, а квадратуру удерживать на нулевом уровне. Отмечается, что для повышения точности ВТГ необходимо решение обратной задачи механики по нахождению возмущающих сил по известному движению системы. Получены калибровочные уравнения гироскопа, позволяющие по наблюдению за его реакцией на вращение основания, гармонические сигналы возбуждения и управляющие воздействия определять дефекты конструкции прибора, его силовых и измерительных устройств.

Рассматриваются два основных алгоритма управления квадратурой в ВТГ. В одном алгоритме управление формируется в «медленном времени» в виде зависимости от медленных переменных. В другом – называемом управлением в «быстром времени» – формируется зависимость от нормального прогиба резонатора, изменяющегося с характерной частотой его второй основной формы колебаний. Сравнивалась эффективность предложенных алгоритмов управления. В настоящее время продолжают работы по совершенствованию алгоритма управления квадратурой с целью обеспечить наискорейший выход ВТГ на стационарный режим [91, 92].

В [93, 94, 95] рассматриваются вопросы, связанные с выявлением технологических дефектов при изготовлении резонатора ВТГ и их компенсации. В [93] предложено для определения разночастотности и разнодобротности резонатора использовать режим свободного выбега. В [94] рассмотрена схема управления, в которой к управляющим добавляются сигналы, компенсирующие разночастотность резонатора, получаемые путем интегрирования управляющих сигналов. При этом существенно снижается уровень динамических погрешностей. Показано, что полученные обратные связи по измерению параметров волновой картины колебаний не приводят к дополнительным уходам гироскопа при выполнении целей управления. Работа [95] посвящена вопросам устранения дрейфа, вызванного разнодобротностью резонатора.

В настоящее время ведутся исследования в области создания новых методов обработки измерительной информации ВТГ, учитывающих особенности его выходного сигнала и обеспечивающих заданную точность его оценки в условиях внутренних и внешних помех различной физической природы. В [96] применяются методы стохастической фильтрации, а в [97] предлагается использовать оптические датчики съема информации вместо емкостных.

В работах [19] и [98] рассматриваются внутренние контуры измерения и управления в ВТГ. В [99] анализируются методы компенсации дрейфа неидеального ВТГ посредством управления амплитудами и фазами напряжения на отдельных электродах. Обсуждается побочный эффект этого управления.

В [100, 101] описывается дрейф ВТГ с полусферическим резонатором и способы его компенсации. В [100] получена зависимость скорости дрейфа гироскопа от изменения резонансной частоты при учете влияния изменения температуры резонатора и угла упругой волны. Выполнен расчет остаточной скорости дрейфа гироскопа в запуске с применением алгоритмической компенсации, построенной на основе разработанной математической модели скорости дрейфа. В [101] определяется скорость дрейфа гироскопа при различной угловой ориентации упругой волны колебаний резонатора относительно основания прибора. Показано влияние величины угловой скорости основания гироскопа на скорость дрейфа. Предложен способ корректировки скорости дрейфа гироскопа, вызванной погрешностями выработки синфазных и квадратурных составляющих сигналов датчиков угла.

В [50] установлено, что при малом отклонении осей симметрии резонатора от осей кристалла возникают уходы гироскопа, пропорциональные параметрам анизотропии и волновой картины колебаний резонатора. Проанализировано влияние анизотропии материала на величину собственной частоты колебаний и погрешность измерений гироскопа. Предлагается алгоритм компенсации этой погрешности за счет датчиков управления [102].

В [10, 16, 17, 103–108] разработаны методики идентификации параметров математической модели ВТГ на основе уравнений, предложенных В.Ф. Журавлевым [16]. Для определения параметров гироскопа применяются режимы свободного выбега, вынужденного колебания и управляемой прецессии. В результате получают систему линейных уравнений относительно восьми искомых параметров, в том числе составляющих разночастотности и разнодобротности, коэффициента демпфирования, величины начального систематического ухода. При использовании режима вынужденных колебаний определяют дополнительно еще четыре параметра, характеризующие управляющее воздействие. В [105–108] показано, что при больших амплитудах колебаний резонатора введение в модель одного коэффициента, учитывающего нелинейность, позволяет значительно повысить ее адекватность. Для ВТГ среднего класса точности возможно применение его упрощенных математических моделей [19, 98].

Для идентификации параметров ВТГ в [109, 110] рассматриваются теоретические и прикладные вопросы его калибровки с помощью искусственных нейронных сетей. Чтобы повысить точность прибора, производится калибровка нулевого сигнала и масштабного коэффициента с учетом влияния температуры. Калибровка позволяет максимально ослабить воздействие температуры на масштабный коэффициент и его нелинейность, а также на смещение нуля. Влияние температуры учитывается алгоритмически [23]. Важным достижением разработчиков стало обеспечение автокалибровки дрейфа нуля и масштабного коэффициента в процессе эксплуатации ВТГ [2, 28, 111]. В отечественных приборах, как это следует из публикаций, указанный режим автокалибровки не реализован.

Компанией Safran Electronics and Defense был разработан инерциальный измерительный модуль нового поколения, состоящий из двух коллинеарных приборных триад из шести гироскопов ВТГ-20 и трех акселерометров. В циклическом режи-

ме функционирования три гироскопа обеспечивают решение задачи инерциальной навигации, в то время как другие три автокалибруются, что увеличивает точность инерциальной системы. Приведены следующие основные технические характеристики приборов с учетом самокалибровки [2]:

- 1) нестабильность коэффициента масштабирования – менее 1 ppm;
- 2) случайный дрейф угла – менее 10^{-4} град/ $\sqrt{ч}$;
- 3) стабильность смещения нуля – 10^{-5} град/ч.

Испытания показали, что наиболее значительно уменьшается дрейф нуля – с $5 \cdot 10^{-3}$ град/ч до 10^{-5} град/ч [2] по сравнению с гироскопами в классическом инерциальном измерительном модуле на базе одной триады из ВТГ-20. В приборостроительной компании Northrop Grumman также был разработан ВТГ с полусферическим кварцевым резонатором диаметром 30 мм. Эксперименты продемонстрировали, что смещение нуля уменьшилось в результате автокалибровки с 0,1 град/ч до 0,0005, т.е. в 200 раз [28]. Таким образом, использование автокалибровки позволяет снизить стабильность смещения нуля более чем на два порядка.

В 2012 году во Франции был построен завод для производства ВТГ-20. Объем выпуска постоянно растет и уже в 2017 году превысил 1000 инерциальных систем на основе ВТГ-20 [112].

В настоящее время ВТГ применяются для навигации, ориентации и управления движением подвижных объектов. На их базе созданы инерциальные измерительные модули и БИНС. Более подробные сведения об использовании ВТГ можно найти в работах [2, 4, 5].

Заключение

Представленный обзор современного состояния разработок и исследований ВТГ показывает, что теоретическая база его функционирования и проектирования развита всесторонне, накоплен большой практический опыт по созданию высокоточных датчиков, основанных на эффекте инерции упругих волн колебаний резонаторов. Вместе с тем необходимость большей точности при одновременном снижении массогабаритных характеристик и энергопотребления приборов, а также переход к новому технологическому укладу производства инерциальных чувствительных элементов ставит перед разработчиками ряд новых задач, решение которых позволит повысить точностные характеристики ВТГ на всех основных этапах проектирования и промышленного выпуска:

- создание достаточно точной математической модели, с помощью которой можно целенаправленно оптимизировать конструктивные параметры оболочечного резонатора, его системы управления и измерения колебаний;
- выявление основных факторов, влияющих на точность прибора, посредством аналитических и численных решений динамических задач резонатора ВТГ;
- проведение стендовых испытаний опытных образцов ВТГ в целях подтверждения адекватности математической модели гироскопа на подвижном основании и разработки методов алгоритмической и технологической компенсации погрешностей его изготовления и сборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
2. **Foloppe, Y., Lenoir, Y.**, HRG Crystal™ DUAL CORE: Rebooting the INS Revolution, *DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2019, pp. 1–24, doi: 10.1109/ISS46986.2019.8943660.
3. **Rozelle, D.M.**, The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets, *Proc. 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2009, 134, pp. 1157–1178.
4. **Переляев С.Е.** Обзор и анализ направлений создания бесплатформенных инерциальных навигационных систем на волновых твердотельных гироскопах // Новости навигации. 2018. № 2. С. 21–27.
5. **Переляев С.Е.** Современное состояние и научно-технический прогноз перспектив применения зарубежных волновых твердотельных гироскопов (Аналитический обзор по зарубежным материалам) // Новости навигации. 2020. № 3. С. 14–28.
6. **Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А.** Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. М.: Физматлит, 2008. 239 с.
7. **Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Лопатин В.М., Чупров В.П.** Разработка и испытание волнового твердотельного гироскопа для использования в инклинометрической системе // Гироскопия и навигация. 2001. № 3 (34). С. 74–82.
8. **Делэйе Ф.** Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute® для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №4. С. 3–13. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013.
9. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. Тула: Гриф и К., 2004. 476 с.
10. **Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В.** Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. 167 с.
11. **Распопов В.Я., Волчихин И.А. и др.** Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / под ред. В.Я. Распопова. Тула: ТулГУ, 2018. 189 с.
12. **Распопов В.Я., Ершов Р.В.** Волновые твердотельные гироскопы с кольцевым резонатором // Датчики и системы. 2009. № 5. С. 61–72.
13. **Лунин Б.С.** Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. Москва: Изд-во МАИ, 2005, 224 с.
14. **Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А.** Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.
15. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.
16. **Климов Д.М., Журавлев В.Ф., Жбанов Ю.К.** Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотельный гироскоп). М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2017. 194 с.
17. **Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. М.: Физматлит, 2009. 228 с.
18. **Басараб М.А., Кравченко В.Ф., Матвеев В.А.** Математическое моделирование физических процессов в гироскопии. М: Радиотехника, 2005. 176с.
19. **Шишаков К.В.** Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. 264 с.
20. **Мачехин П.К., Назаров С.Б., Трутнев Г.А.** Способ и система компенсации дрейфа твердотельного волнового гироскопа. Патент 2619815 РФ, опублик. 2017.
21. **Wu, X. et al.**, *Cylindrical Vibratory Gyroscope*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021, 202 p., <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2726-2>.
22. **Волчихин И.А., Волчихин А.И., Малютин Д.М. и др.** Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 9. Ч. 2. С. 59–78.
23. **Распопов В.Я., Алалуев Р.В., Ладонкин А.В. и др.** Настройка и калибровка волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором, работающего в режиме датчика угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №1 (108). С. 31–41. DOI 10.17285/0869-7035.0019.
24. **Матвеев В.В.** Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 377–384.
25. **Ranji, AR, Damodaran, V., Li, K., Chen, Z., Alirezaee, S., Ahamed, M.J.**, Recent Advances in MEMS-Based 3D Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG)-A Sensor of Choice, *Micromachines (Basel)*, 2022 Oct. 5; 13(10):1676, doi: 10.3390/mi13101676.
26. **Мейер Д., Розелле Д.** Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. № 3. С. 45–54.

27. Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4. С. 24–34.
28. Meyer, A.D., Rozelle, D.M., Trusov, A.A., Sakaida, D.K, Milli-HRG Inertial Sensor Assembly – a Reality, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Monterey, CA, April 2018, pp. 20–23.
29. Тимошенко С.П., Анчутин С.А., Плеханов В.Е. и др. Разработка математического описания кольцевого микрогироскопа // Нано- и микросистемная техника. 2014. Т. 5. С. 18–25.
30. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Шлеёнкин Л.А., Коробков К.А., Булычев Р.П. Разработка алгоритма подавления расщепления частот осесимметричного резонатора волнового твердотельного гироскопа с оптическим детектированием // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 29–34. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-10-29-34.
31. Северов Л.А., Пономарев В.К., Панферов А.И., Овчинникова Н.А. Структура и характеристики волнового микромеханического датчика угловой скорости с кольцевым резонатором // Гироскопия и навигация. 2014. №3. С. 59–72.
32. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Требухов А.В., Некрасов А.В. Нейросетевой алгоритм калибровки волнового твердотельного гироскопа // Инженерная физика. 2010. №9. С. 13–20.
33. Бодунов Б.П., Лопатин В.М., Лунин Б.С. Способ балансировки полусферического резонатора волнового твердотельного гироскопа. Патент 2147117 РФ, опубл. 2000.
34. Басараб М.А., Лунин Б.С., Чуманкин Е.А. Балансировка металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов общего применения // Динамика сложных систем – XXI век. 2021. Т. 15. № 1. С. 58–68.
35. Ермаков Р.В., Кондратов Д.В., Львов А.А., Серанова А.А. Исследование вибрационной погрешности волнового твердотельного гироскопа // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 236–238.
36. Hopkin, I.D. et al., Patent 005932804A (USA), Vibrating structure gyroscope, 1999.
37. Lynch, D., Matthews, A., Vibratory rotation sensor, Patent EP 0881464, 1998.
38. Журавлев В.Ф., Переляев С.Е. Волновой твердотельный гироскоп – инерциальный датчик нового поколения с комбинированным режимом функционирования // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. №1. С. 425–431.
39. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Владимиров В.А., Игонин А.Н., Костенок Н.А. Твердотельный волновой гироскоп двухрежимной работы для космоса // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2013. С. 145–146.
40. Климов Д.М., Журавлев В.Ф., Переляев С.Е., Алехин А.В. Способ считывания и управления колебаниями волнового твердотельного гироскопа. Патент 2704334 РФ, опубл. 2019.
41. Переляев С.Е. Принципиальные вопросы теории комбинированных свободных гироскопов, функционирующих на двух рабочих модах // Изв. РАН. МТТ. 2021. № 4. С. 64–76.
42. Переляев С.Е., Скрипкин А.А. Пространственный интегрирующий твердотельный волновой гироскоп. Патент 2144431 РФ, опубл. 2021.
43. Loper, E., Lynch, D.D., The HRG: a new low-noise Inertial Rotation Sensor, *Proc. 16th Joint Services Data Exchange for Inertial Systems*, Los Angeles, USA, 16–18 Nov. 1982, pp. 432–433.
44. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Пространственный эффект инертности упругих волн на сфере // Изв. РАН. МТТ. 2021. №3. С. 3–6. DOI: 10.31857/S0572329921030144.
45. Линч Д.Д. Разработка HRG в Delco, Litton и Northrop Grumman // Материалы юбилейного семинара по твердотельной гироскопии. Киев-Харьков: АТС Украины, 2009.
46. Климов Д.М. О движении упругого нерастяжимого кольца // Изв. РАН. МТТ. 2021. №6. С. 55–56. DOI: 10.3103/S002565442106008X.
47. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Исследование стационарных режимов колебаний резонатора гироскопа при наличии позиционного и сопутствующего ему параметрического возбуждения // Гироскопия и навигация. 2014. №2 (85). С. 61–69.
48. Wei, Z., Yi, G., Huo, Y., Qi, Z., Xu, Z., The Synthesis Model of Flat-Electrode Hemispherical Resonator Gyro, *Sensors*, 2019, 19, 1690, doi: 10.3390/s19071690.
49. Мартыненко Ю.Г., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Управление нелинейными колебаниями вибрационного кольцевого микрогироскопа // Изв. РАН. МТТ. 2008. №3. С. 77–89.
50. Egarmin, N.E., Yurin, V.E., *Introduction to the theory of vibratory gyroscopes*, Moscow, BinomCo, 1993, 111 p.

51. **Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В.** Нелинейные эффекты в динамике цилиндрического резонатора волнового твердотельного гироскопа с электростатической системой управления // Гироскопия и навигация. 2015. №2 (88). С. 71–80. DOI 10.1134/S2075108715030104.
52. **Маслов Д.А., Меркурьев И.В.** Влияние нелинейных свойств электростатических датчиков управления на динамику цилиндрического резонатора волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. МТТ. 2021. № 6. С. 88–110. DOI: 10.3103/S002565442106011X
53. **Maslov, A.A., Maslov, D.A., Merkurjev, I.V., Podalkov, V.V.,** Dynamics of the Ring Micromechanical Gyroscope Taking into Account the Nonlinear Stiffness of the Suspension, *26th St. Petersburg International International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2019, pp. 361–364, doi: 10.23919/ICINS.2019.8769369.
54. **Нарайкин О.С., Сорокин Ф.Д., Козубняк С.А., Вахлярский Д.С.** Численное моделирование прецессии упругой волны в цилиндрическом резонаторе волнового твердотельного гироскопа с неоднородным распределением плотности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 5. С. 41–51. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-41-51.
55. **Вахлярский Д.С., Гуськов А.М., Басараб М.А., Матвеев В.А.** Численное исследование резонаторов ВТГ различной формы при наличии дефектов различного типа // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. №10. С. 1–22.
56. **Maslov, A.A., Maslov, D.A., Merkurjev, I.V., Podalkov, V.V.,** Scale Factor of the Wave Solid-State Gyroscope Operating in the Angular Velocity Sensor Mode, *29th St. Petersburg International International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2022, pp. 226–229, doi: 10.23919/ICINS51784.2022.9815350.
57. **Журавлев В.Ф., Измайлов Е.А.** Анализ условий, порождающих дрейф волнового твердотельного гироскопа // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2001. С. 67–74.
58. **Жбанов Ю.К., Журавлев В.Ф.** О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Изв. АН. МТТ 1998. №4. С 4–16.
59. **Жбанов Ю.К., Калёнова Н.В.** Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. МТТ. 2001. № 3. С. 11–18.
60. **Калёнова Н.В.** Определение параметров поверхностного дебаланса резонатора волнового твердотельного гироскопа по его реакции на угловую вибрацию основания // Изв. РАН. МТТ. 2004. №2. С. 3–7.
61. **Козубняк С.А.** Расщепление собственных частот цилиндрического резонатора твердотельного волнового гироскопа, вызванное возмущением формы // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 3 (102). С. 39–49.
62. **Нарайкин О.С., Сорокин Ф.Д., Козубняк С.А.** Расщепление собственных частот кольцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа, вызванное возмущением формы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. №6 (6). С. 48.
63. **Нарайкин О.С., Сорокин Ф.Д., Козубняк С.А., Вахлярский Д.С.** Численное моделирование прецессии упругой волны в цилиндрическом резонаторе волнового твердотельного гироскопа с неоднородным распределением плотности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. № 5 (116). С. 41–51.
64. **Баранов П.Н. и др.** Устройство для автоматической балансировки резонатора твердотельного волнового гироскопа лучом лазера. Патент РФ2079107, 1997.
65. **Лунин Б.С., Басараб М.А., Матвеев В.А., Чуманкин Е.А.** Способ балансировки кварцевого полусферического резонатора волнового твердотельного гироскопа. Патент 2580175РФ, опубл. 2016.
66. **Басараб М.А., Лунин Б.С., Матвеев В.А., Чуманкин Е.А.** Балансировка полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов // Гироскопия и навигация. 2015. №1. (88). С. 61–70. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.061-070.
67. **Лунин Б.С., Басараб М.А., Юрин А.В., Чуманкин Е.А.** Цилиндрический резонатор из кварцевого стекла для недорогих вибрационных гироскопов // XXV Санкт-Петербургская международная конференции по интегрированным навигационным системам. 2018. С. 204–207.
68. **Zeng, L., Luo, Y., Pan, Y., Jia, Y., Liu, J., Tan, Z., Yang, K., Luo, H.,** A 5.86 Million Quality Factor Cylindrical Resonator with Improved Structural Design Based on Thermoelastic Dissipation Analysis, *Sensors (Basel)*, 2020 Oct 22; 20(21):6003, doi: 10.3390/s20216003.
69. **Tao, Y., Pan, Y., Liu, J., Jia, Y., Yang, K., Luo, H.,** A Novel Method for Estimating and Balancing the Second Harmonic Error of Cylindrical Fused Silica Resonators, *Micromachines (Basel)*, 2021 Apr. 1;12(4):380, doi: 10.3390/mi12040380.

70. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Миколишин И.Т.** Результаты испытаний кориолисового вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность к вибрации и удару // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2009. С. 83–88.
71. **Маслов А.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В.** Исследование вибрационных и ударных внешних воздействий на динамику микромеханического гироскопа // XXII Санкт-Петербургская международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2015. С. 286–287.
72. **Серанова А.А., Ермаков Р.В., Львов А.А. и др.** Метод исследования инерциальных датчиков МЭМС-типа, предназначенных для эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа при воздействии на них синусоидальной вибрации // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. №3.
73. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М.** Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния температурных и технологических погрешностей волнового твердотельного датчика инерциальной информации // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 3. С. 55–63.
74. **Журавлёв В.Ф.** Температурный дрейф волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) // Изв. РАН. МТТ. 2018. №3. С. 3–11.
75. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Барабашов А.С. и др.** Оптимизация теплофизических параметров КВГ с металлическим резонатором и результаты температурных испытаний // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2007. С. 71–75.
76. **Измайлов Е.А., Колесник М.М., Осипов А.М., Акимов А.В.** Технология волнового твердотельного гироскопа. Проблемы и возможные пути их решения // Гироскопия и навигация. 1999. №4 (27). С. 83–96.
77. **Jeanroy, A., Leger, P.** Capteur gyroskopique et appareil de mesure de rotation en comportant application. Патент Франции. G01C 19/56. FR 2792722 (1999).
78. **Лукин Б.С.** Чувствительный элемент волнового твердотельного гироскопа. Патент РФ. 7G01C 19/56. RU 2166734 (2000).
79. **Шарма Н.Г., Сундарараджан Т., Сингх Г.С.** Гибридный резонатор твердотельного волнового гироскопа с высокой добротностью: конструкция с использованием термоупругого демпфирования, исследование чувствительности и определение характеристик // Гироскопия и навигация. 2021. Том 29. №1 (112). С. 70–96. DOI 10.17285/0869-7035.0057.
80. **Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Бритков О.М. и др.** Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления // Известия вузов. Электроника. 2015. Том 20, № 1. С. 58–67.
81. **Косторной А.Н., Коновалов С.Ф.** Совмещение собственных резонансных частот кольцевого резонатора КМГ // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №2. С. 3–11.
82. **Бекмачев А.Е.** МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии // Компоненты и технологии. 2014. №4. С. 18–26.
83. **Eklund, E.J., Shkel, A.M.**, Self-inflated micro-glass blowing, US Patent № 8151600 B2, 2008.
84. **Zotov, S.A., Trusov, A.A., Shkel, A.M.**, Three-Dimensional Spherical Shell Resonator Gyroscope Fabricated Using Wafer-Scale Glassblowing, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, pp. 1–2.
85. **Senkal, D. et al.**, Demonstration of 1 million Q -factor on microglassblown wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(1), pp. 29–37, no. 6955708.
86. **Asadian, M.H., Wang, Y., Shkel, A.M.**, Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(6), pp. 954–964, no. 8884648.
87. **Asadian, M.H., Wang, D., Wang, Y., Shkel, A.M.**, 3D Dual-Shell Micro-Resonators for Harsh Environments, *Proceedings of the 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Portland, OR, USA, 20–23 April 2020. [Google Scholar].
88. **Asadian, M.H., Wang, D., Shkel, A.M.**, Fused quartz dual-shell resonator gyroscope, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2022, 31, 533–54.
89. **Sun, J., Yu, S., Xi, X., Lu, K., Shi, Y., Wu, X., Xiao, D., Zhang, Y.**, Investigation of Angle Drift Induced by Actuation Electrode Errors for Whole-Angle Micro-Shell Resonator Gyroscope, *IEEE Sens. J.*, 2022, 22, 3105–3112.

90. Li, C., Wang, Y., Ahn, C.K., Zhang, C., & Wang, B., Milli-Hertz Frequency Tuning Architecture Towards High Repeatable Micromachined Axi-Symmetry Gyroscopes, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 1–10, <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3192672>.
91. Журавлёв В.Ф. О формировании обратных связей в пространственном осцилляторе Ван дер Поля // Прикладная математика и механика. 2020. Т. 84, № 2. С. 151–157. DOI: 10.31857/S0032823520010105.
92. Переляев С.Е., Бодунов С.Б., Бодунов Б.П. Волновой твердотельный гироскоп авиационно-космического применения навигационного класса точности // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2022. С. 172–175.
93. Жбанов Ю.К. Контур управления амплитудой в волновом твердотельном гироскопе с автоматической компенсацией разнородности // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 3. С. 17–22.
94. Жбанов Ю.К., Журавлев В.Ф. Влияние подвижности центра резонатора на работу волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН. МТТ. 2007. № 6. С. 14–24.
95. Жбанов Ю.К. Самонастраивающийся контур подавления квадратуры в волновом твердотельном гироскопе // Гироскопия и навигация. 2007. №2. С. 37–43.
96. Шаталов А. Б., Соколов С.В., Погорелов В.А., Гашененко И.Н. Высокоточная оценка параметров колебания резонатора волнового твердотельного гироскопа с использованием методов стохастической фильтрации // Изв. РАН. МТТ. 2022. №1. С. 145–152. DOI 10.31857/S057232992201010X.
97. Бусурин В.И., Фам А.Т., Коробков В.В., Медведев В.М., Жеглов М.А. Методика расчета одноосевого микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей // Вестник ЮУрГУ. 2018. Т. 18. №2. С. 93–102. DOI 10.14529/ctcr180209.
98. Трутнев Г.А., Перевозчиков К.К., Назаров С.Б. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2020. №1. С. 50–63. DOI: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63.
99. Шаталов М., Кетце Ш., Джуберт С.В. Динамика неидеального полусферического волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. №2. 2010. С. 16–28.
100. Редькин С.П. Математическая модель температурной скорости дрейфа твердотельного волнового гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 9–13.
101. Редькин С.П. Погрешности интегрирующего твердотельного волнового гироскопа от ошибок выработки составляющих сигналов ДУ // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 6. С. 23–30.
102. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Компенсация уходов волнового твердотельного гироскопа, вызванных анизотропией упругих свойств монокристаллического резонатора // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 25–36. DOI 10.1134/S2075108720030050.
103. Жбанов Ю.К. Определение качества резонатора волнового твердотельного гироскопа по эволюции его свободных колебаний // XII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2005. С. 225–227.
104. Гавриленко А.Б., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Экспериментальные методы определения параметров вязкоупругой анизотропии резонатора волнового твердотельного гироскопа // Вестник МЭИ. 2010. № 5. С. 13–19.
105. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа с учетом нелинейности колебаний резонатора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №5. С. 18–23.
106. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Способ определения параметров волнового твердотельного гироскопа. Патент 2544308(РФ), 2015. Бюл. №14.
107. Маслов А.А., Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Учет нелинейности колебаний резонаторов при идентификации параметров волновых твердотельных гироскопов разных типов // Изв. РАН. МТТ. 2022. №6. С. 28–40. DOI: 10.3103/S0025654422060073.
108. Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Компенсация погрешностей и учет нелинейности колебаний вибрационного кольцевого микрогироскопа в режиме датчика угловой скорости // Нелинейная динамика. 2017. Т. 13. №2. С. 227–241. DOI: 10.20537/nd1702006.
109. Basarab, M., Ivanov, I., Lunin, B., Neural Network Algorithm for Forecasting and Parameter Estimation of the Coriolis Vibratory, *28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2021, p. 9470798.
110. Бабиченко А.В., Некрасов А.В. Математические модели нейронных сетей в задачах пилотажно-навигационного комплекса // Авиакосмическое приборостроение. №11. 2008. С. 33–41.

111. **Trusov, A.A. et al.**, Continuously self-calibrating CVG system using hemispherical resonator gyroscopes, *2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), Proceedings*, Napuna Beach, HI, USA, 23–26 March 2015, doi 10.1109/ISISS.2015.7102362.
112. **Deleaux, B., Lenoir, Y.**, The world smallest, most accurate and reliable pure inertial navigator: ONXY, *Inertial Sensors and Systems*, Braunschweig, Germany, 2018
-

Maslov, A.A., Maslov, D.A., Ninalalov, I.G., and Merkuryev, I.V. (Moscow Power Engineering Institute, Russia)

Hemispherical Resonator Gyros. An Overview of Publications, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 1 (120), pp. 3–25.

Abstract. The paper describes the current state of development of hemispherical resonator gyros (HRG). HRG is becoming the most perspective gyro for navigation systems of different applications. Its unique performance has made it a sensor of choice for the space industry. The gyro ensures high navigation accuracy while featuring smaller cost and size as compared to the ring laser and fiber-optic gyros. Multiple publications have been devoted to the HRG research and development. We provide a brief overview of publications describing the current state of the HRG technology and its further improvement and application.

Key words: hemispherical resonator gyro, resonator, hemispherical, cylindrical, ring, balancing, autocalibration.

Материал поступил 19.11.2022