

УДК 531.383, 534.08, 519.876

DOI 10.22213/2413-1172-2018-3-198-204

КОМПЕНСАЦИЯ ДРЕЙФА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА *

Г. А. Трутнев, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. Б. Назаров, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. К. Перевозчиков, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

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

Рассматривается твердотельный волновой гироскоп – измерительный прибор, работающий в режиме свободных колебаний. Из-за различных погрешностей искажается эффект Брайана, который лежит в основе работы прибора. Рассматриваются явления, искажающие эффект Брайана и ухудшающие точность прибора – собственный уход волны (дрейф), нелинейность выходного сигнала, шумы. Приводятся причины возникновения дрейфа и нелинейности. Формулируется общая задача и методика увеличения точности прибора за счет использования моделей дрейфа и нелинейности. Приводятся подходы к оценке значений скорости дрейфа волны и нелинейности выходного сигнала для обработки и получения параметров, которые в дальнейшем будут использоваться в работающем приборе для увеличения точности выходного сигнала. Изучаются факторы, влияющие на дрейф твердотельного волнового гироскопа. Приводятся различные существующие модели дрейфа. Описываются недостатки и особенности существующих моделей. Обосновывается необходимость учета в модели температурных влияний. Приводится зависимость резонансной частоты от температуры. Обосновывается возможность использования значений резонансной частоты в работающем приборе. Для оценки параметров дрейфа предлагается использовать модель двух переменных. Зависимость от углового положения волны аппроксимируется гармоническими функциями; зависимость дрейфа от резонансной частоты предлагается аппроксимировать с помощью сплайнов. Выводятся формулы для расчета параметров по результатам измерений дрейфа. Анализируются особенности предложенной модели. Модель может быть использована как для аппроксимации данных, так и для последующей компенсации погрешности в работающем приборе. Описывается возможность использования полученной модели для исследований зависимости дрейфа от скорости нагревания.

Ключевые слова: измерительный прибор, твердотельный волновой гироскоп, погрешности прибора, дрейф, компенсация дрейфа, сплайн.

Введение

Как известно, твердотельные гироскопы, впервые разработанные в начале 80-х гг. XX в., основаны на управлении двумя стоячими волнами в физическом теле – резонаторе, который может быть как осесимметричным, так и циклически симметричным. Твердотельные гироскопы имеют ряд уникальных преимуществ перед приборами других типов, заключающихся в увеличенном сроке жизни гироскопа и его устойчивости к ударам, что критично для многих систем стабилизации. В настоящее время твердотельные гироскопы

с успехом могут применяться в составе приборов, реализующих новейшие методы навигации с использованием спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, в том числе в составе оборудования универсальных машин технологического назначения на электротяге (УМТЭТ), разрабатываемых Сарапульским электрогенераторным заводом. В настоящей статье рассмотрена математическая модель, позволяющая с высокой степенью достоверности численно моделировать работу твердотельных гироскопов, которая в дальнейшем может быть использована для разработки алгоритмов и управляющих про-

© Трутнев Г. А., Назаров С. Б., Перевозчиков К. К., Щенятский А. В., 2018

* Настоящая публикация подготовлена в рамках проекта «Разработка и создание высокотехнологичного производства унифицированной машины технологического электротранспорта», реализуемого на основании Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Участники проекта: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», ОАО «Сарапульский электрогенераторный завод» (договор № 02.G25.31.0132 от 01.12.2015 г.). НИОКР выполнены в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова».

грамм блоков управления навигационными приборами, которыми планируется оснастить разрабатываемые машины.

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) – измерительный прибор, регистрирующий проекцию угловой скорости на ось симметрии прибора [1–6]. Действие ТВГ основано на инертных свойствах стоячих волн, возбужденных в твердом теле (резонаторе) [7]. Для идеального резонатора эффект записывается следующим образом [8]:

$$-K \int_0^t \Omega(s) ds = \varphi(t), \quad (1)$$

где K – масштабный коэффициент; Ω – проекция угловой скорости на ось симметрии резонатора; φ – угол поворота в подвижной системе координат, связанной с резонатором.

В реальном приборе прецессия волны зависит не только от внешних моментов, но и от внутренних. Собственное изменение углового положения волны называется дрейфом или уходом волны [9]:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= -K \int_0^t \Omega(s) ds + \text{Drift}(t) = \\ &= -K \cdot \alpha(t) + \text{Drift}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где θ – угловое положение волны; Drift – дрейф волны; α – угол поворота резонатора относительно первоначального положения вокруг оси симметрии в неподвижной системе координат $\alpha(0) = 0$.

Собственный уход стоячей волны неизбежно появляется вследствие неидеальности материалов, технологий изготовления и других факторов [10–12]. В первую очередь дрейф обусловлен неоднородностью частоты резонатора, наличием конструкционного демпфирования, неидеальностью системы управления. Неоднородность частоты (разночастотность) возникает, когда не равны частоты нормальных колебаний резонатора, соответствующих одной форме. Конструкционное демпфирование возникает из-за дебаланса резонатора. Вследствие дебаланса появляются силы и моменты в месте заделки резонатора, что приводит к оттоку энергии, снижению добротности и появлению разнодобротности.

ТВГ является сложным измерительным комплексом [13], в состав ТВГ входит своя измерительная и вычислительная системы, которые формируют значение углового положения стоячей волны. На основе информации об угловом положении волны рассчитывается угол

поворота основания (датчик угла) либо угловая скорость (датчик угловой скорости). Уравнение (2) реализуется при идеальной системе съема. В реальном приборе всегда есть погрешности, связанные с неидеальностью системы съема. Погрешности системы съема можно разделить на случайные (шум) и систематические (отклонение датчиков от идеального расположения, неравномерность усиления каналов и т. д.). Влияние неидеальности систем съема и обработки запишем следующим образом [14]:

$$\Delta\theta(t) = -K(t) \cdot \Delta\alpha(t) + D(t) \cdot \tau + \xi(t), \quad (3)$$

где $\Delta\theta$ – приращение значения углового положения волны за малое время τ ; $\Delta\alpha$ – приращение значения угла поворота резонатора; K – масштабный коэффициент с учетом нелинейности выходного сигнала; D – скорость дрейфа; ξ – случайный процесс (шум), может иметь разные характеристики (белый, розовый шум).

Значение приращения физического угла выражается следующим образом:

$$\Delta\alpha(t) = \frac{\Delta\theta(t) - D(t)\tau - \xi(t)}{-K(t)}, \quad (4)$$

Значения D , ξ , K в каждый момент времени непосредственно неизвестны. Могут быть получены оценки значений D , K с помощью выбранных моделей и некоторых измеряемых параметров.

Уменьшить влияние шума можно путем фильтрации. В общем случае оценка значения $\Delta\alpha$ осуществляется с помощью некоторой функции (фильтра):

$$\Delta\alpha(t) \approx \Delta\tilde{\alpha}(t) = F(p(t), q), \quad (5)$$

где p – вектор-функция некоторых измеряемых величин, в том числе угловое положение волны; q – вектор некоторых параметров, значения которых ищутся для конкретного изделия исходя из условия

$$\Phi(q) = \|\Delta\alpha(t) - F(p(t), q)\| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Изменение угла α задается с необходимой точностью на испытательном оборудовании, значения p получают в приборе и имеют известные оценки точности. Здесь будем рассматривать q как вектор постоянных коэффициентов, в общем случае q может зависеть от времени. Например, введение такой зависимости может быть полезным для компенсации влияния пере-

ходных процессов. Вид функции F может быть самым разным.

Общая методика оценки значения α включает в себя:

- выбор модели дрейфа и масштабного коэффициента с учетом факторов, которые могут быть измерены, т. е. определение функции F ;
- проведение измерений значений дрейфа и масштабного коэффициента при заданных значениях факторов, т. е. задание функции α ;
- обработка данных в соответствии с выбранными моделями и расчет параметров (6);
- занесения параметров в память прибора для последующего уточнения выходного сигнала;
- выбор фильтра для уменьшения влияния шума, в рамках определенных ограничений (фазовые задержки, полоса пропускания и т. д.).

Модель дрейфа

Вначале рассмотрим вопрос оценки значений нелинейности и скорости изменения дрейфа. Из формулы (3) получаем, что при неподвижном основании изменение электрического угла обусловлено дрейфом и шумом:

$$\theta(t) = \text{Drif } t(t) + \xi(t).$$

Высокочастотные изменения обусловлены шумом, низкочастотные – дрейфом. Скорость изменения θ рассчитывается некоторым дифференцирующим фильтром. Оценку нелинейности можно проводить, произведя измерение θ при заданных разных скоростях Ω_1 и Ω_2 :

$$\Delta\theta_1(t) = -K(t) \cdot \Omega_1 \tau + D(t)\tau + \xi(t);$$

$$\theta_2(t) = -K(t) \cdot \Omega_2 + \text{Drift}(t) + \xi(t);$$

$$\Delta\theta_1(t) - \Delta\theta_2(t) = -K(t) \cdot \Omega_1 \cdot \tau + K(t) \cdot \Omega_2 \cdot \tau + \eta(t);$$

$$K(t) \approx \frac{\Delta\theta_1(t) - \Delta\theta_2(t)}{\Omega_2 \tau - \Omega_1 \tau}.$$

Влияние шума η сглаживается некоторым фильтром или аппроксимацией в соответствии с заданной моделью.

Далее рассмотрим вопросы представления дрейфа. От вида модели и выбора факторов, влияющих на дрейф и масштабный коэффициент, во много зависит точность прибора. Известна следующая модель изменения углового положения волны в резонаторе [15, 16]:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\Omega K + \Delta_N + \Delta_\tau \sin 4(\theta - \varphi_2) - \Delta_\omega \cos 4(\theta - \varphi_1), \quad (7)$$

где Δ_N – постоянный дрейф, связанный с эллиптичностью колебаний; Δ_τ – коэффициент, характеризующий разнородность; Δ_ω – коэффициент, характеризующий разночастотность. В общем виде модель дрейфа следует взять в виде суммы гармонических функций от углового положения волны [17]:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\Omega K + \sum_k A_k \cos(k\theta - \varphi_k). \quad (8)$$

Важно отметить, что приведенная зависимость имеет смысл только для неизменных эксплуатационных условий. При изменении температуры окружающей среды собственная скорость ухода может меняться. Нужно отметить, что источниками тепла являются не только объекты во внешней среде, но собственная электроника прибора и сам резонатор. Поэтому стабилизация температуры окружающей среды не может полностью решить проблемы изменения характеристик собственного ухода ТВГ.

Для компенсации дрейфа следует выбирать модель, по крайней мере учитывающую два фактора – угол ориентации стоячей волны и температуру чувствительного элемента. Для контроля температуры резонатора нужно было бы установить термометр, но непосредственно измерять температуру резонатора нецелесообразно. Резонансная частота монотонно увеличивается с ростом температуры [18], при этом значение частоты можно получать в работающем приборе с помощью контура автоматической подстройки частоты колебаний, который обычно входит в состав ТВГ. Модель дрейфа в общем виде запишется следующим образом:

$$\text{Drift}(t) = D(\theta(t), f(t), q) + \eta, \quad (9)$$

где D – некоторая функция (модель дрейфа); f – частота колебаний резонатора; q – параметры модели дрейфа; η – случайные возмущения (несистематический дрейф, погрешности расчетов, шум).

Восстановление такой двухмерной поверхности относится к задаче двухфакторной аппроксимации имеющихся экспериментальных данных. Вид аппроксимирующей функции скорости дрейфа D можно выбирать разными способами. К примеру, можно использовать сумму гармонических функций (8). Но так как зависимость от резонансной частоты не входит в выражение, для получения адекватной модели нужно фиксировать температуру. То есть необходимо установить постоянную температуру окружающей среды, дожидаясь пока выровняется

$$D_j = (\text{Drift}_{j1}, \text{Drift}_{j2}, \dots, \text{Drift}_{jM_j})^T;$$

$$a_j = (a_{j0}, a_{jc2}, \dots, a_{js4}, a_{js8})^T;$$

$$b_j = (b_{j0}, b_{jc2}, \dots, b_{js4}, b_{js8})^T;$$

$$c_j = (c_{j0}, c_{jc2}, \dots, c_{js4}, c_{js8})^T,$$

где $I(j) = \{j1, j2, \dots, jM_j\}$. Тогда функцию Φ можно записать следующим образом:

$$\Phi = \sum_{j=1}^M (\Theta_j a_j + F_j \Theta_j b_j + F_j^2 \Theta_j c_j - D_j)^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Теперь нужно учесть условия, которые запишем следующим образом:

$$\varphi_j = a_{j+1} - a_j + (b_{j+1} - b_j) \bar{f}_j + (c_{j+1} - c_j) \bar{f}_j^2 = 0,$$

$$\psi_j = b_{j+1} - b_j + 2(c_{j+1} - c_j) \bar{f}_j = 0. \quad (13)$$

Преобразуем задачу условной оптимизации (12), (13) в задачу безусловной оптимизации методом неопределенных множителей Лагранжа:

$$\Phi(a, b, c, \lambda) =$$

$$= \sum_{j=1}^M (\Theta_j a_j + F_j \Theta_j b_j + F_j^2 \Theta_j c_j - D_j)^2 +$$

$$+ 2 \sum_{j=1}^{M-1} \lambda_j \varphi_j + 2 \sum_{j=1}^{M-1} \mu_j \psi_j \rightarrow \min, \quad (14)$$

где $\lambda_j = (\lambda_{j0}, \lambda_{jc0}, \lambda_{jc2}, \dots, \lambda_{js8})$ и $\mu_j = (\mu_{j0}, \mu_{jc0}, \mu_{jc2}, \dots, \mu_{js8})$ – неопределенные множители Лагранжа. Множитель 2 перед множителями Лагранжа введен для удобства матричной записи. Задачу (13) можно записать в стандартном виде, где $\Phi(x) = (Ax, x) + 2(B, x) + C$, $x = (a_1, \dots, a_N, \dots, c_1, \dots, c_N, \lambda_1, \dots, \lambda_{M-1}, \mu_1, \dots, \mu_{M-1})^T$. Запишем матрицу A и вектор B , которые по структуре являются блочными:

$$A = \begin{pmatrix} \Theta^T \Theta & \Theta^T F \Theta & \Theta^T F^2 \Theta & G & 0 \\ \Theta^T F \Theta & \Theta^T F^2 \Theta & \Theta^T F^3 \Theta & \bar{F}G & G \\ \Theta^T F^2 \Theta & \Theta^T F^3 \Theta & \Theta^T F^4 \Theta & \bar{F}^2 G & 2\bar{F}G \\ G^T & (\bar{F}G)^T & (\bar{F}^2 G)^T & 0 & 0 \\ 0 & G^T & 2(\bar{F}G)^T & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Theta^T F^j \Theta = \begin{pmatrix} \Theta_1^T F_1^j \Theta_1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \Theta_2^T F_2^j \Theta_2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \Theta_M^T F_M^j \Theta_M \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} -E & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ E & -E & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & E & -E & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & -E \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & E \end{pmatrix},$$

$$\bar{F}^j G = \begin{pmatrix} -\bar{f}_1^j E & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ \bar{f}_1^j E & -\bar{f}_2^j E & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \bar{f}_2^j E & -\bar{f}_3^j E & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & -\bar{f}_{M-1}^j E \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \bar{f}_{M-1}^j E \end{pmatrix};$$

$$B = (-\Theta^T D \quad -\Theta^T F D \quad -\Theta^T F^2 D \quad 0 \quad 0)^T,$$

$$\Theta^T D = (\Theta_1^T D_1 \dots \Theta_M^T D_M)^T,$$

$$\Theta^T F^j D = (\Theta_1^T F_1^j D_1 \dots \Theta_M^T F_M^j D_M)^T.$$

Постоянную матрицу C можно считать равной нулю, так как она не влияет на решение. Задачу (14) можно решать стандартными методами – прямыми или итерационными.

Выводы

Компенсация дрейфа с использованием полученной модели значительно сложнее подхода, где используются модели с одной переменной, однако использование модели от двух переменных может существенно повысить точность выходного сигнала и уменьшить время измерений дрейфа. Для съема данных можно задать определенную скорость нагревания/остывания и проводить постоянную фиксацию значений в отличие от предыдущего метода. Полученные данные аппроксимируют зависимостью от углового положения волны и резонансной частоты. Далее рассчитываются параметры, которые сохраняются в память прибора, для последующей компенсации дрейфа. В качестве информации о нагревании в работающем приборе используется значение резонансной частоты, которая монотонно зависит от температуры. Значение частоты берется из контура управления фазовой автоподстройки частоты.

Нужно заметить, что использование модели двух переменных может позволить исследовать зависимость дрейфа от скорости нагревания прибора [19]. При нагревании и остывании разные узлы прибора (корпус, основание, клеевой слой, резонатор) могут нагреваться по-разному, в результате этого в приборе не исключены случаи возникновения напряжений, которые зави-

сят от скорости нагревания. Это, в свою очередь, может приводить к зависимости дрейфа от скорости нагревания. Очевидно, используя модель одной переменной, данные изменения зафиксировать невозможно.

Библиографические ссылки

1. *Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для втузов. М. : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 1997. 68 с.
2. *Пешехонов В. Г.* Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1.
3. *Журавлев В. Ф.* Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние теории // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2(33).
4. *Roselle D. M.* The HRG: from wineglass to the Planets Spaceflight Mech. 2009, 134, 1-2.
5. *Арсланова М. Л., Трутнев Г. А.* Модель ТВГ // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 3. С. 4–17. DOI 10.22213/2410-9304-2017-3-4-17.
6. *Трутнев Г. А.* Шестнадцатиточечная модель твердотельного волнового гироскопа // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2011. № 2. С. 135–146.
7. *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.
8. *Журавлев В. Ф., Климов Д. М.* Волновой твердотельный гироскоп. М. : Наука, 1985. 125 с.
9. *Журавлев В. Ф.* О дрейфе волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) на вращающемся основании при управлении квадратурой в режимах «быстрого» и «медленного» времени // Механика твердого тела. 2003. № 3. С. 13–18.
10. *Лунин Б. С.* Влияние параметров полусферического резонатора на дрейф ТВГ // Гироскопические и навигационные системы. 2004. Т. 47, № 2. С. 31–36.
11. *Жбанов Ю. К., Журавлев В. Ф.* О балансировке ТВГ // Механика твердого тела. 1998. № 4.
12. *Мельников Р. В., Трутнев Г. А., Щенятский А. В.* Модель определения дефекта разнородности твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 2. DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-69-77.
13. Измерительно-вычислительный комплекс ТВГ / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 3. С. 62–72. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.
14. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе ТВГ / Г. И. Джанджгава, К. А. Бахонин, Г. М. Виноградов, А. В. Требухов // Гироскоп и навигация. 2008. № 1. С. 22–31.
15. *Лунин Б. С.* Физико-химические разработки полусферического резонатора ВТГ. М. : Изд-во МАИ, 2005. 224 с.
16. *Коган Ю. В., Рубиновская А. В.* Исследование решений уравнений для дрейфов ВТГ в зависимости от параметров // Известия высших учебных заведений УдГУ. 2002. № 6.
17. *Егармин Н. Е.* Погрешности ВТГ. Препринт № 391. М. : ИПМех Академии наук СССР, 1989. 23 с.
18. *Xu Wang, Wenqi Wu, Zhen Fang, Bing Luo, Yun Li, Qingan Jiang.* Temperature Drift Compensation for HRG Based on Natural Frequency // Sensors, 2012, № 12, pp. 6434-6446.
19. Патент RU 2619815. Способ и система компенсации дрейфа твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, П. К. Мачехин.

References

1. *Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alekhin A. V.* *Proektirovanie volnovogo tverdotel'nogo giroskopa* [Designing of a wave solid-state gyroscope]. Moscow, MGTU imeni N. E. Bauman Publ., 1997, 168 p. (in Russ.)
2. *Peshekhonov V. G.* [Current state and prospects for the development of gyroscopic systems]. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2011, no. 1 (in Russ.)
3. *Zhuravlev V. F.* [Wave solid-state gyroscope: the current state of the theory]. *Actual problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment*, 2011, no. 2(33) (in Russ.)
4. *Roselle D. M.* The HRG: from wineglass to the Planets Spaceflight Mech. 2009, 134, 1-2.
5. *Arslanova M. L., Trutnev G. A.* [Model TVG]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 4-17(in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2017-3-4-17.
6. *Trutnev G. A.* [Sixteen-point solid state wave gyro model]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*, 2011, no. 2, pp. 135-146 (in Russ.).
7. *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.
8. *Zhuravlev V. F., Klimov D. M.* *Volnovo tverdotel'nyi giroskop* [Wave solid-state gyroscope]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 125 p. (in Russ.).
9. *Zhuravlev V. F.* [On the drift of a wave solid-state gyroscope (VTG) on a rotating base while controlling quadrature in the “fast” and “slow”]. *Mekhanika tverdogo tela*, 2003, no 3, pp. 13-18 (in Russ.).
10. *Lunin B. S.* [Influence of parameters of a hemispherical resonator on the drift of TBG]. *Giroskopicheskie i navigatsionnye sistemy*, 2004, vol. 47, no. 2, pp. 31-36 (in Russ.).
11. *Zhbanov Yu. K., Zhuravlev V. F.* [About balancing of TBG]. *Mekhanika tverdogo tela*, 1998, no. 4 (in Russ.).
12. *Mel'nikov R. V., Trutnev G. A., Shchenyatskii A. V.* [The model of the defect definition of the vareness of the solid-state wave gyro]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 2 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-69-77.

13. Trutnev G. A., Nazarov S. B., Perevozchikov K. K., Shchenyatskii A. V. [Measuring and computing complex of TBG]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 62-72 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

14. Dzhandzhgava G. I., Bakhonin K. A., Vinogradov G. M., Trebukhov A. V. [Free-of-charge inertial navigation system based on TVG]. *Giroskop i navigatsiya*, 2008, no. 1, pp. 22-31 (in Russ.).

15. Lunin B. S. *Fiziko-khimicheskie razrabotki polosfericheskogo rezonatora VTG* [Physicochemical development of a hemispherical resonator VTG]. Moscow, MAI Publ., 2005, 224 p. (in Russ.).

16. Kogan Yu. V., Rubinovskaya A. V. [Investigation of the solutions of the equations for VTG drifts as

a function of the parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii UdGU*, 2002, no. 6 (in Russ.).

17. Egarmin N. E. *Pogreshnosti VTG* [Errors of VTG]. Preprint no. 391. Moscow, IPMeh Akademii nauk SSSR, 1989, 23 p. (in Russ.).

18. Xu Wang, Wenqi Wu, Zhen Fang, Bing Luo, Yun Li, Qingan Jiang. [Temperature Drift Compensation for HRG Based on Natural Frequency]. *Sensors*, 2012, no. 12, pp. 6434-6446.

19. Trutnev G. A., Nazarov S. B., Machekhin P. K. *Sposob i sistema kompensatsii dreifa tverdotel'nogo volnovogo giroskopa* [Method and system for compensating for the drift of a solid-state wave gyro]. Patent RU no. 2619815 (in Russ.).

Drift Compensation of Hemispherical Resonator Gyroscope

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

S. B. Nazarov, Applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. K. Perevoschikov, Applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

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

In the paper the measuring instrument the Solid-state Wave Gyroscope working in the mode of free oscillations is considered. Because of different errors the effect of Brian which is the cornerstone of operation of the instrument is distorted. The phenomena are considered distorting the Brian's effect and worsening the instrument accuracy – the inherent leaving of a wave (drift), and nonlinearity of an output signal, noise. Origins of drift and nonlinearity are given. The general task and a technique of increase in instrument accuracy due to use of models of drift and nonlinearity is formulated. Approaches to assessment of values of speed of drift of a wave and nonlinearity of an output signal for processing and obtaining parameters which will be used further in the operating instrument for increase in accuracy of an output signal are given. The factors influencing the drift of a solid-state wave gyroscope are studied. Different existing drift models are given. Shortcomings and features of the existing models are described. Need of account for a model of temperature influences is justified. The dependence of resonance frequency on temperature is given. The possibility of use of values of resonance frequency in working the instrument is justified. For assessment of parameters of drift it is offered to use the model of two variables. The dependence on the angular provision of a wave is approximated by harmonic functions; the dependence of drift on resonance frequency is offered to be approximated by means of splines. Formulas for calculation of parameters by results of drift measurements are derived. Features of the offered model are analyzed. The model can be used both for approximation of data, and for the subsequent compensating of an error in working the instrument. The possibility of using the received model for researches of dependence of drift on heating up speed is described.

Keywords: measuring device, hemispherical resonator gyro, device errors, drift, drift compensation, spline.

Получено 12.07.2018