

Компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления

© Д.А. Маслов, И.В. Меркурьев

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт», Москва, 111250, Россия

Рассмотрен волновой твердотельный гироскоп с электростатическими датчиками управления. Предложены три способа компенсации дрейфа гироскопа, вызванного нелинейными колебаниями резонатора. Первый способ, предназначенный для гироскопов, работающих в разомкнутом режиме датчика угловой скорости, заключается в использовании предложенной формулы угловой скорости, в которой учитываются коэффициент нелинейности и другие параметры математической модели гироскопа, предварительно найденные по специально разработанной методике. Вторым способом, предназначенным для гироскопов, работающих в компенсационном режиме датчика угловой скорости, основан на подаче управляющих сигналов, которые позволяют учесть коэффициент нелинейности и другие дефекты гироскопа. Третий способ заключается в линеаризации колебаний резонатора с помощью специально сформированных сигналов, подаваемых на электростатические датчики управления. Предложенные способы могут быть использованы для устранения нелинейности колебаний и линеаризации силовых характеристик датчиков управления волновых твердотельных гироскопов с полусферическими, цилиндрическими и кольцевыми резонаторами.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, нелинейные колебания, компенсация дрейфа

Введение. В настоящее время волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) является одним из перспективных датчиков инерциальной информации, так как обладает высокой надежностью, малыми габаритами и сравнительно низкой стоимостью [1–3]. Большое внимание при разработке этого гироскопа уделяют вопросам, связанным с уменьшением его дрейфа. В ряде работ [4–11] показано, что на дрейф влияют такие механические дефекты изготовления ВТГ, как неоднородность материала, переменная толщина резонатора, неравномерность упругих характеристик резонатора. Многие погрешности могут быть скомпенсированы подачей на управляющие электроды специально сформированных сигналов [1].

В работах [12–15] показано, что явления срыва колебаний, «биеение», нерегулярные и хаотические движения чувствительных элементов гироскопов, вызванные нелинейными эффектами различной природы, существенно уменьшают точность гироскопов.

В [16] отмечается, что погрешность, обусловленная нелинейными колебаниями, присуща всем без исключения гироскопам, в которых

реализуется идея маятника Фуко. Одним из способов устранения этой принципиальной погрешности ВТГ является поддержание заданной формы колебаний резонатора и равной нулю квадратуры [16]. Однако существуют режимы работы гироскопа, при которых квадратура не равна нулю, например, режим датчика угловой скорости с разомкнутой обратной связью.

В [17–19] предложены методики калибровки ВТГ, определяющие параметры математической модели гироскопа, в том числе и коэффициент нелинейности. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность учета параметров математической модели гироскопа и коэффициента нелинейности при алгоритмической и силовой компенсации погрешностей прибора.

Цель настоящей работы — создание методики компенсации погрешностей ВТГ, обусловленных нелинейными и анизотропными свойствами резонатора и наличием электростатических датчиков управления.

Уравнения нелинейных колебаний резонатора гироскопа с электростатическими датчиками управления. Рассмотрим тонкий упругий цилиндрический резонатор (рис. 1) радиусом R и длиной L на подвижном основании. Колебания упругой цилиндрической оболочки 1 , консольно закрепленной на основании 3 , возбуждаются электродами управления 2 , которые с соответствующими участками проводящей поверхности резонатора образуют конденсаторы. Обычно в приборах используют 8 или 16 электродов для возбуждения второй основной формы колебаний резонатора, которая представляет собой суперпозицию двух нормальных форм (стоячих волн колебаний), повернутых друг относительно друга на угол 45° . В режиме мягкого резонансного возбуждения колебаний создается первичная нормальная форма колебаний резонатора. При вращении основания гироскопа возникает вторичная нормальная форма, пучности которой совпадают с узлами первичной нормальной формы. В разомкнутом режиме работы отношение малой амплитуды вторичной нормальной формы к первичной пропорционально угловой скорости основания гироскопа [4, 5], т. е. гироскоп является датчиком угловой скорости.

С основанием прибора свяжем ортогональную систему координат $Oxyz$, ось z направим по оси симметрии резонатора. В качестве криволинейных координат примем нормализованную (отнесенную к радиусу резонатора) длину образующей α ($0 \leq \alpha \leq \alpha_1 = L/R$) и угол в окружном направлении θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$). Предположим, что оболочка как целое вращается вокруг своей оси симметрии z с угловой скоростью Ω , которую в дальнейшем будем считать малой по сравнению с характерной расчетной частотой колебаний резонатора ω .

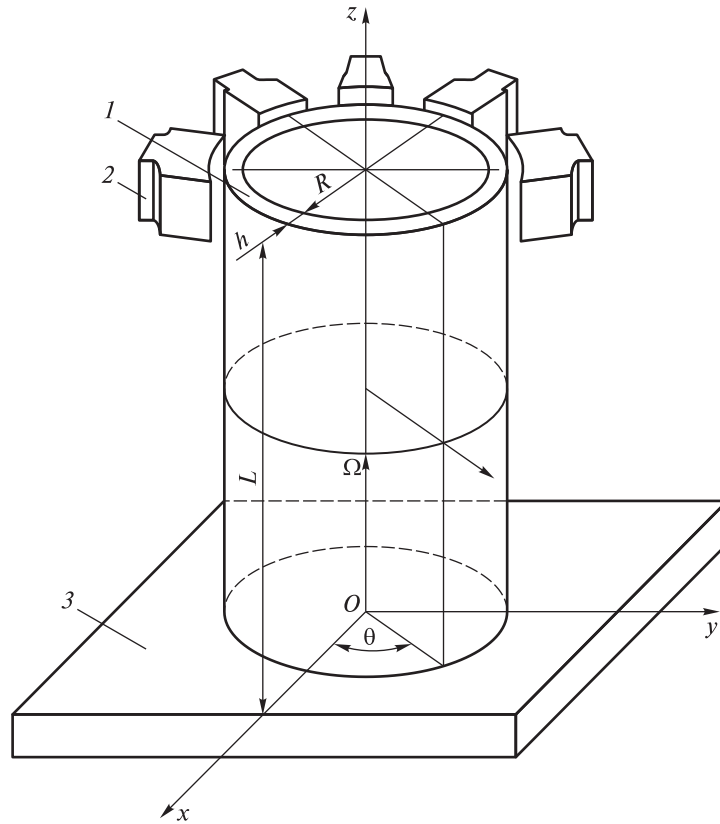


Рис. 1. Расчетная схема волнового твердотельного гироскопа

Для второй основной формы колебаний тонкой упругой цилиндрической оболочки резонатора функция нормального прогиба w может быть записана следующим образом:

$$w = 4\psi(\alpha)d(g_* \sin 2\theta - f_* \cos 2\theta), \quad (1)$$

где $\psi(\alpha)$ — функция формы колебаний [5]; d — зазор между недеформированным резонатором и электродами; $g_* = g_*(t)$, $f_* = f_*(t)$ — функции времени.

Дифференциальные уравнения, описывающие в одномодовом приближении колебания цилиндрического резонатора, представим в следующем виде [12]:

$$\begin{aligned} m\ddot{f}_* + \gamma\dot{f}_* + \nu\dot{g}_* + cf_* + \frac{2\psi(\alpha_1)}{C_0d^2} \sum_{i=1}^n (U_iC_i)^2 \cos 2\theta_i &= 0, \\ m\ddot{g}_* + \gamma\dot{g}_* - \nu\dot{f}_* + cg_* - \frac{2\psi(\alpha_1)}{C_0d^2} \sum_{i=1}^n (U_iC_i)^2 \sin 2\theta_i &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $m = \pi \rho h R^2 \int_0^{\alpha_1} (\psi'^2 + 20\psi^2) d\alpha$ — приведенная масса цилиндрического резонатора [5], соответствующая второй основной форме колебаний; γ и ν — параметры, которые характеризуют демпфирование и угловое движение основания соответственно; $c = m\omega^2$ — приведенная жесткость (ω — частота колебаний по основной моде); U_i — напряжение, приложенное к i -му электроду, расположенному под углом $\theta_i = \pi(i-1)/8$ к отсчетной оси, $i = 1, \dots, n = 16$; C_i — мгновенная емкость i -го конденсатора,

$$C_i = \frac{\epsilon_0 S}{d - w_i} = \frac{C_0}{1 - w_i / d}, \quad (3)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; S — площадь электрода; $w_i = 4\psi(\alpha_1)d(g_* \sin 2\theta_i - f_* \cos 2\theta_i)$ — функция нормального прогиба верхней кромки резонатора вблизи i -го электрода, $i = 1, \dots, n$. Точкой в (2) и далее обозначено дифференцирование по времени t .

Подставляя (3) в (2) и следуя работе [20], будем рассматривать уравнения динамики ВТГ (2) с учетом погрешностей изготовления резонатора:

$$\begin{aligned} \ddot{f} + \omega^2 f &= -(c^* + h_c^*)f - (n^* + h_s^*)g - (\gamma + b_c)\dot{f} - (\nu + b_s)\dot{g} + F_1, \\ \ddot{g} + \omega^2 g &= -(c^* - h_c^*)g - (-n^* + h_s^*)f - (\gamma - b_c)\dot{g} - (-\nu + b_s)\dot{f} + F_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $f = -4\psi(\alpha_1)f_*$, $g = 4\psi(\alpha_1)g_*$ — измеряемые вблизи от свободной кромки нормализованные обобщенные координаты основной формы колебаний резонатора; c^* , n^* — параметры позиционных сил; $h_c^* = h^* \cos 4\alpha$, $h_s^* = h^* \sin 4\alpha$, $b_c = b \cos 4\beta$, $b_s = b \sin 4\beta$ — компоненты, характеризующие упругую и вязкую анизотропию (h^* , b — модули разночастотности и разнодобротности; α , β — углы ориентации главных осей жесткости и главных осей диссипации относительно отсчетных осей); γ — коэффициент демпфирования; ν — параметр, характеризующий угловую скорость; точкой обозначено дифференцирование по времени t ; F_1 , F_2 — возмущающие воздействия электростатических датчиков, определяемые следующими формулами:

$$F_1 = \tilde{\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{(1 - w_i / d)^2} \cos 2\theta_i, \quad F_2 = \tilde{\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{(1 - w_i / d)^2} \sin 2\theta_i, \quad (5)$$

где $\tilde{\epsilon} = 8\psi^2(\alpha_1)C_0 / md^2$.

Напряжения U_i , подаваемые на электроды, определяются конкретным законом управления. Распределение разности потенциалов между электродами датчиков управления ДУ1–ДУ16 и резонатором показано на рис. 2, где нумерация датчиков ведется от ДУ1 против хода часовой стрелки.

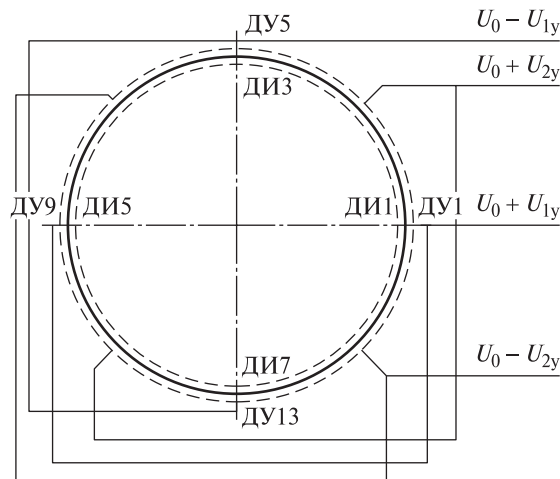


Рис. 2. Распределение разности потенциалов между электродами датчиков управления и резонатором

С помощью электродов управления создается переменное во времени силовое поле: на четыре электрода (см. рис. 2) подаются сигналы $U_0 + U_{1y}$ и $U_0 - U_{1y}$, где U_0 — постоянное опорное напряжение; $U_{1y} = U_0 u_{1y}$ — управляющее напряжение для возбуждения основной нормальной формы (u_{1y} — нормализованное управляющее напряжение). На другие четыре электрода подаются сигналы $U_0 + U_{2y}$ и $U_0 - U_{2y}$, где $U_{2y} = U_0 u_{2y}$ — напряжение для управления второй (квадратурной) нормальной формой колебаний резонатора (u_{2y} — нормализованное управляющее напряжение).

Для измерения отклонений резонатора используют электроды датчиков съема информации ДИ1–ДИ8, позволяющие формировать два измерительных канала, которые расположены под углом 45° друг относительно друга.

Пусть на электроды подается напряжение в виде

$$\begin{aligned}
 U_1 = U_9 = U_0(1 + u_{1y}), \quad U_3 = U_{11} = U_0(1 + u_{2y}), \\
 U_5 = U_{13} = U_0(1 - u_{1y}), \quad U_7 = U_{15} = U_0(1 - u_{2y}), \\
 U_i = U_0, \quad i = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Подставив (6) в (5) и проведя разложение в ряд по f и g , получим возмущающие воздействия электростатических датчиков:

$$\begin{aligned} F_1 &= \varepsilon[2f + 3(f^2 + g^2)f + (1 + 3f^2)u_{1y}], \\ F_2 &= \varepsilon[2g + 3(f^2 + g^2)g + (1 + 3g^2)u_{2y}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\varepsilon = 64\psi^2(\alpha_1)C_0U_0^2 / md^2$.

В (7) и далее слагаемые, содержащие степени f и g выше третьей, опущены, а также отброшены слагаемые fu_{1y}^2 , gu_{2y}^2 , указывающие на незначительное изменение частоты, поскольку $u_{1y} \leq 0,1$ и $u_{2y} \leq 0,1$.

Первые слагаемые в (7) в квадратных скобках указывают на уменьшение частоты колебаний, что согласуется с результатом работы [21]. Вторые слагаемые в квадратных скобках $3(f^2 + g^2)f$, $3(f^2 + g^2)g$ представляют собой кубическую нелинейность. Влияние нелинейных свойств электростатического контура управления изучено в [12]. В этой же работе показано, что опорное напряжение вызывает дрейф гироскопа, пропорциональный произведению амплитуд основной и квадратурной волн колебаний и квадрату опорного напряжения.

Для мягкого резонансного возбуждения и стабилизации амплитуды колебаний резонатора по заданной основной форме колебаний выберем управляющие напряжения в виде

$$\begin{aligned} u_{1y} &= (-u_1^* \sin \omega_0 t + u_2^* \cos \omega_0 t)(1 - 3f^2), \\ u_{2y} &= (-u_3^* \sin \omega_0 t + u_4^* \cos \omega_0 t)(1 - 3g^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь u_1^* , u_2^* , u_3^* , u_4^* — нормализованные амплитуды сигналов возбуждения колебаний резонатора; ω_0 — частота внешнего гармонического возбуждения второй формы колебаний резонатора.

Подставив (8) в (7), а затем в (4), получим систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику резонатора в одномодовом приближении:

$$\begin{aligned} \ddot{f} + \omega^2 f &= -(\tilde{c}^* + h_c^*)f - (n^* + h_s^*)g - (\gamma + b_c)\dot{f} - (v + b_s)\dot{g} + \\ &+ \xi^*(f^2 + g^2)f - \varepsilon[u_1^* \sin \omega_0 t - u_2^* \cos \omega_0 t], \\ \ddot{g} + \omega^2 g &= -(\tilde{c}^* - h_c^*)g - (-n^* + h_s^*)f - (\gamma - b_c)\dot{g} - (-v + b_s)\dot{f} + \\ &+ \xi^*(f^2 + g^2)g - \varepsilon[u_3^* \sin \omega_0 t - u_4^* \cos \omega_0 t]. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $\xi^* = 3\varepsilon$ — коэффициент нелинейности; $\tilde{c}^* = c^* - 2\varepsilon$ — параметр позиционных сил, позволяющий учесть влияние опорного напряжения.

Сигналы управления u_1^* , u_2^* , u_3^* , u_4^* полагают медленно изменяющимися функциями времени. Решение системы (9) имеет колебательный характер с резонансной частотой ω , составляющей около 10 кГц. При отсутствии возмущений в правой части (9) решение системы будет чисто гармоническим. Малые возмущения вызваны инструментальными погрешностями изготовления резонатора, неравномерным демпфированием колебаний, гироскопическими силами и нелинейностью. Малые позиционные и скоростные силы, имеющиеся в правой части уравнений (9), приводят к малому изменению резонансной частоты — примерно на 1 Гц, что позволяет использовать асимптотические методы исследования задачи.

Применим к системе (9) метод усреднения Крылова — Боголюбова [22], для чего приведем ее к стандартному виду посредством перехода от переменных f, \dot{f}, g, \dot{g} к медленным переменным p_1, q_1, p_2, q_2 :

$$\begin{aligned} f &= p_1 \sin \omega_0 t + q_1 \cos \omega_0 t, & \dot{f} &= p_1 \omega_0 \cos \omega_0 t - q_1 \omega_0 \sin \omega_0 t, \\ g &= p_2 \sin \omega_0 t + q_2 \cos \omega_0 t, & \dot{g} &= p_2 \omega_0 \cos \omega_0 t - q_2 \omega_0 \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), разрешая полученную систему уравнений относительно медленных переменных $\dot{p}_1, \dot{q}_1, \dot{p}_2, \dot{q}_2$ и проводя осреднение по явно входящему времени [4, 5], приходим к системе уравнений движения в первом приближении метода осреднения:

$$\begin{aligned} 2\dot{q}_1 &= -\gamma q_1 + u_1 - b_c q_1 + h_c p_1 + c p_1 - b_s q_2 + h_s p_2 + n p_2 - 2\lambda p_1 - \nu q_2 + \xi k_1, \\ 2\dot{p}_1 &= -\gamma p_1 + u_2 - b_c p_1 - h_c q_1 - c q_1 - b_s p_2 - h_s q_2 - n q_2 - \nu p_2 + 2\lambda q_1 + \xi k_2, \\ 2\dot{q}_2 &= -\gamma q_2 + u_3 + b_c q_2 - h_c p_2 + c p_2 - b_s q_1 + h_s p_1 - n p_1 - 2\lambda p_2 + \nu q_1 + \xi k_3, \\ 2\dot{p}_2 &= -\gamma p_2 + u_4 + b_c p_2 + h_c q_2 - c q_2 - b_s p_1 - h_s q_1 + n q_1 + \nu p_1 + 2\lambda q_2 + \xi k_4. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $u_i = \varepsilon u_i^* / \omega$, $i = 1, \dots, 4$; $h_c = h_c^* / \omega$; $c = \tilde{c}^* / \omega$; $h_s = h_s^* / \omega$; $n = n^* / \omega$; $\lambda = (\omega_0 - \omega) / \omega$ — малая частотная расстройка; $\xi = \xi^* / \omega$; $k_1 = -p_1 E - q_2 X$; $k_2 = q_1 E - p_2 X$; $k_3 = -p_2 E + q_1 X$; $k_4 = q_2 E + p_1 X$; $E = 3(q_1^2 + p_1^2 + q_2^2 + p_2^2) / 4$; $X = (p_2 q_1 - p_1 q_2) / 2$.

Отметим, что в электронном контуре гироскопа физически реализуется схема осреднения: контуры обработки сигналов выделяют медленные переменные p_1, q_1, p_2, q_2 из высокочастотных функций времени f и g , измеренных с помощью датчиков съема информации.

Динамика резонатора в разомкнутом режиме функционирования датчика угловой скорости. Рассмотрим первый случай компенсации дрейфа, используемый в разомкнутом режиме функциони-

рования. Положим, что $u_1 = u_0$, $u_2 = u_3 = u_4 = 0$, где u_0 — заданная амплитуда входного воздействия, возбуждающего первичные колебания. Приняв во внимание, что в стационарном режиме колебаний $\dot{p}_1 = \dot{q}_1 = \dot{p}_2 = \dot{q}_2 = 0$, из уравнений (11) получим формулу для вычисления угловой скорости с учетом нелинейности колебаний:

$$v = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2}{q_1^2 + p_1^2}}, \quad (12)$$

где

$$a_1 = (\xi X - b_s)q_1 + u_3 + (-n + h_s)p_1 + (c - 2\lambda - \xi E - h_c)p_2 + (-\gamma + b_c)q_2,$$

$$a_2 = (\xi X - b_s)p_1 + u_4 + (n - h_s)q_1 + (-c + 2\lambda + \xi E + h_c)q_2 + (-\gamma + b_c)p_2.$$

Параметры v , ξ , b_s , b_c , u_3 , u_4 , n , c , h_s , h_c , γ , используемые в формуле (12), предварительно определяют по методике идентификации параметров гироскопа, предложенной в [17–19].

В частности, при $h_s = h_c = b_s = b_c = c = n = \xi = 0$ выражение (12) для определения скорости основания совпадает с формулой, полученной в [5]:

$$v = \frac{B}{A} \sqrt{\gamma^2 + 4\lambda^2},$$

где $A = \sqrt{q_1^2 + p_1^2}$, $B = \sqrt{q_2^2 + p_2^2}$ — амплитуды первичных и вторичных колебаний резонатора.

Таким образом, формула (12) позволяет учесть влияние рассматриваемых параметров и устранить вызванный ими дрейф.

Управление движением резонатора в компенсационном режиме датчика угловой скорости. Рассмотрим второй случай компенсации дрейфа, используемый при функционировании ВТГ в режиме датчика угловой скорости с обратной связью. Целью управления являются возбуждение и поддержание заданной амплитуды колебаний основной нормальной формы и компенсация квадратурной нормальной формы колебаний. Зададим программные значения \bar{A} , \bar{B} амплитуд колебаний двух нормальных форм в виде

$$\bar{A} = \sqrt{\bar{q}_1^2 + \bar{p}_1^2}, \quad \bar{B} = 0,$$

где \bar{q}_1 , \bar{p}_1 — заданные программные значения медленных переменных.

Зададим управление u_1, \dots, u_4 в виде пропорциональной обратной связи по измерению медленных переменных p_1, q_1, p_2, q_2 :

$$\begin{aligned}
u_1 &= b_c q_1 - (c + h_c - 2\lambda) p_1 + b_s q_2 - (h_s + n) p_2 + \\
&\quad + \xi(E p_1 + X q_2) - K_1(q_1 - \bar{q}_1), \\
u_2 &= (c + h_c - 2\lambda) q_1 + b_c p_1 + (h_s + n) q_2 + b_s p_2 + \\
&\quad + \xi(-E q_1 + X p_2) - K_1(p_1 - \bar{p}_1), \\
u_3 &= b_s q_1 - (h_s - n) p_1 - b_c q_2 + (-c + h_c + 2\lambda) p_2 + \\
&\quad + \xi(-X q_1 + E p_2) - K_1 q_2, \\
u_4 &= (h_s - n) q_1 + b_s p_1 - (-c + h_c + 2\lambda) q_2 - b_c p_2 + \\
&\quad + \xi(-X p_1 - E q_2) - K_1 p_2.
\end{aligned} \tag{13}$$

Здесь K_1 — коэффициент усиления в цепи обратной связи, выбираемый из условия обеспечения асимптотической устойчивости замкнутой системы управления.

Подставив (13) в (11), получим систему, решение которой можно представить в виде суммы асимптотически устойчивого решения, зависящего от начальных условий $q_1(0) = q_{10}$, $p_1(0) = p_{10}$, $q_2(0) = q_{20}$, $p_2(0) = p_{20}$, требуемых значений \bar{q}_1 , \bar{p}_1 и стационарных частных решений:

$$\begin{aligned}
q_{1*} &= K_1 \bar{q}_1 (K_1 + \gamma) / P, & q_{2*} &= -K_1 \bar{q}_1 v / P, \\
p_{1*} &= K_1 \bar{p}_1 (K_1 + \gamma) / P, & p_{2*} &= -K_1 \bar{p}_1 v / P.
\end{aligned}$$

Здесь $P = v^2 + (K_1 + \gamma)^2$.

Оценка угловой скорости основания \hat{v} может быть определена по измерениям установившихся значений медленных переменных:

$$\hat{v} = -(K_1 + \gamma) \frac{p_{2*}}{p_{1*}}, \quad \hat{v} = -(K_1 + \gamma) \frac{q_{2*}}{q_{1*}}.$$

Точность определения угловой скорости основания зависит от уровня случайных и систематических погрешностей в измерениях медленных переменных. Приведенные выше формулы для расчета компенсационного режима подтверждены результатами численного моделирования [23].

Были выбраны следующие требуемые значения медленных переменных: $\bar{q}_1 = 1$, $\bar{p}_1 = 0$, $\bar{q}_2 = 0$, $\bar{p}_2 = 0$. Время выхода на режим установившихся колебаний составляет примерно 0,02 с. Значения q_1 и q_2 в установившемся режиме не совпадают с заданными значениями медленных переменных, т. е. имеется статическая ошибка регулирования, вызванная наличием угловой скорости основания. Время функциональной готовности прибора существенно сокращается. Использование

уравнения (13) позволяет компенсировать влияние рассматриваемых параметров и устранить вызванный ими дрейф.

Линеаризация колебаний резонатора волнового твердотельного гироскопа и сил электростатических датчиков управления. Рассмотрим третий случай компенсации дрейфа. Для компенсации нелинейности датчиков управления подается напряжение в виде

$$\begin{aligned} U_1 = U_9 = U_0(1 - w_1/d)(1 + u_{1y}), \quad U_3 = U_{11} = U_0(1 - w_3/d)(1 + u_{2y}), \\ U_5 = U_{13} = U_0(1 - w_5/d)(1 - u_{1y}), \quad U_7 = U_{15} = U_0(1 - w_7/d)(1 - u_{2y}), \quad (14) \\ U_i = U_0(1 - w_i/d), \quad i = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16. \end{aligned}$$

Подставив (14) в (5) и проведя разложение в ряд по f и g , получим возмущающие воздействия электростатических датчиков:

$$F_1 = \epsilon u_{1y}, \quad F_2 = \epsilon u_{2y}. \quad (15)$$

Из выражений (15) ясно, что использование алгоритмов формирования напряжений (14) позволяет устранить нелинейности электростатических датчиков управления. В (15) отсутствуют слагаемые, вызывающие изменение частоты колебаний и дрейф гироскопа.

Заключение. Разработаны алгоритмы определения угловой скорости волнового твердотельного гироскопа в режиме функционирования датчика угловой скорости с учетом нелинейности колебаний резонатора. Для реализации компенсационного режима измерения предложены алгоритмы управления, позволяющие учесть дефекты гироскопа, в том числе нелинейности. Учет нелинейностей при формировании управляющих сигналов позволит увеличить отношение сигнала к шуму и, следовательно, повысить точностные характеристики гироскопа на основе увеличения амплитуды колебаний резонатора.

Предложены алгоритмы формирования напряжений на электростатических датчиках, линеаризующие силовые характеристики датчиков управления. Разработанная методика может быть использована для компенсации нелинейных колебаний и линеаризации силовых характеристик датчиков управления волновых твердотельных гироскопов с полусферическими, цилиндрическими и кольцевыми резонаторами.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ
(проекты № 16-01-00772-а, № 16-08-01269-а).*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.

- [2] Басараб М.А., Лунин Б.С., Матвеев В.А., Фомичев А.В., Чуманкин Е.А., Юрин А.В. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2014, № 4, с. 80–96.
- [3] Jeanroy A., Bouvet A., Remillieux G. HRG and marine applications. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 67–74.
- [4] Журавлев В.Ф., Климов Д.М. *Волновой твердотельный гироскоп*. Москва, Наука, 1985, 125 с.
- [5] Меркурьев И.В., Подалков В.В. *Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов*. Москва, Физматлит, 2009, 228 с.
- [6] Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. *Проектирование волнового твердотельного гироскопа*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 167 с.
- [7] Журавлев В.Ф. Дрейф несовершенного ВТГ. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 2004, № 4, с. 19–23.
- [8] Жбанов Ю.К., Журавлев В.Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 1998, № 4, с. 4–16.
- [9] Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А., Чуманкин Е.А. Балансировка металлических резонаторов волновых твердотельных гироскопов низкой и средней точности. *Наука и образование*, 2013, № 6.
DOI: 10.7463/0613.0579179
- [10] Basarab M.A., Matveev V.A., Lunin B.S., Chumankin E.A. Static Balancing of Metal Resonators of Cylindrical Resonator Gyroscopes. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 213–218.
- [11] Basarab M.A., Matveev V.A., Lunin B.S., Chumankin E.A. Algorithms and Technologies for Surface Balancing of Hemispherical and Cylindrical Resonator Gyroscopes. *22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2015–22*. St. Petersburg, 2015, pp. 383–386.
- [12] Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuriev I.V. Nonlinear Effects in Dynamics of Cylindrical Resonator of Wave Solid-State Gyro with Electrostatic Control System. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 224–229.
- [13] Sudipto K. de., Aluru N.R. Complex nonlinear oscillations in electrostatically actuated microstructures. *J. Microelectromech. Syst.*, 2006, vol. 15, no. 2, pp. 355–369.
- [14] Rhoads J., Shaw S., Tunner K., Moehlis J., DeMartini B., Zhang W. Generalized parametric resonance in electrostatically actuated microelectromechanical oscillators. *J. Sound and Vib.*, 2006, vol. 296, pp. 797–829.
- [15] Chavarett F.R., Balthaza I.M., Guilherm I.R., Nascimento O.S. A reducing of chaotic behavior to a periodic orbit, of a combdriver drive system (MEMS) using particle swarm optimization. *Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications*. Serra Negra, 2010, pp. 378–383.
- [16] Журавлев В.Ф. Управляемый маятник Фуко как модель одного класса свободных гироскопов. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 1997, № 6, с. 27–35.
- [17] 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. 24–29.
- [18] Маслов Д.А. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа при медленно меняющейся частоте вынужденных колебаний. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10 (70).
DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1695

- [19] Маслов Д.А. Идентификация параметров гироскопа с цилиндрическим резонатором при учете влияния нелинейности на амплитуду вынуждающего воздействия. *Машиностроение и инженерное образование*, 2017, № 1 (50), с. 24–31.
- [20] Журавлев В.Ф. Задача идентификации погрешностей обобщенного маятника Фуко. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 2000, № 5, с. 5–9.
- [21] Журавлев, В.Ф., Линч Д.Д. Электрическая модель волнового твердотельного гироскопа. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 1995, № 5, с. 12–24.
- [22] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. *Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний*. Москва, Наука, 1974, 503 с.
- [23] Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuryev I.V., Podalkov V.V. Compensation Methods of Ring Resonator Microgyroscope Drift. *24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2017. Proceedings 24. 2017*, pp. 64–67.

Статья поступила в редакцию 26.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Маслов Д.А., Меркурьев И.В. Компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 9.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1800>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики FARM–2017», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 октября 2017 г.

Меркурьев Игорь Владимирович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ». Сфера научных интересов: теоретическая и прикладная механика, теория управления, приближенные методы в механике, управлении и робототехнике.
e-mail: MerkuryevIV@ya.ru, MerkuryevIV@mpei.ru

Маслов Дмитрий Александрович — аспирант кафедры высшей математики НИУ «МЭИ». Сфера научных интересов: теоретическая механика, математическое моделирование. e-mail: dm_93@live.ru, MaslovDmA@mpei.ru

Error correction in solid-state wave gyroscope with electrostatic control sensors

© D.A. Maslov, I.V. Merkuriev

Moscow Power Engineering Institute (National Research University),
Moscow, 111250, Russia

The article considers three ways of correcting drift caused by resonator nonlinear oscillations in a solid-state wave gyroscope with electrostatic control sensors. The first method is for gyros operating in the open mode of the angular velocity sensor.

The proposed angular velocity formula is used taking into account the nonlinearity factor and other parameters of the gyro mathematical model, previously found by a specially developed technique. The second method is developed for gyros operating in the compensation mode of the angular velocity sensor. The method is based on the supply of control signals taking into account the nonlinearity factor and other gyro imperfections. The third method consists in linearizing the resonator oscillations by means of specially generated signals applied to electrostatic control sensors.

The proposed methods can be used for eliminating the nonlinearity of the oscillations and the linearization of the power characteristics of the control sensors for solid-state wave gyroscopes with hemispherical, cylindrical and ring resonators.

Keywords: *solid-state wave gyroscope, non-linear oscillations, drift compensation*

REFERENCES

- [1] Zhuravlev V.F., Perelyaev S.E. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii — Innovative, information and communication technologies*, 2016, no. 1, pp. 425–431.
- [2] Basarab M.A., Lunin B.S., Matveev V.A., Fomichev A.V. Chumankin E.A., Yurina A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*, 2014, no. 4, pp. 80–96.
- [3] Jeanroy A., Bouvet A., Remillieux G. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 67–74.
- [4] Zhuravlev V.F., Klimov D.M. *Volnovoy tverdotelnyy giroskop* [Solid-state wave gyroscope]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 125 p.
- [5] Merkuriev I.V., Podalkov V.V. *Dinamika mikromekhanicheskogo i volnogo tverdotelnogo giroskopov* [Dynamics of micromechanical and solid-state wave gyroscopes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 228 p.
- [6] Matveev V.A., Lipatnikov V.I., Alekhin A.V. *Proektirovanie volnogo tverdotelnogo giroskopa* [Designing of a solid-state wave gyroscope]. Moscow, BMSTU Publ., 1997, 167 p.
- [7] Zhuravlev V.F. *Mekhanika tverdogo tela. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 2004, no. 4, pp. 19–23.
- [8] Zhdanov Yu.K., Zhuravlev V.F. *Mekhanika tverdogo tela. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1998, no. 4, pp. 4–16.
- [9] Matveev V.A., Lunin B.S., Basarab M.A., Chumankin E.A. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskii zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2013, no. 6.
DOI: 10.7463/0613.0579179

- [10] Basarab M.A., Matveev V.A., Lunin B.S., Chumankin E.A. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 213–218.
- [11] Basarab M.A., Matveev V.A., Lunin B.S., Chumankin E.A. Algorithms and Technologies for Surface Balancing of Hemispherical and Cylindrical Resonator Gyroscopes. *Proceedings of the 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2015–22*. St. Petersburg, 2015, pp. 383–386.
- [12] Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuriev I.V. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 224–229.
- [13] Sudipto, K. De., Aluru, N.R. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, no. 2, pp. 355–369.
- [14] Rhoads, J., Shaw, S., Tunner, K., Moehlis, J., DeMartini, B., Zhang, W. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 296, pp. 797–829.
- [15] Chavarett F.R., Balthaza I.M., Guilherm I.R., Nascimento O.S. A reducing of chaotic behavior to a periodic orbit, of a combdriver drive system (MEMS) using particle swarm optimization. *Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications*. Serra Negra. 2010, pp. 378–383.
- [16] Zhuravlev V.F. *Mekhanika tverdogo tela. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1997, no. 6, pp. 27–35.
- [17] Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuriev I.V. *Pribory i sistemy, Upravlenie, control, diagnostika — Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2014, no. 5, pp. 24–29.
- [18] Maslov D.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 10 (70). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1695
- [19] Maslov D.A. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie — Mechanical engineering and engineering education*, 2017, no. 1 (50), pp. 24–31.
- [20] Zhuravlev V.F. *Mekhanika tverdogo tela. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 2000, no. 5, pp. 5–9.
- [21] Zhuravlev V.F., Linch D.D. *Mekhanika tverdogo tela. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk — Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1995, no. 5, pp. 12–24.
- [22] Bogolyubov N.N., Mitropolsky Yu.A. *Asimptoticheskie metody v teorii nelineynykh kolebaniy [Asymptotic methods in the nonlinear oscillation theory]*. Moscow, Nauka Publ., 1974, 503 p.
- [23] Maslov A.A., Maslov D.A., Merkuriev I.V., Podalkov V.V. Compensation Methods of Ring Resonator Microgyroscope Drift. *Proceedings of the 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2017–24*. St. Petersburg, 2017, pp. 64–67.

Merkuriev I.V., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). Research interests: theoretical and applied mechanics, control theory, approximate methods in mechanics, control and robotics.
e-mail: MerkurievIV@ya.ru, MerkurievIV@mpei.ru

Maslov D.A., post graduate student, Department of Higher Mathematics, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). Research interests: theoretical mechanics, mathematical simulation. e-mail: dm_93@live.ru, MaslovDmA@mpei.ru