

УДК 531.383, 534.08, 519.876

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72

*Г. А. Трутнев, соискатель**С. Б. Назаров, соискатель**К. К. Перевозчиков, соискатель**А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор**ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ВОЛНОВОЙ ГИРОСКОП»

В статье идет речь об измерительном приборе – твердотельном волновом гироскопе. Работа прибора основана на эффекте инертности стоячих волн. Твердотельный волновой гироскоп рассматривается с двух сторон: как самостоятельный измерительно-вычислительный комплекс и как датчик некоторой инерциальной системы. Структура твердотельного волнового гироскопа представлена в виде взаимосвязанных элементов: резонатор, измерительная компонента, управляющая компонента, вычислительная компонента. Анализируется структура прибора, рассматриваются его подсистемы и их связи. Исследуются различные типы конструкций резонатора, вопросы математического моделирования резонатора. Рассматриваются явления, ухудшающие точность прибора, такие как дрейф волны, нелинейность и шум выходного сигнала. Анализируются причины появления дрейфа. Одна из основных причина дрейфа – конструкционное демпфирование. Изучаются вопросы моделирования резонатора с учетом конструкционного демпфирования. Описываются различные типы датчиков и систем съема на их основе. Рассматривается измерительная компонента как система для наблюдения эффекта Брайана. Обосновывается необходимость формирования сигналов в системе съема для дополнительного наблюдения деформации резонатора в месте крепления. Рассматриваются вопросы управления динамикой резонатора. Приводятся различные контуры управления, которые позволяют получить необходимые характеристики прибора. Описываются точностные параметры. Анализируются зависимости точностных параметров твердотельного волнового гироскопа от различных факторов. Описываются направления повышения точности твердотельного волнового гироскопа и систем на его основе. Ставится общая задача повышения точности прибора за счет учета конструкционного демпфирования в модели резонатора, измерения величин, характеризующих конструкционное демпфирование, и решения задачи редукации ТВГ к идеальному измерительному прибору.

Ключевые слова: измерительный прибор, твердотельный волновой гироскоп, измерительная компонента, управляющая компонента, вычислительная компонента, модель твердотельного волнового гироскопа, редукация к идеальному измерительному прибору.

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) – измерительный прибор, работа которого основана на инертных свойствах стоячих волн (эффект Брайана). Основные модели и этапы разработки ТВГ описаны в книгах [1–8] и статьях [9, 15, 16, 31]. Современное состояние теории разработки ТВГ рассматривается в статьях [18, 20, 22, 23, 25–28, 30, 34]. Важным аспектом в производстве является улучшение характеристик резонатора, в частности балансировка, данное направле-

ние исследуется в статьях [10–12, 17, 29]. Разные авторы рассматривают погрешности ТВГ и способы увеличения точности с помощью системы управления и компенсации в работах [13, 14, 19, 21, 24, 32, 33, 35–37]. Недостаточно подробно в литературе по ТВГ рассмотрен вопрос о системе съема ТВГ [9, 13, 32].

ТВГ следует рассматривать на двух уровнях: как самостоятельную измерительную систему и составную часть некоторой

измерительной системы, например бесплатформенной инерциальной навигационной системы. В первом случае актуальной задачей является увеличение точности выходного значения ТВГ. Во втором случае ТВГ – это составная часть измерительной аппаратуры в составе измерительно-вычислительной системы, и в этом случае важно увеличить точность всей системы, что не эквивалентно задаче повышения точности ТВГ [38]. Улучшить точностные характеристики измерительной системы можно с помощью математической модели и математических методов обработки сигналов [40–41].

В зависимости от режима работы ТВГ работает как датчик угла поворота либо как датчик угловой скорости, могут использоваться и комбинированные режимы. Обозначим как I – идеальное измерительное устройство проекции угловой скорости на одну ось, которое в каждый момент времени ставит в соответствие физической величине Ω^* числовое значение Ω . Здесь и далее будем помечать физические величины звездочкой, при обозначении их цифровых или математических аналогов знак звездочки опускается. Будем считать, что ТВГ выдает информацию об интеграле проекции угловой скорости на ось прибора за время его работы. Реальный измерительный прибор, в частности ТВГ, характеризуется некоторыми параметрами $\delta \in R^n$ – погрешностями, которые ухудшают точность измерения:

$$\begin{aligned} I(\Omega) &= \Omega, \Delta\alpha(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \\ HRG(\Omega(t), \delta(t)) &= \Delta\alpha_{hrg}(t), \\ HRG(\Omega(t), 0) &= \Delta\alpha(t), \\ \|\Delta\alpha(t) - \Delta\alpha_{hrg}(t)\| &\neq 0, \end{aligned}$$

где норма может быть выбрана в зависимости от целей использования прибора и класса $\Omega(t)$. В качестве нормы можно взять максимум по t за все ограниченное время T работы прибора:

$$\|\cdot\| = \max_{t \in [0...T]} (|\Delta\alpha(t) - \Delta\alpha_{hrg}(t)|).$$

Класс функций $\Omega \in B[0...T]$ определим следующим образом:

1. $\max_{t \in [0...T]} |\Omega(t)| \leq \Omega_m$.
2. $\Omega(t)$ непрерывная, может иметь конечное число точек «излома».
3. $\max_{t \in [0...T]} |\Omega(t)| \leq \varepsilon_m$.
4. $\Omega(t)$ – кусочно-непрерывна справа функция, имеющая конечное число точек разрыва.
5. $\Omega(t)$ ограничена в частотной области:

$$\begin{aligned} c(\omega_k) &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{-i\omega_k t} \Omega(t) dt, \\ \omega_k &= \frac{2\pi k}{T}, \forall \omega_k > \omega_0, \\ c(\omega_k) &= 0, \\ \forall \omega_k \leq \omega_0 \quad |c(\omega_k)| &\leq c_0. \end{aligned}$$

Рассмотрим ТВГ как самостоятельный прибор. ТВГ является сложной системой, в состав которой входят резонатор, измерительная, вычислительная и управляющая компоненты. На рис. 1 приводится общая структура ТВГ, где x – вектор состояния волновой картины; θ – угловая ориентация рабочей волны; y – сигналы системы съема (токи или напряжения); Δ – сигналы рассогласования; u – управляющие сигналы (токи или напряжения); $\Delta\alpha$ – выходное значение интеграла угловой скорости за время работы прибора.

Каждая часть выполняет свою функцию.

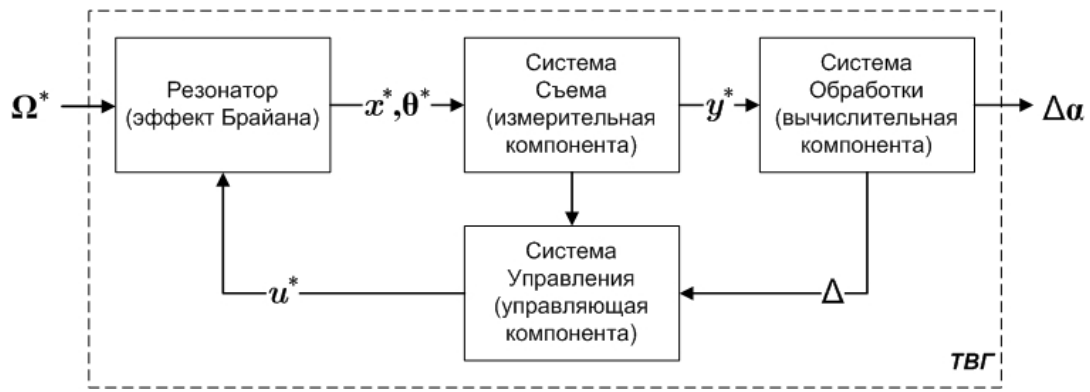


Рис. 1. Структурная схема ТВГ

Резонатор – динамическая система, в которой реализуется эффект Брайана. Известны различные конструкции резонаторов с осевой симметрией: полусферические, цилиндрические, конические и другие. На рис. 2 и 3 приведены примеры резонаторов:

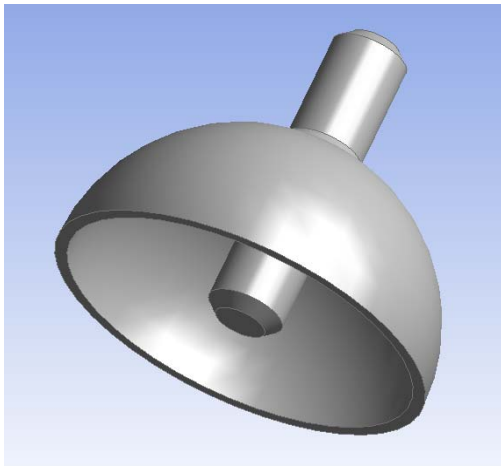


Рис. 2

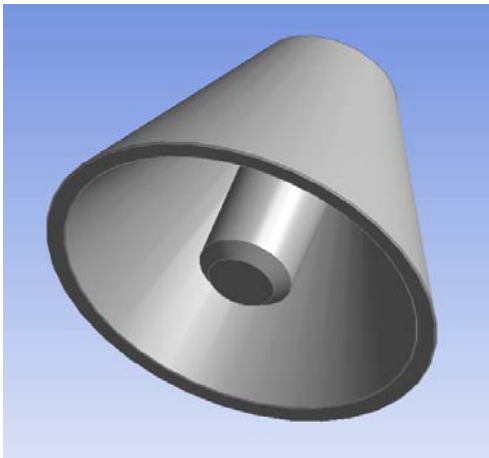


Рис. 3

Математическая модель резонатора представляется системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]:

$$\begin{aligned}
 w &= w(\varphi, \psi, t), \quad u = u(\varphi, \psi, t), \\
 v &= v(\varphi, \psi, t), \quad \delta = \delta(\varphi, \psi, t), \quad \Omega = \Omega(t), \\
 F \left(w, u, v, \delta, \Omega, \frac{\partial w}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \right. \\
 &\left. \frac{\partial w}{\partial \varphi}, \frac{\partial w}{\partial \psi}, \frac{\partial u}{\partial \varphi}, \frac{\partial u}{\partial \psi}, \frac{\partial v}{\partial \varphi}, \frac{\partial v}{\partial \psi}, \dots, \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4}, \dots \right) = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где вектор-функция $F \in C^\infty$ в некоторой окрестности нуля; φ, ψ – сферические координаты; w, u, v – компоненты перемещения точки на поверхности резонатора в соответствующих сферических координатах; δ – инструментальные погрешности и неоднородности материалов в соответствующих сферических координатах; Ω – проекция угловой скорости на ось резонатора. Система дифференциальных уравнений для полусферической оболочки для случая малых и медленно меняющихся угловых скоростей состоит из трех линейных уравнений относительно w, u, v и имеет четвертый порядок (уравнение не приводится ввиду громоздкости). К уравнению (1) добавляют граничные условия, характеризующие место заделки, и начальные условия, описывающие начальную деформацию. Данная задача рассматривается в условиях малых деформаций.

Математическая модель резонатора (упругие колебания) относится к классу действительных линейных дифференциальных уравнений, является достаточно сложной, в зависимости от целей использования модель приводят к более удобному виду, упрощая влияние малозначимых факторов. Для случая $\delta(\varphi, \psi, t) = 0$ и заданных начальных и граничных условий система дифференциальных уравнений имеет единственное решение, которое может быть найдено.

Идеальный резонатор является упругой осесимметричной оболочкой со счетным спектром парных резонансных частот. Конфигурация волны определяется функциями $w(\varphi, \psi, t)$, $u(\varphi, \psi, t)$, $v(\varphi, \psi, t)$ и складывается из перемещений на собственных модах на резонансных частотах [39]:

$$w(\varphi, \psi, t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k(t) \cdot W_k(\psi, \varphi),$$

$$u(\varphi, \psi, t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k(t) \cdot U_k(\psi, \varphi),$$

$$v(\varphi, \psi, t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k(t) \cdot V_k(\psi, \varphi),$$

где W_k, U_k, V_k – собственные функции, определяющие моды колебаний. В области, на которой ищется решение (1), собствен-

ные моды обладают свойством ортогональности. Конфигурацию волны можно определить следующим образом: $x = (A_1, A_2, A_3, \dots) \in O \subset R^\infty$, где A_k – амплитуда k -й собственной моды; O – некоторая окрестность нуля. Для идеального резонатора одной частоте соответствуют две моды определенной формы, которые при сложении формируют стоячую волну. На рис. 4 приведена вторая форма колебаний. Релеевское приближение второй формы описывается следующими формулами [5]:

$$\begin{aligned} w(\varphi, \psi, t) &= \\ &= \frac{A}{2} (2 + \cos \psi) \tan^2 \frac{\Psi}{2} \cos 2(\varphi - \varphi_0) \sin \omega(t - t_0) + \\ &+ \frac{B}{2} (2 + \cos \psi) \tan^2 \frac{\Psi}{2} \sin 2(\varphi - \varphi_0) \cos \omega(t - t_0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(\varphi, \psi, t) &= \\ &= \frac{A}{2} \sin \psi \tan^2 \frac{\Psi}{2} \cos 2(\varphi - \varphi_0) \sin \omega(t - t_0) + \\ &+ \frac{B}{2} \sin \psi \tan^2 \frac{\Psi}{2} \sin 2(\varphi - \varphi_0) \cos \omega(t - t_0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v(\varphi, \psi, t) &= \\ &= \frac{A}{2} \sin \psi \tan^2 \frac{\Psi}{2} \sin 2(\varphi - \varphi_0) \sin \omega(t - t_0) - \\ &- \frac{B}{2} \sin \psi \tan^2 \frac{\Psi}{2} \cos 2(\varphi - \varphi_0) \cos \omega(t - t_0). \end{aligned}$$

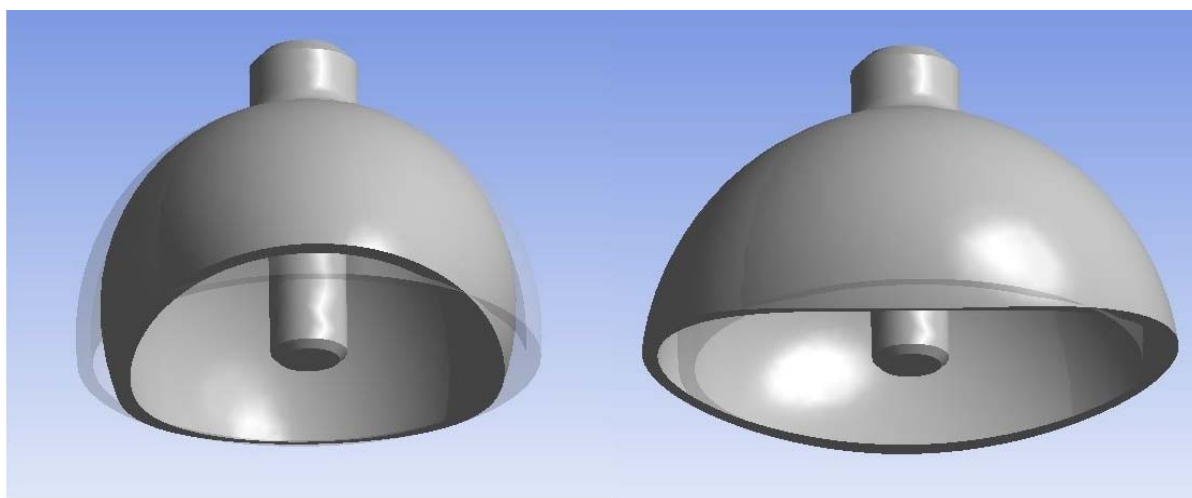


Рис. 4

В реальном резонаторе из-за неоднородностей материала, инструментальных погрешностей осесимметричность нарушается, что приводит к расщеплениям частот мод одной формы.

Любая стоячая волна в резонаторе может служить источником инерциальной информации. Система управления ТВГ формирует и поддерживает амплитуду некоторой рабочей формы колебания. Возможны варианты, при которых в резонаторе формируются волны нескольких форм, каждая из которых будет являться самостоятельным информационным каналом об угле поворота. Чаще всего используется наименьшая изгибная форма колебаний – вторая.

Преобразование Ω^* в x^* , осуществляемое стоячей волной второй формы, находится как решение системы, описывающей динамику резонатора. Для идеальной системы $\delta(t) = 0$ без управления и с постоянной скоростью вращения $\Omega(t) = \Omega_0 = \text{const}$ решение будет:

$$\begin{aligned} w_1(t) &= w(0, \pi/2, t) = \\ &= C \cdot \cos(2K\Omega_0 t - \varphi) \cdot \sin(\omega t - t_0), \\ w_2(t) &= w(\pi/4, \pi/2, t) = \\ &= C \cdot \sin(2K\Omega_0 t - \varphi) \cdot \sin(\omega t - t_0), \end{aligned}$$

где C , φ , t_0 зависят от начальных условий. Проводя демодуляцию сигналов $w_1(t)$, $w_2(t)$ и рассчитывая отношения амплитуд этих сигналов, находят значение углового положения волны, которое является источником информации об угле поворота ТВГ:

$$\Delta\theta = 2K\Omega_0 \Delta t.$$

Для идеальной полусферической оболочки и идеальной системы съема реализуется физический принцип (эффект Брайана), который описывается формулой [1]:

$$\theta(t) = \frac{2 + \nu - \sqrt{(2 + \nu)^2 + 4k^2(1 - \nu)}}{2k^2(1 - \nu)} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau,$$

где Ω – угловая скорость; θ – угловая ориентация волны; k – номер формы колебаний (равный половине числа узлов на кольце); ν – коэффициент Пуассона. Входная угловая скорость $\Omega(t)$ принадлежит некоторому классу функций. Обычно угловая скорость считается непрерывно дифференцируемой, ограниченной некоторым значением функцией, а также имеет ограниченную некоторым значением производную (угловое ускорение). Также часто есть ограничения на частотные характеристики $\Omega(t)$.

Эффект Брайана в общем случае не реализуется в чистом виде. В реальном резонаторе всегда присутствуют неоднородности материала, инструментальные погрешности изготовления, напряжения и т. д. Скорость изменения стоячей волны будет зависеть не только от внешних моментов, но и от внутренних:

$$\dot{\theta}(t) = K \cdot \Omega(t) + \dot{D}(t),$$

где K – масштабный коэффициент (в идеальном случае равен $-0,312$); D – дрейф волны. Дрейф во многом определяет класс точности всего прибора, и важным аспектом, который необходимо учитывать в модели резонатора для понимания дрейфа, является конструктивное демпфирование [3]. Рассеивание энергии в первую очередь происходит в месте крепления резонатора. При наличии упруго-массовых дефектов в резонаторе кроме основной волны появляются силы, вызывающие деформации ножки и, как следствие, отток энергии. При моделировании работы резонатора целесообразно учитывать деформации резонатора в месте заделки, а при обработке сигналов использовать измеренные данные о деформациях в месте заделки. Иллюстрацией конструктивного демпфирования может служить простая механическая модель (рис. 5).

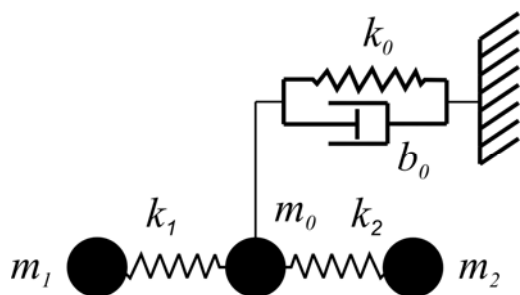


Рис. 5

Массы m_1 , m_2 , пружины k_1 и k_2 являются аналогами сферы резонатора, масса m_0 , жесткость k_0 , демпфер b_0 моделируют место заделки резонатора. Обычно при изготовлении резонаторов используют высокодобротные материалы, поэтому в механической системе присутствует только трение в месте заделки. При симметричности относительно m_0 параметров системы $m_1 = m_2$, $k_1 = k_2$ – равенство длин пружин k_1 и k_2 и первоначального отклонения, в динамике системы не появляется рассеивание энергии. Любые отклонения от симметрии приводят к конструкционному демпфированию. Следствием конструкционного демпфирования является дрейф волны. При рассмотрении более точных моделей можно ставить задачу поиска зависимости величины дрейфа от конструкционного демпфирования и дефектов ТВГ. Для учета влияния конструкционного демпфирования целесообразно включить в систему съема датчики, регистрирующие деформации в месте крепления.

Для увеличения точности ТВГ за счет уменьшения дрейфа используются различные технологические операции, улучшающие параметры резонатора. К таким параметрам относится добротность, разносторонность и разносторонность. Примерами технологических операций могут служить: балансировка резонатора, устранение трещиноватого слоя, полировка и другое. В зависимости от требований к точности и надежности ТВГ некоторые операции могут

не проводиться или упрощаться. Например, проводить балансировку резонатора только по 4-й гармонике дефекта, в таком случае наличие других дефектов будет влиять на величину разносторонности и появление дрейфа волны. Влияние дрейфа волны на точностные параметры может быть устранено другими способами: использованием контура управления разносторонностью, использование алгоритмов обработки сигнала и др.

Для оценки конфигурации волн в резонаторе необходима измерительная компонента (система съема). В общем случае $x \in R$ вектор состояния колебаний в резонаторе является бесконечномерным. Датчики системы съема не могут быть меньше определенного размера, и измерительная компонента может формировать только конечное число сигналов, характеризующих конфигурацию волны. То есть система съема может выделять некоторое конечномерное подмножество состояний волны резонатора $O_M \subset O$, $|O_M| = m$, где m – константа. Минимально возможная система съема должна формировать сигнал для определения амплитуд и временных фаз двух мод, которые относятся к выбранной рабочей форме. Для увеличения точности ТВГ целесообразно формировать систему съема с дополнительными сигналами.

Основным параметром волны, необходимым для работы прибора, является угловая ориентация волны. Система съема не может непосредственно получить значение угловой ориентации волны θ^* . Угловая ориентация волны определяется по колебаниям резонатора. Измерительная компонента реализует преобразование механических колебаний, характеризующихся вектором состояния x в электрические сигналы y^* с помощью известных датчиков (емкостные, пьеза, оптические и др.) [42]:

$$y_i(t) = M(w(t, \varphi_i, \psi_i), t, p_i),$$

где M – некоторая функция; y – выходное значение i -го датчиков; p_i – параметры датчика (отклонения от идеального параметров идеального датчика). Измерительная компонента должна быть построена так, чтобы с помощью полученных электрических сигналов y_i^* можно было определить значение электрического угла θ^* с заданной точностью.

Кроме значения электрического угла θ^* для работы с определенной точностью могут потребоваться другие значения. Целесообразно иметь информацию о деформациях резонатора в месте заделки.

Система съема не может быть идеальной, в электрических цепях присутствуют шумы, съемные датчики располагаются с небольшими отклонениями, параметры каналов системы съема немного отличаются. Все это приводит к появлению дрейфа волны, нелинейностям и шумам.

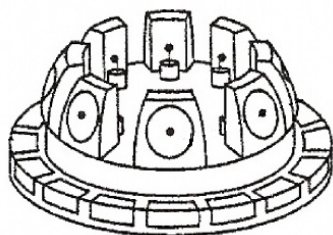


Рис. 6

Основным источником ухудшения точности ТВГ в измерительной компоненте являются различные шумы и нелинейность выходного сигнала.

Количество и расположение датчиков может быть различным. В общем случае для определения положения n -формы требуется $2n + 1$ значений. Для второй формы требуется минимум 5 датчиков. Если известно, что в резонаторе возбуждается только одна форма, можно построить систему съема на двух датчиках. Датчики целесообразно располагать симметрично по кругу. Сигналы

с датчиков могут объединяться и формировать несколько информационных каналов. Обычно используется 8 датчиков, которые формируют два измерительных канала. Увеличение количества каналов усложняет схему системы съема, но дает выигрыш в точности интерпретации сигналов с датчиков.

Измерительная компонента не может быть изолирована от объекта измерения и оказывает на него влияние. Например, для емкостных датчиков система съема требует наличие на резонаторе металлической пленки. Металлическая пленка меняет частотные и демпфирующие свойства системы, вносит дополнительные неоднородности физических параметров, таких как плотность, напряжения, модуль юнга и другие. Неоднородности физических параметров приводят к появлению погрешностей прибора.

Для увеличения точности ТВГ можно стараться увеличивать точность и уменьшать влияние на резонатор отдельных датчиков колебаний, но более перспективный путь – формировать систему съема таким образом, чтобы повышалась точность интерпретации сигналов системы съема. При таком подходе не важно, как сильно влияет измерительная компонента на объект, требуется описать с достаточной точностью преобразования в виде математической модели. В этом случае точность прибора во многом будет зависеть от методов обработки, которые реализованы в вычислительной компоненте ТВГ.

Управляющая компонента (система управления) формирует условия для реализации эффекта Брайана. В первую очередь, система управления раскачивает и поддерживает постоянную амплитуду колебаний резонатора. Для этих целей работают контур фазовой автоподстройки частоты и контур поддержания амплитуды. Также могут

работать контуры, уменьшающие влияние некоторых инструментальных погрешностей и неидеальностей физических параметров системы. К таким контурам относится управление осями жесткости, адаптивные контуры подавления разносторонности и разносторонности и другие. Влияние системы управления также может быть учтено при разработке вычислительной компоненты.

Вычислительная компонента интерпретирует получаемые сигналы с системы съема так, чтобы формировать «хорошее» выходное значение. Критерии качества выходного сигнала могут быть различными. К основным параметрам, которые характеризуют качество сигнала, относятся следующие параметры: дрейф выходного сигнала, нелинейность выходного сигнала, шумовая составляющая, фазовая задержка и другие параметры. Обозначим преобразование, осуществляемое вычислительной компонентой V :

$$\Delta\alpha_{\text{hrг}}(t) = V(y(t), u(t), p(t)),$$

где y – сигнал системы съема; u – управляющие воздействия на резонатор; p – некоторые параметры, которые подбираются для конкретного прибора исходя из следующих критериев:

$$\begin{aligned} \Phi(p) = \\ = |V(M(H(\Omega(t))), u(t), p(t)) - \Delta\alpha(t)| \rightarrow \min, \\ \Delta\alpha(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (2)$$

Часть значений параметров может быть найдена на этапе настройки прибора, часть параметров может находиться и подстраиваться в готовом изделии за счет различных алгоритмов. Заметим, что в общем случае V не является просто обратной к $M(H(\Omega))$ ввиду того, что функции H и M не являются однозначными. Вид M (конструкция систе-

мы съема) определяет задачу (2) и задает границы возможной оптимизации. Требуется решать две задачи: выбирать вид M и решить задачу оптимизации параметров вычислительной компоненты.

Задачу (2) следует решать, если рассматривается ТВГ как самостоятельный измерительный прибор. Другой подход следует применять в случае, когда ТВГ рассматривается как часть другой измерительной системы. Тогда ТВГ рассматривается как датчик, и требуется решать задачу поиска наилучшей модели, описывающей ТВГ, конфигурации системы съема, в состав которой входит ТВГ, и оптимизации вычислительной компоненты на основе модели ТВГ и вида системы съема. В таком случае задача редукции должна решаться не в вычислительной компоненте ТВГ, а в вычислительной компоненте общей измерительной системы.

Проведенный анализ показал, что для обеспечения высокой точности твердотельного волнового гироскопа необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель резонатора с учетом конструкционного демпфирования ТВГ.
- Разработать математическую модель системы съема ТВГ.
- Разработать методику оценки параметров моделей ТВГ.
- Разработать алгоритм решения задачи редукции к идеальному измерительному прибору с учетом ограниченности вычислительных ресурсов твердотельного волнового гироскопа.

Решение поставленных задач позволит:

- получить математическую модель выходного сигнала ТВГ, необходимую для обработки сигналов;
- разработать методику оценки параметров моделей резонатора и системы съема

с нужной точностью, необходимых для обработки сигналов;

- разработать алгоритм решения задачи редукации с нужной точностью;
- увеличить точность твердотельного волнового гироскопа и приборов на его основе.

Библиографические ссылки

1. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. – М. : Наука, 1985. – 126 с.
2. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для вузов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 168 с.
3. Лунин Б. С. Физико-химические разработки полусферического резонатора ВТГ. – М. : Изд-во МАИ, 2005. – 224 с.
4. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и практика : монография. – М. : Радиотехника, 2014. – 176 с.
5. Егармин Н. Е. Динамика ВТГ. Препринт № 272. – М. : ИПМех Академии наук СССР, 1986. – 65 с.
6. Егармин Н. Е. Некоторые проблемы динамики ВТГ. Препринт № 389. – М. : ИПМех Академии наук СССР, 1989. – 43 с.
7. Егармин Н. Е. Погрешности ВТГ. Препринт № 391. – М. : ИПМех Академии наук СССР, 1989. – 23 с.
8. Басараб М. А., Кравченко В. Ф., Матвеев В. А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии : монография. – М. : Радиотехника, 2005. – 176 с.
9. Журавлев В. Ф., Линч Д. Д. Электрическая модель ТВГ // Механика твердого тела. – 1995. – № 5. – С. 12–25.
10. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Механика твердого тела. – 1998. – № 4. – С. 4–16.
11. Жбанов Ю. К., Каленова Н. В. Поверхностный дебаланс волнового твердотельного гироскопа // Механика твердого тела. – 2001. – № 3. – С. 11–18.
12. Каленова. Определение параметров поверхностного дебаланса резонатора волнового твердотельного гироскопа по его реакции на угловую вибрацию основания // Механика твердого тела. – 2009. – № 5.
13. Журавлев В. Ф. ВТГ, содержащий m информационных и n управляющих электродов // Механика твердого тела. – 2015. – № 4.
14. Бонштедт А. В., Кузьмин С. В., Мачехин П. К., Тонков Е. Л. Оптимизация управления твердотельным волновым гироскопом // Вестник Удмуртского университета. Математика. – 2005. – № 1. – С. 189–214.
15. Трутнев Г. А. Шестнадцатиточечная модель твердотельного волнового гироскопа // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2011. – № 2. – С. 135–146.
16. Трутнев Г. А. Модель твердотельного волнового гироскопа в медленных переменных // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2015. – № 3. – С. 421–429.
17. Меркурьев И. В. Влияние неравномерности толщены полусферического резонатора на точность ВТГ // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 3.
18. Бетия Ж., Гро А., Гроссе Ж. Новое поколение инерциальных блоков на основе вибрационных датчиков, используемых в качестве резервных измерителей // Гироскопия и навигация. – 2006. – № 1.
19. Жбанов Ю. К. Самонастраивающийся контур подавления квадратуры в ТВГ // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С. 37–42.
20. Джанджгава Г. И. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе ТВГ // Гироскоп и навигация. – 2008. – № 1. – С. 22–31.
21. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А. Температурные и технологические погрешности ТВГ // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 1.
22. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1.

24. Журавлев В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние теории // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2011. – № 2 (33).
25. Ранго В., Ремиллье Ж. Новый режим управления для существенного улучшения характеристик осесимметричных вибрационных гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 2.
26. Мейер Д., Розелле Д. Инерциальная навигационная система на основе миниматюрного ВТГ // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 3.
27. Негри С., Лабарр Э. Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 1.
28. Дорофеева Е. А., Саенко Ю. П. Предварительные результаты испытаний макетного образца ТВГ // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – № 7.
29. Басараб М. А., Лунин Б. С. Миниатюрные ВТГ для малых космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2014. – № 4.
30. Лунин Б. С., Юрин А. В. Термоупругие потери в конструкционных материалах резонаторов ВТГ // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2015. – № 2.
31. Румянцев В. Л., Долгов А. Н. Модернизированный ТВГ // Приволжский научный вестник. – 2015. – № 12-3.
32. Bryan G. H. On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell // Proc. Camb. Phil. Soc. Math. Phys. Sci. 1890. Vol. 7. P. 101–111.
33. Matthews A.; Bauer D. A. Hemispherical Resonator Gyro Noise Reduction for Precision Spacecraft Pointing. In Proceedings of 19th Annual AAS Guidance And Control Conference, Breckenridge, CO, USA, 7–11 February 1996.
34. Loveday P. W., Rogers C. A. The influence of controll system design on the performance of vibratory gyroscopes // Journal of Sound and Vibration. – 2002. – № 3. – 417–432.
35. Roselle D. M. The HRG: from wineglass to the Planets Spaceflight Mech. 2009, 134, 1–26.
36. Ragon V., Remilleux G. A new control mode for axisymmetrical vibrating gyroscope greatly improving performance // in Proceedings of 18rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation System, 2011.
37. Xu Wang, Wenqi Wu, Force to Rebalance Control of HRG and Suppression of Its Errors on the Basis of FPGA // Sencors 2011, 11.
38. Xu Wang, Wenqi Wu, Temperature Drift Compensation for HRG Based on Natural Frequency // Sencors 2012, 12.
39. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 400 с.
40. Гольденвейзер А. Л., Лидский В. Б., Товстик П. Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
41. Харкевич А. А. Борьба с помехами. – М. : Наука, 1965. – 275 с.
42. Слепова С. В. Основы теории точности измерительных приборов: учебное пособие. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 192 с.
43. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. 624 с.

G. A. Trutnev, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU

S. B. Nazarov, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU

K. K. Perevozchikov, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU

A. V. Shchenyatskiy, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

Measurement Calculation System “Solid-state Resonator Gyroscope”

The paper considers a measuring device – the Solid-state Wave Gyroscope. Operation of the device is based on effect of inertness of standing waves. The Solid-state Wave Gyroscope is considered from two parties as the self-

contained measuring computer system, and as the sensor of some inertial system. The structure of the Solid-state Wave Gyroscope is presented in the form of the interdependent elements: the resonator, the measuring component, the operating component, the computing component. The structure of the device is analyzed, its subsystems and their communications are considered. Various types of designs of the resonator, questions of mathematical model operation of the resonator are considered. The phenomena worsening the accuracy of the device such as wave drift, nonlinearity and noise of an output signal are considered. The reasons of emergence of a drift are analyzed. One of the main drift reasons is the constructional damping. Questions of model operation of the resonator taking into account a constructional damping are studied. Various types of sensors and the systems of removal on their basis are described. The measuring component as a system for observation of the Brian effect is considered. The necessity to generating the signals in the system of removal for padding observation of deformation of the resonator in the place of fastening is proved. Questions of controlling the dynamics of the resonator are considered. Various controlling contours which allow for receiving the necessary characteristics of the device are given. Accuracy parameters are described. Dependences of the accuracy parameters of the Solid-state Wave Gyroscope on various factors are analyzed. The directions of increase in the accuracy of the Solid-state Wave Gyroscope and systems on its basis are described. The general task of increasing the accuracy of the device due to accounting of a constructional damping in the model of the resonator, measurement of values characterizing the constructional damping, and the solution of a problem of reduction of SWG to an ideal measuring device is set.

Keywords: measuring device, Solid-state Wave Gyroscope, measuring component, controlling component, computing component, model of the Solid-state Wave Gyroscope, reduction to the ideal measuring device.

Получено: 24.08.2017