

УДК 531.383, 534.08, 519.876
DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-69-77

МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТА РАЗНОДОБРОТНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

Р. В. Мельников, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Г. А. Трутнев, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

Рассматривается чувствительный элемент, его геометрические особенности и погрешности, влияющие на тактико-технические характеристики изделия.

Проведен анализ, который показал, что основным вклад в собственный уход угла вносят такие погрешности, как упруго-массовые дефекты кварцевого резонатора, неточность сборки конструкции, ошибки в системе съемки и управления, геометрические погрешности резонатора.

Оценено влияние таких погрешностей, как разночастотность и разнородность на окончательные характеристики навигационного прибора.

Твердотельный волновой гироскоп является сложной измерительной системой [1], в его состав входит управляющая компонента, которая уменьшает влияние некоторых неидеальностей прибора. Актуальной задачей является совершенствование управляющей компоненты и повышение точности всей измерительной системы.

Перспективным направлением является применение адаптивных систем автоматического управления, поскольку существует необходимость индивидуально подстраиваться под каждый чувствительный элемент: настраивать резонансную частоту чувствительного элемента, выполнять захват собственной частоты колебаний, формировать сигналы рассогласования амплитуды колебаний и т. д. При изменении массогабаритных параметров резонатора, играющих важную роль в измерительном тракте прибора, необходимо проводить изменение параметров системы управления, что увеличивает временные и трудовые затраты.

Для повышения эффективности отработки системы автоматического управления, сокращения времени доведения прибора до требуемого уровня качества необходимо разработать математическую модель системы управления. Рассматривается идеальное осесимметричное тело, жестко заземленное за ножку резонатора. В данной статье рассматривается модель контура автоматического подавления разнородности для нуш-нулевой системы управления твердотельного волнового гироскопа [2]. Сделано предположение о возможности применения результатов имитационного моделирования для дальнейшей реализации контура подавления разнородности в составе навигационного блока.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, кварцевый резонатор, математическая модель, колебания, дрейф, добротность, разнородность, система управления.

Введение

Одним из ведущих направлений технического прогресса является быстрое развитие средств навигации. Высокие требования, предъявляемые к чувствительным элементам систем ориентации и навигации, привели к созданию нетрадиционных гироскопических приборов, построенных на новых физических принципах (твердотельные и микромеханические гироскопы, спутниковые навигационные системы), отсюда широкое их применение во множестве областей жизни современного общества [3].

К навигационным системам предъявляются жесткие требования, они должны ра-

ботать в тяжелых условиях внешней среды, выдерживать ударные нагрузки, иметь высокую надежность, длительный рабочий ресурс, высокую точность, обладать небольшой массой, габаритами и энергопотреблением, выходить на рабочий режим в течение 0,1 секунды [4].

Одним из наиболее современных и перспективных представителей навигационных систем является твердотельный волновой гироскоп (ТВГ), принцип действия которого основан на инертных свойствах упругих волн, возбужденных в твердом теле.

Преимуществами ТВГ является: высокая точность, малое время готовности, отсутст-

вие в конструкции вращающихся частей, малая потребляемая энергия, малая чувствительность к линейным перегрузкам.

Актуальным направлением в гироскопии является создание приборов с высокими тактико-техническими характеристиками, совершенствование которых производится на стадии конструкторской подготовки изделия [5]. Несмотря на различия в конструкции, особую роль в разработке гироскопов играет система управления, для улучшения ее характеристик и сокращения времени на обработку актуальным является создание модели твердотельного волнового гироскопа.

При изготовлении ТВГ проводится большое количество измерений. Контролируются различные параметры, определяющие окончательные характеристики прибора. К основным погрешностям, определяющим точность выходного сигнала с прибора, относятся собственный уход (дрейф) стоячей волны, шумовая составляющая, нелинейность и другие. Для уменьшения каждой из описанных погрешностей выходного сигнала применяются свои методы и подходы. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с уменьшением дрейфа. В исследованиях [6–8] отмечено, что изменение угловой ориентации прибора измеряется по угловому положению стоячей волны, возбужденной в резонаторе. В процессе изготовления ТВГ по ряду причин, таких как несимметричность оболочки, неравномерное распределение напряжений в кварцевом стекле, микротрещины, возникает зависимость декремента затухания от углового положения.

Дрейф – это собственная скорость ухода стоячей волны, прецессия в отсутствии внешних вращений. Дрейф ТВГ раскладывается на систематическую и случайную составляющие. Систематический дрейф зависит от разных факторов: разносторонность, разночастотность, эллиптичность. Изменение электрического угла (стоячей волны в резонаторе) определяется следующей формулой [9]:

$$\dot{\theta} = -K\Omega - L \cos(4(\theta - \varphi_{\omega})) + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \sin(4(\theta - \varphi_{\tau})) + P \sin 2\gamma. \quad (1)$$

Первое слагаемое уравнения описывает скорость изменения углового положения прибора относительно скорости изменения стоячей волны. K – масштабный коэффициент эффекта Брайана [10]. В реальном приборе таким соотношением может быть описан выходной сигнал. Задача состоит в том, чтобы уменьшить влияние слагаемых, которые искажают эффект Брайана.

Второе слагаемое объясняет возникновение систематического дрейфа из-за разночастотности. В идеальном резонаторе положение осей нормальных колебаний может быть любым, в силу несимметричности оболочки происходит вырождение собственных частот и появлению двух осей жесткости с собственными частотами ω_1 и ω_2 .

Третье слагаемое описывает возникновение систематического дрейфа, связанного с разносторонностью. Из-за неоднородной диссипации энергии свободных колебаний возникают две оси, характеризующиеся значениями τ_1 и τ_2 . Эти величины являются наименьшим и наибольшим декрементом затухания соответственно.

Четвертое слагаемое описывает эллиптичность колебаний. Таким образом, при неправильном изготовлении система параметрического возбуждения будет создавать дрейф.

После изготовления резонатора необходимо выполнить такие технологические операции, как шлифовка и полировка, также настроить некоторые электрические параметры. Возникновение систематического дрейфа от разночастотности можно уменьшить на этапе настройки чувствительного элемента путем проведения такой технологической операции, как балансировка [11]. Для сведения разночастотности к микрогерцам призван контур автоматической подстройки осей жесткости. Считается, что систематический дрейф, вызванный разночастотностью, устранен практически полностью и не оказывает влияния на волновую картину.

Наличие в резонаторе несимметричности оболочки и напряжения на поверхностном слое приводит к появлению двух осей диссипации [12] и, как следствие, к возникновению дрейфа от разносторонности. Разно-

добротность – явление, при котором добротность зависит от угловой ориентации стоячей волны в резонаторе. Подтвержде-

нием сказанного будет отображение сигнала рассогласования по амплитуде одновременно с графиком дрейфа (рис. 1).

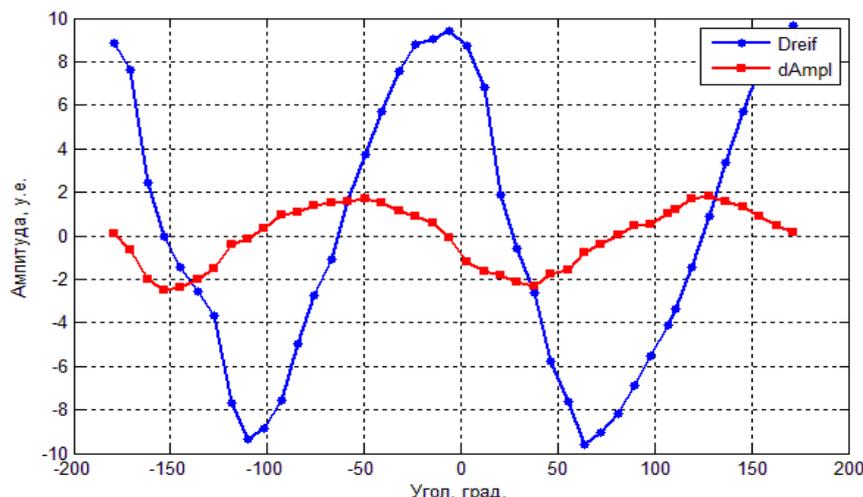


Рис. 1. График дрейфа и сигнала управления ТВГ

Видно, что в значениях максимума и минимума сигнала рассогласования величина дрейфа имеет минимальное значение, это говорит о том, что стоячая волна в этих положениях находится в оси добротности. Отсюда вывод, что оценку дрейфа можно дать по значениям сигнала рассогласования амплитуды. В настоящее время нет готовой реализации системы автоматического управления величиной раздобротности, поэтому разработка такой системы является актуальной задачей.

Один из способов уменьшения дрейфа, вызванного раздобротностью, является аппроксимация выходного сигнала по 4-й гармонике. Необходимо и достаточно, чтобы график аппроксимирующей функции совпадал с сигналом рассогласования [13], для удобства использовался метод наименьших квадратов. Коэффициенты А и В играют важнейшую роль в нахождении новой функции, именно от них и будет зависеть отличие от исходного сигнала. Задача свелась к определению коэффициентов аппроксимирующей функции.

Моделирование

Система управления выполняет важнейшие функции, для ее совершенствования необходимо разработать математическую модель, с помощью которой будет возможно исследовать те или иные нововведения и добавленные конструктивные изменения и расчетные параметры.

Для удобства математическая модель резонатора рассматривается в виде парциального осциллятора. Математическая модель для измерения угла поворота с помощью ТВГ требует применения медленно меняющейся амплитуды колебаний, поэтому для целей имитационного моделирования используется уравнение для медленно меняющихся фазовых переменных волны в резонаторе. Рассмотрим следующую модель ТВГ [14]:

$$X_{\text{объект}} = (G_{\tau} + G_{\delta\tau} + G_{\Omega} + G_{\Delta\omega}) \cdot X + G_f \cdot F, \quad (2)$$

где

$$G_{\tau} = -\frac{1}{\omega\tau} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$G_{\delta\tau} = -\frac{\Delta_{\tau}}{2\omega} \begin{pmatrix} \cos 4\theta_{\tau} & 0 & \sin 4\theta_{\tau} & 0 \\ 0 & \cos 4\theta_{\tau} & 0 & \sin 4\theta_{\tau} \\ \sin 4\theta_{\tau} & 0 & -\cos 4\theta_{\tau} & 0 \\ 0 & \sin 4\theta_{\tau} & 0 & -\cos 4\theta_{\tau} \end{pmatrix},$$

$$G_{\Omega} = \frac{2K\Omega}{\omega} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$G_{\Delta\omega} = \frac{\Delta_{\omega}}{2\nu\omega^2} \begin{pmatrix} 0 & -\cos 4\theta_{\omega} & 0 & -\sin 4\theta_{\omega} \\ \cos 4\theta_{\omega} & 0 & \sin 4\theta_{\omega} & 0 \\ 0 & -\sin 4\theta_{\omega} & 0 & \cos 4\theta_{\omega} \\ \sin 4\theta_{\omega} & 0 & -\cos 4\theta_{\omega} & 0 \end{pmatrix},$$

$$G_f = \frac{1}{2\nu\omega^2} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

ω – резонансная частота чувствительного элемента; τ – величина добротности резонатора; Δ_{τ} – величина разнородности резонатора; Δ_{ω} – величина разночастотности резонатора; θ_{τ} – угловое положение оси добротности; θ_{ω} – угловое положение оси частотности; ν – управляющий параметр, близкий к единице, характеризует степень расстройки частоты от резонанса; $X=X(t)$ – вектор фазовых переменных состояния системы размерностью 1×4 ; $F=F(t)$ – управляющее воздействие, ограниченное кусочно-непрерывной функцией, с конечным числом точек разрыва; G_{τ} – матрица диссипативных сил скалярного (сферического) типа; $G_{\delta\tau}$ – матрица сил, порождающих «разнородность» резонатора; G_{Ω} – матрица гироскопических сил; $G_{\Delta\omega}$ – матрица сил, порождающих «разночастотность» резонатора; G_f – матрица циркулярных (неконсервативных, псевдогироскопических) сил.

Достоверность расчетов обеспечивается выбором параметров таким образом, чтобы модель соответствовала и воспроизводила характеристики реального прибора. Из проведенных ранее численных и натуральных экспериментов [8] примем значения равными:

- 1) Добротность $\tau = 600$ с.
- 2) Разнородность $\Delta_{\tau} = 2\%$.
- 3) Масштабный коэффициент $K = 0,3$.
- 4) Резонансная частота $\omega = 5000$ Гц.

После балансировки резонатора величина разночастотности сводится к тысячным долям герц, что подтверждено многочисленными натурными экспериментами.

Также этот дефект практически не оказывает влияния на величину добротности и, соответственно, разнородности, поэтому в рассматриваемой модели его учитывать не имеет смысла. Примем значения матриц $G_{\Delta\omega}$ и G_f много меньше единицы, и в первоначальный момент времени не учитываем корректирующий сигнал с матрицы управления ввиду его отсутствия. Запишем полученное уравнение:

$$X_{\text{объект}} = (G_{\tau} + G_{\delta\tau} + G_{\Omega}) \cdot X + Bu. \quad (3)$$

Рассматриваются высокочастотные колебания кольца по второй моде колебаний в плоскости, перейдем к вычислению разнородности, которая приводит к возникновению такого дефекта, как дрейф. Величина разнородности также характеризует качество механических операций. От окончательной величины добротности и разнородности зависит величина систематического и несистематического дрейфа и, как следствие, чувствительность прибора к угловым скоростям. Систематический дрейф от разнородности может быть устранен при создании статических сил гиперболического типа [15].

Резонаторы производятся из высокодобротного материала, проходят много стадий обработки, несмотря на то, что каждый ЧЭ индивидуален и имеет свои параметры, значение добротности остается высоким.

Поскольку добротность имеет конечное значение, для работы прибора необходимо создать и поддерживать постоянные незатухающие колебания. Для создания и поддержания вынужденных колебаний призван контур управления, который выполняет подкачку энергии.

Для выполнения алгоритма управления разнородностью необходимо обеспечить идеальное вращение стоячей волны, реализовать его можно двумя способами:

- 1) поворотом прибора вокруг своей оси;
- 2) созданием сил, пропорциональных силам гироскопического типа, циклически меняющихся по требуемому закону.

Используем второй способ. Из всех погрешностей резонатора нас интересует зна-

чение параметра разнородности, поскольку именно от нее и будет зависеть конечный дрейф выходного сигнала.

Обеспечив необходимые параметры для работы модели, а именно: задав вынужденные колебания и постоянное вращение, перейдем к решению уравнения (3). В явном виде невозможно найти внутренние параметры резонатора, поэтому произведем качественную оценку этих параметров, примем

$$\tilde{p} = -\frac{\Delta_{\tau}}{2\omega}, \tilde{q} = 4\theta_{\tau}.$$

Тогда оценочная матрица сил, порождающих «разнородность» резонатора, будет выглядеть:

$$\tilde{G}_{\sigma\tau} = \tilde{p} \begin{pmatrix} \cos(\tilde{q}) & 0 & \sin(\tilde{q}) & 0 \\ 0 & \cos(\tilde{q}) & 0 & \sin(\tilde{q}) \\ \sin(\tilde{q}) & 0 & \cos(\tilde{q}) & 0 \\ 0 & \sin(\tilde{q}) & 0 & \cos(\tilde{q}) \end{pmatrix}.$$

Проведем моделирование выполнения алгоритма в программном продукте Matlab:Simulink, найдем искомые параметры \tilde{p} и \tilde{q} . На рис. 2 и 3 изображен пример вычисления искомых параметров.

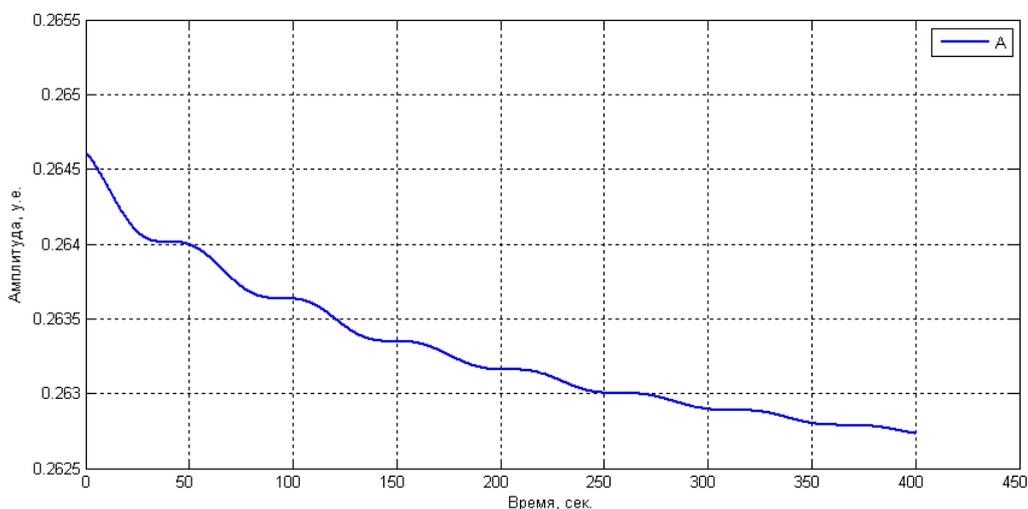


Рис. 2. Вычисление параметра \tilde{p}

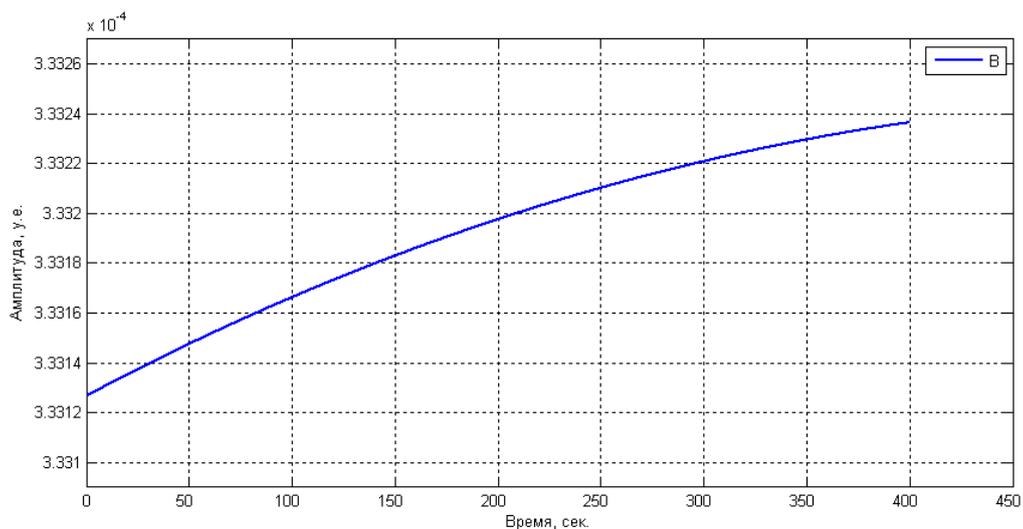


Рис. 3. Вычисление параметра \tilde{q}

По графикам видно, что для точного определения значений оценочных параметров

необходимо время непрерывной работы прибора с постоянным вращением не менее 5

минут. Также видно, что начальные значения заметно отличаются, это объясняется переходным процессом внутри твердотельного волнового гироскопа, для управляющих коэффициентов не стоит учитывать значения, рассчитанные в интервале времени до одной минуты. Система управления будет работать в двух режимах: режим калибровки и режим подстройки. При первоначальном запуске система управления работает в режиме калибровки, это необходимо для выполнения предварительной настройки прибора и определения его в пространстве. Далее система управления переключается на режим адаптивной фильтрации, при котором управляющие коэффициенты уточняются во времени, тем самым повышая точность выходного сигнала.

Произведя оценку параметров, которые влияют на значение добротности, можно сформировать управляющий сигнал, обратный матрице сил, порождающих разнородность.

При использовании новых управляющих коэффициентов наблюдается значительное повышение точности выходного сигнала, а именно: уменьшение такой погрешности, как систематический дрейф твердотельного волнового гироскопа, вызванный силами, порождающими разнородность резонатора. На рис. 4 представлен график дрейфа твердотельного волнового гироскопа до и после использования адаптивного управления.

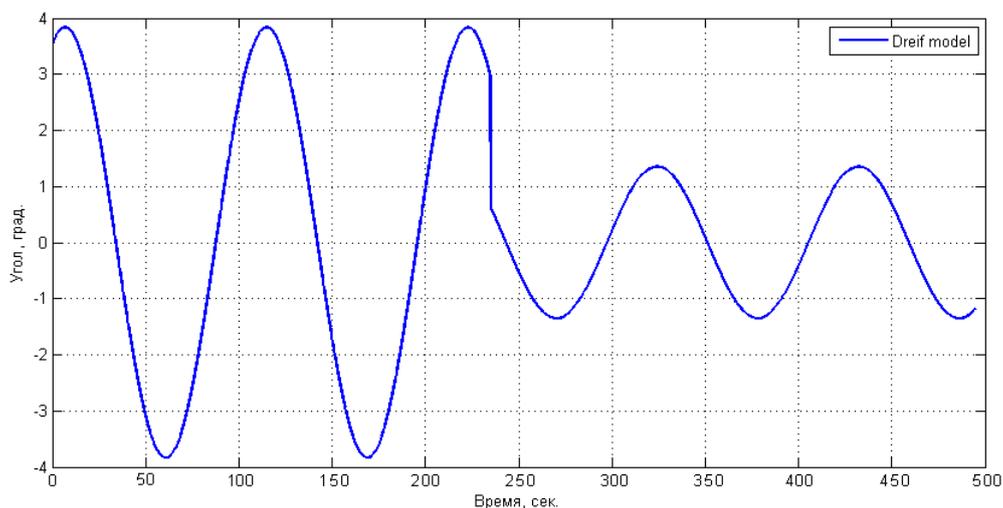


Рис. 4. График дрейфа твердотельного волнового гироскопа

Дрейф от разнородности устраняется созданием статических сил гиперболического типа [16]. Контур автоматической коррекции разнородности отличается, например, от контура управления осями тем, что в каждый локальный момент времени нет критерия, в соответствии с которым можно регулировать динамику резонатора. Для контура управления осями жесткости этим критерием является разность фаз каналов. Для разработки контура необходимо обеспечить изменение электрического угла θ в достаточно большом диапазоне, а также возможность создавать силы, порождающие разнородность. В этом случае

можно использовать адаптивный фильтр, на основе которого можно разработать контур подавления разнородности.

Контур автоматического подавления разнородности может быть реализован с помощью пуш-пульной системы управления [17]. Предлагаемая система управления позволяет реализовать оба типа сил: гироскопические и гиперболические.

Общий алгоритм работы контура управления разнородностью можно записать следующим образом:

1. Обеспечить условие неподвижности объекта, в состав которого входит ТВГ с пуш-пульной системой управления.

2. Включить прибор.
3. Запустить режим вращения волны [18].
4. Рассчитать необходимые значения для коррекции разносторонности.
5. Сформировать силы, уменьшающие разносторонность.
6. Запустить рабочий режим (датчик угла либо угловой скорости).

Результатом работы данного алгоритма будет уменьшение сил, вызывающих разносторонность и, как следствие, уменьшение дрейфа.

Вывод

Проведенное моделирование показало эффективность работы адаптивного контура с автоматической компенсацией разносторонности и может быть реализовано в составе прибора ТВГ с системой цифровой обработки сигналов и пуш-пульной системой управления.

Задача дальнейшего исследования – рассмотреть вопросы, связанные с реализацией контура подавления разносторонности. Необходимо написать программный модуль, отвечающий за перевод прибора в режим вращения волны, модуль расчета параметров для управления разносторонности и модуль формирования сил для подавления разносторонности. Результатом работы контура будет уменьшение дрейфа ТВГ.

Библиографические ссылки

1. Трутнев Г. А., Назаров С. Б., Перевозчиков К. К. Измерительно-вычислительный комплекс «Твердотельный волновой гироскоп» // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15. № 3.
2. Климов Д. М., Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Кварцевый полусферический резонатор (ВТГ). М. : Ким Л. А., 2017. 194 с.
3. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1.
4. Журавлев В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. – М. : Наука, 1985.
5. Журавлев В. Ф. ВТГ: современное состояние, некоторые аспекты // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2 (33). С. 118–123.

6. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа // Изв. РАН МТТ. 1998. № 4. С. 4–16.

7. Матвеев В. А., Липатников В. И., АLEXIN А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 168 с. : ил.

8. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. Влияние подвижности центра резонатора на работу волнового твердотельного гироскопа // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2007. № 6. С. 14–24.

9. Лунин Б. С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. М. : Изд-во МАИ, 2005. 224 с. : ил.

10. 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. Pp. 101–111.

11. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа. С. 4–16.

12. Шатков А. П. Разработка интеллектуального датчика угловой скорости. Волгоград : Изд-во ВоГТУ, 2008. 113 с.

13. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. Изд. 2-е, перераб. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. 400 с.

14. Трутнев Г. А. Модель твердотельного волнового гироскопа в медленных переменных // Вестник Удмуртского университета. Математика. 2015. Вып. 3.

15. Матвеев В. А., Липатников В. И., АLEXIN А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 168 с. : ил.

16. Журавлев В. Ф., Попов А. Л. О прецессии собственной формы колебаний сферической оболочки при ее вращении // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. 1985. № 1. С. 147–151.

17. Мельников Р. В., Щенятский А. В., Трутнев Г. А. Подходы к расчету технических характеристик ТВГ // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 1. С. 7–11.

18. Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф. Влияние подвижности центра резонатора на работу волнового твердотельного гироскопа. С. 14–24.

References

1. Trutnev G. A., Nazarov S. B., Perevozchikov K. K. (2017). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], vol. 15, no. 3 (in Russ.).

2. Klimov D. M., Zhuravlev V. F., Zhanov Yu. K. (2017). *Kvartsevyi polusfericheskii rezonator (VTG)* [Quartz hemispherical resonator (VTG)]. Moscow: Kim L. A.. 194 p. (in Russ.).
3. Peshekhonov V. G. (2011). *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], no. 1 (in Russ.).
4. Zhuravlev V. F., Klimov D. M. (1985). *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop* [Wave solid-state gyroscope]. Moscow: Nauka (in Russ.).
5. Zhuravlev V. F. (2011). *Aktual'nye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem: protsessy, modeli, eksperiment* [Actual problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment], no. 2 (33), pp. 118-123 (in Russ.).
6. Zhanov Yu. K., Zhuravlev V. F. (1998). *Izvestiya RAN MTT* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], no. 4, pp. 4-16 (in Russ.).
7. Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V. (1997). *Proektirovanie volnovogo tverdotel'nogo giroskopa* [Designing of a wave solid-state gyroscope]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman. 168p. (in Russ.).
8. Zhanov Yu. K., Zhuravlev V. F. (2007). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids], no. 6, pp. 14-24 (in Russ.).
9. Lunin B. S. (2005). *Fiziko-khimicheskie osnovy razrabotki polusfericheskikh rezonatorov volnovykh tverdotel'nykh giroskopov* [Physicochemical bases of development of hemispherical resonators of wave solid-state gyroscopes]. Moscow: Izd-vo MAI. 224 p. (in Russ.).
10. 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. Pp. 101-111.
11. Zhanov Yu. K., Zhuravlev V. F. (1998). *Izvestiya RAN MTT* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], no. 4, pp. 4-16 (in Russ.).
12. Shatkov A. P. (2008). *Razrabotka intellektual'nogo datchika uglovoi skorosti* [Development of an intelligent angular velocity sensor]. Volgograd: Izd-vo VoGTU. 113 p. (in Russ.).
13. Pyt'ev Yu. P. (2004). *Metody matematicheskogo modelirovaniya izmeritel'no-vychislitel'nykh sistem* [Methods of mathematical modeling of measuring and computing systems]. Moscow: FIZMATLIT. 400 p. (in Russ.).
14. Trutnev G. A. (2015). Model' tverdotel'nogo volnovogo giroskopa v medlennykh peremennykh [The model of a solid-state wave gyroscope in slow variables]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika* [Bulletin of the Udmurt University. Mathematics], vol. 3 (in Russ.).
15. Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V. (1997). *Proektirovanie volnovogo tverdotel'nogo giroskopa* [Designing of a wave solid-state gyroscope]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman. 168 p. (in Russ.).
16. Zhuravlev V. F., Popov A. L. (1985). *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of solids], no. 1, pp. 147-151 (in Russ.).
17. Mel'nikov R. V., Shchenyatskii A. V., Trutnev G. A. (2018). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov], vol. 21, no. 1, pp. 7-11 (in Russ.).
18. Zhanov Yu. K., Zhuravlev V. F. (2007). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids], no. 6, pp. 14-24 (in Russ.).

Model of Determination of Defect Difference in Q-Factor of a Solid-State Wave Gyroscope

R. V. Melnikov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

G. A. Trutnev, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

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

The sensor element, its geometric features and errors affecting the tactical and technical characteristics of the product are considered. An analysis has been carried out which showed that the main contribution to the angle's own departure is made by such errors as: elastic-mass defects of the quartz resonator, inaccuracy in the assembly of the structure, errors in the survey and control system, and geometric errors in the resonator. The influence of such errors as different frequency and difference in Q-factor on the final characteristics of the navigation device is estimated. The solid-state wave gyroscope is a complex measuring system; it includes a control component that reduces the influence of some non-ideals of the device. The actual task is to improve the control component and improve the accuracy of the entire measuring system. A promising direction is the use of adaptive automatic control systems, since there is a need to individually adjust to each sensing element: adjust the resonant frequency of the sensing element, perform the capture of the natural oscillation frequency, generate mismatch signals of the amplitude of the oscillations.

When changing the mass-size parameters of the resonator, which play an important role in the measuring path of the device, it is necessary to change the parameters of the control system, which increases the time and labor costs.

To improve the efficiency of the automatic control system, reduce the time to bring the device to the required level of quality, it is necessary to develop a mathematical model of the control system. We consider an ideal axisymmetric body rigidly clamped by the resonator leg. In this paper, we consider a model of the contour of automatic suppression of difference in Q -factor for the push-pull control system of a solid-state wave gyroscope.

The assumption is made about the possibility of applying the results of simulation modeling for the further implementation of the contour of suppression difference in Q -factor in the composition of the navigation block.

Keywords: Solid-state wave gyroscope, quartz resonator, mathematical model, vibration, drift, Q -factor, difference in Q -factor, control system.

Получено: 18.04.18