

Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе

© В.П. Подчерцев, Цинь Цзыхао

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены особенности определения масштабных коэффициентов датчиков момента динамически настраиваемых гироскопов на автоматизированном поворотном стенде, построенном на базе одноосного гиросtabilизатора. В отличие от обычных поворотных стендов, где задаются и поддерживаются очень точные значения скоростей вращения с помощью прецизионных электромеханических систем, в гиросtabilизаторе платформа стенда следит за положением управляемого гироскопа. Такой стенд отличается простотой конструкции, малыми массогабаритными характеристиками, энергопотреблением и себестоимостью. Разработана математическая модель системы гироскоп — гиросtabilизатор и исследовано ее движение в переходном и установившемся режимах. Для численного моделирования процесса калибровки гироскопа использована программная среда Simulink (MATLAB). Показано влияние на точность калибровки параметров измерительной системы, в состав которой входят датчики угла поворота, приборы измерения времени разворота платформы и токов в моментных датчиках. Определено влияние собственной скорости вращения Земли.

Ключевые слова: динамически настраиваемый гироскоп, гиросtabilизатор, калибровка

Введение. Производство современных приборов навигации, стабилизации и ориентации невозможно без технологических испытаний на вращающихся стендах [1] с угловыми скоростями, соответствующими реальным условиям эксплуатации. Компании Acutronic (Швейцария), Ideal Aerosmith (США) и Actidyn Systemes (Франция) и другие производят современные поворотные стенды, обеспечивающие задание угловых скоростей в диапазоне 0,01...10 000 град/с при нестабильности 0,001...0,003 град/с и высокую точность позиционирования (около 2 угл. с) [2–6]. Эти стенды имеют достаточно большие габаритные размеры и грузоподъемность, необходимые для испытаний широкой номенклатуры изделий. Однако их высокая стоимость не всегда соответствует габаритам калибруемых динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ), а также возможностям небольших предприятий, научно-исследовательских и университетских лабораторий [7].

Для высокоточной калибровки ДНГ в качестве альтернативного метода может быть предложен метод калибровки на поворотном

стенде, в основу которого положен принцип работы одноосного гиросtabilизатора [8]. Для реализации данной методики необходимо решение ряда задач: определение уравнений движения комплексной системы гироскоп — поворотный стенд с учетом особенностей динамики гироскопа и стенда в реальных условиях эксплуатации; моделирование полученных уравнений в среде Simulink с выбором оптимальных параметров контуров обратной связи (КОС) гироскопа и гиросtabilизатора; оценка влияния собственной скорости вращения Земли на измерительные характеристики разработанной методики.

Схема одноосного поворотного стенда. На рис. 1 приведена кинематическая схема поворотного стенда с установленным на нем калибруемым гироскопом 1. Представленная конструкция стенда состоит из основания 2; двигателя разгрузки гиросtabilизатора 3; коллектора 4, необходимого для передачи информации с испытуемого прибора и его питания; вала 5; платформы 6, кронштейна 7 для установки гироскопа; датчика угла поворота платформы 8, статор которого закреплен на основании 2, а элементы подвижной части зафиксированы на платформе 6; $x, y, z, x_n, y_n, z_n, \xi, \eta, \zeta$ — системы координат, связанные с корпусом гироскопа, платформой стенда и географической системой координат; ω_i — угловая скорость вращения платформы относительно основания стенда; ω_B, ω_r — вертикальная и горизонтальная составляющие скорости собственного вращения Земли; H — кинетический момент ротора ДНГ; $ДУ_x, ДУ_y$ — датчики угла гироскопа по осям x и y ; $ДМ_x, ДМ_y$ — датчики момента гироскопа по осям x и y ; $ДС$ — датчик момента стенда.

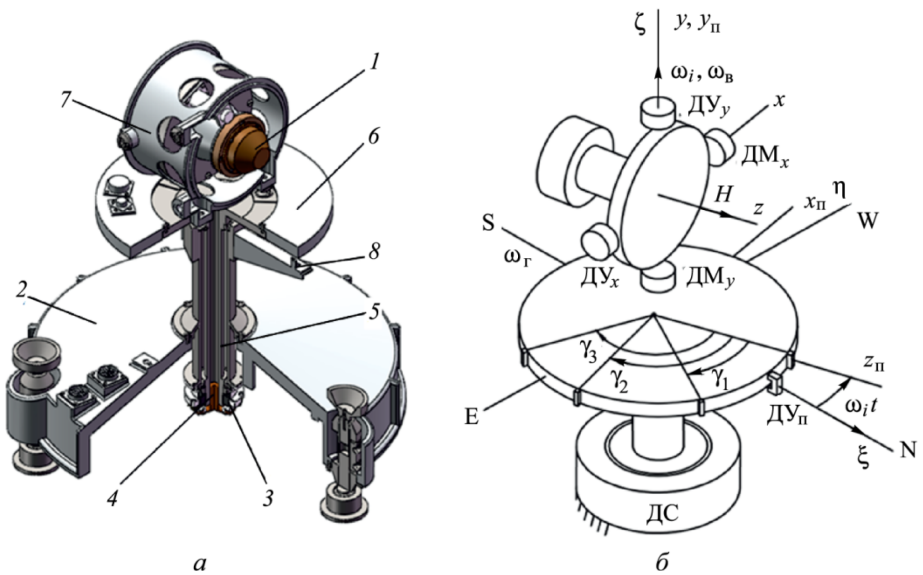


Рис. 1. Общий вид (а) и кинематическая схема (б) одноосного поворотного стенда

Платформа вращается относительно неподвижного основания, причем ось ее вращения расположена по вертикали места испытания. Гироскоп устанавливается на стенде с помощью кронштейна одной из калибруемых осей вдоль оси вращения платформы.

На рис. 2 представлена функционально-кинематическая схема одноосного поворотного стенда. При такой методике калибруемый гироскоп является одновременно и чувствительным элементом стенда. В процессе калибровки гироскоп поочередно устанавливается в положение 1 (ось y — ось стабилизации) (см. рис. 2) и затем в положение 2 (ось x — ось стабилизации). В каждом из этих положений сигнал с датчиков угла DU_y (для положения 1) или DU_x (для положения 2) через фазочувствительный детектор и усилитель мощности подается на обмотку двигателя разгрузки, который разворачивает платформу в сторону уменьшения угла рассогласования между ротором и платформой вокруг оси стабилизации.

В моментный датчик канала x (для положения 1) или y (для положения 2) подается высокостабильный ток управления от внешнего источника питания, вызывающий прецессию ротора гироскопа и, соответственно, вращение платформы в положительном и затем отрицательном направлениях.

Датчики углов и моментов ортогональных каналов включены, как показано на рис. 2, в режим «электрической пружины» (ДУС).

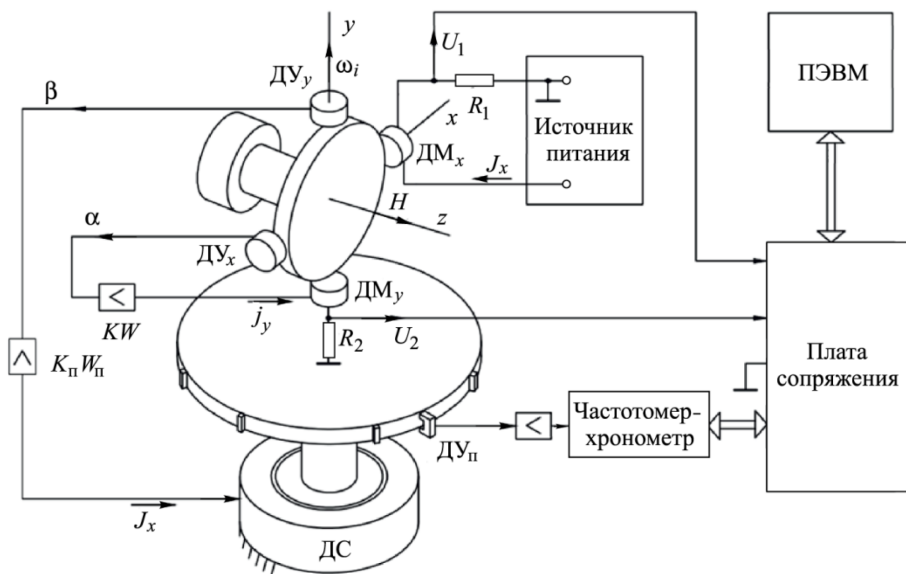


Рис. 2. Функционально-кинематическая схема стенда:

α, β — углы отклонения ротора гироскопа относительно его корпуса; R_i, U_i ($i = 1, 2$) — измерительные сопротивления и выходные напряжения; $КФ, K_n W_n$ — передаточные функции контура обратной связи гироскопа и гиросtabilизатора

Измерение угловой скорости платформы стенда ω_i проводится с помощью импульсного датчика угла ДУ_п, сигнал которого используется для запуска электронного хронометра, определяющего с высокой точностью время каждого оборота платформы t ($\gamma = 360^\circ$) или поворота на фиксированные, предварительно аттестованные с высокой точностью углы γ_1 , γ_2 и γ_3 (см. рис. 1). Угловая скорость определяется по результатам измерения:

$$\omega = \frac{\gamma}{t}. \quad (1)$$

Для автоматизации процесса калибровки (см. рис. 2) можно использовать компьютер с модулем сопряжения типа L-CARD 14-440 или других типов.

Уравнения движения системы. Введем обозначения: $K_{\text{дл}}$ — крутизна датчиков угла ДНГ; W , $W_{\text{п}}$ и $K_{\text{ус}}$, $K_{\text{ус}}^{\text{п}}$ — передаточные функции и коэффициенты передачи усилителя-формирователя КОС ДНГ и стенда; K_x , K_y и K_{xy} , K_{yx} — основные и перекрестные, обусловленные технологической неточностью выставки углового положения, масштабные коэффициенты датчиков моментов гироскопа.

Моменты, вызываемые токами j_x и j_y в катушках датчиков моментов, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{\text{мх}} &= K_x j_x + K_{xy} j_y; \\ M_{\text{мы}} &= K_y j_y + K_{yx} j_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Токи обратной связи, протекающие по катушкам моментных датчиков, включенных в режим ДУС, формируются следующим образом:

для положения 1

$$j_y(s) = K_{\text{дл}} K_{\text{ус}} W(s) \alpha(s); \quad (3)$$

для положения 2

$$j_x(s) = -K_{\text{дл}} K_{\text{ус}} W(s) \beta(s). \quad (4)$$

На рис. 3 и 4 показаны элементы кинематики углового движения системы, а также моменты, приложенные к ротору ДНГ и платформе стенда.

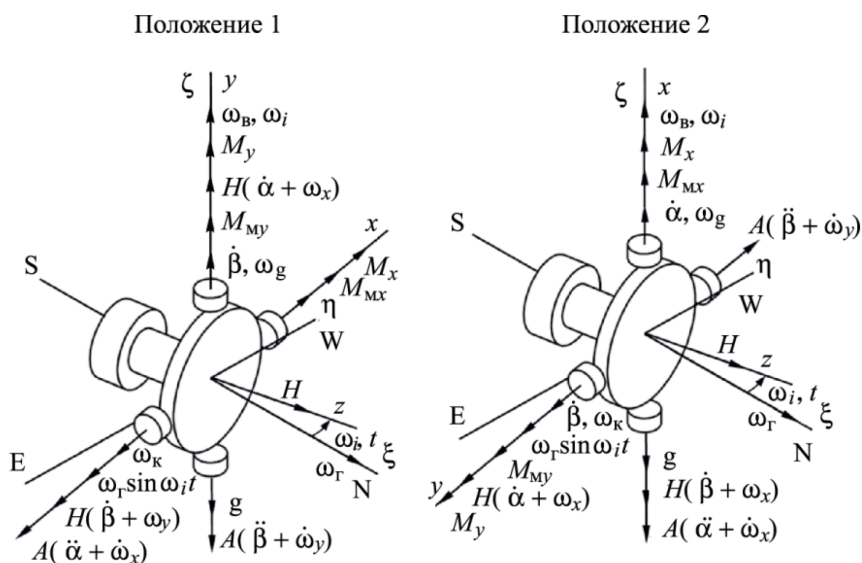


Рис. 3. Моменты, приложенные к ротору ДНГ в положениях 1 и 2:

ω_x, ω_y — компоненты абсолютной угловой скорости движения корпуса гироскопа в системе координат xuz ; ω_g — дрейф гироскопа, обусловленный моментом от несбалансированности, вызванной смещением центра масс ротора гироскопа вдоль оси его вращения; ω_k — квадратный дрейф гироскопа; A — экваториальный момент инерции ротора ДНГ; M_x, M_y — возмущающие моменты, приложенные к ротору ДНГ

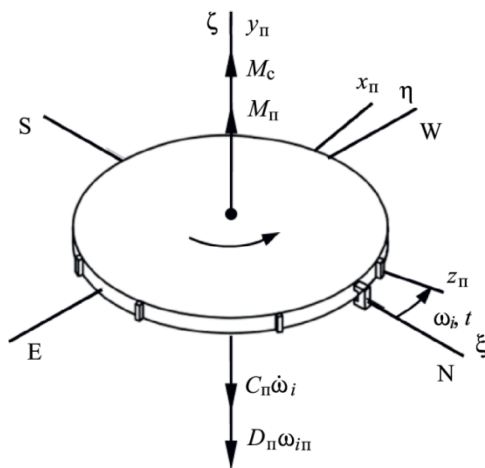


Рис. 4. Моменты, приложенные к платформе стэнда:

M_c, M_{π} — моменты сопротивления вращению и обратной связи стэнда; C_{π} — момент инерции платформы вокруг оси вращения; D_{π} — коэффициент демпфирования стэнда вокруг его оси вращения

Уравнения движения системы гироскоп — гиросtabilизатор [9–11]:

$$\begin{aligned} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_{xi}) + H(\dot{\beta} + \omega_{yi}) &= M_{xi} + M_{Mxi}; \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_{yi}) - H(\dot{\alpha} + \omega_{xi}) &= M_{yi} + M_{Myi}; \\ C_{\Pi}\dot{\omega}_i + D_{\Pi}\omega_i &= M_{\Pi} + M_c. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь для положения 1 ($i = 1, 2$) $\omega_{yi} = \omega_i + \omega_B$; $\omega_{xi} = -\omega_r \sin \omega_i t$;

$$M_{xi} = H\omega_{y0} + H\omega_g; \quad M_{yi} = -H\omega_{x0} + H\omega_k; \quad M_{\Pi}(s) = -K_{\Pi}W_{\Pi}(s)\beta(s);$$

$$M_{Mxi} = K_x J_{xi} + K_{xy} J_{yi}; \quad M_{Myi} = K_y J_{yi} + K_{yx} J_{xi};$$

для положения 2 ($i = 3, 4$) $\omega_{xi} = \omega_i + \omega_B$; $\omega_{yi} = \omega_r \sin \omega_i t$;

$$M_x = H\omega_{y0} + H\omega_k; \quad M_y = -H\omega_{x0} - H\omega_g; \quad M_{\Pi}(s) = -K_{\Pi}W_{\Pi}(s)\alpha(s);$$

$$M_{Mxi} = K_x J_{xi} + K_{xy} J_{yi}; \quad M_{Myi} = K_y J_{yi} + K_{yx} J_{xi};$$

J_{xi}, J_{yi} — токи, подаваемые в датчики момента от источника постоянного тока; J_{xi}, J_{yi} — токи обратной связи в катушках датчиков момента.

Для исключения угловых отклонений ротора гироскопа относительно корпуса в установившемся движении в передаточные функции усилителей КОС $W(s)$ и $W_{\Pi}(s)$ вводятся интегрирующие звенья.

Структуры передаточных функций усилителей КОС стенда и ДНГ в режиме ДУС, оптимизированных по результатам моделирования, имеют следующий вид [12, 13]:

$$\begin{aligned} K_{yc}W(s) &= K_{yc} \frac{(T_1s + 1)}{T_1s(T_2s + 1)^2}; \\ K_{yc}^{\Pi}W_{\Pi}(s) &= K_{yc}^{\Pi} \frac{(T_{c1}s + 1)(T_{c2}s + 1)}{T_{c1}s(T_{c3}s + 1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Моделирование динамических режимов работы стенда. В соответствии с уравнениями (5) на рис. 5 построена структурная схема системы гироскоп — стенд для положения 1 в среде Simulink (MATLAB), где тоном выделены основные модули этой системы: гироскоп с КОС по каналу x ; гиросtabilизатор с контуром стабилизации по оси y гироскопа; источник постоянного тока (ИПТ), обеспечивающий подачу постоянного тока J_x в моментный датчик ДМ $_x$ гироскопа; звено

$W_k(s) = \frac{1}{(0,25s + 1)^2}$ используется для сглаживания переходного процесса системы при подаче тока от внешнего источника.

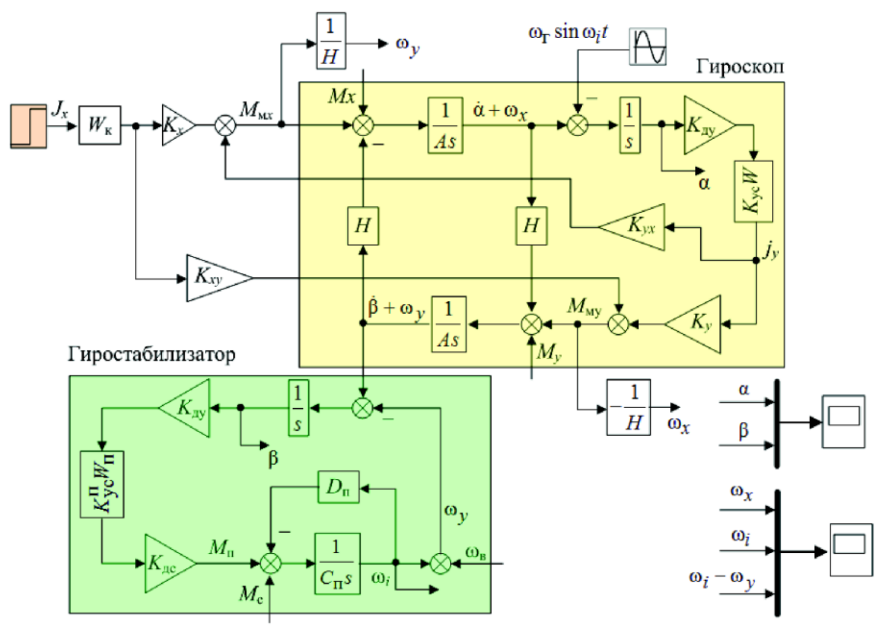


Рис. 5. Структурная схема системы гироскоп — гиростабилизатор для положения 1

При моделировании использовали следующие исходные данные:

- параметры ДНГ типа МГ-4 [4] — $A = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $H = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$, $K_{\text{дв}} = 6,0 \text{ В/рад}$;
- параметры стенда — $C_{\text{п}} = 0,04 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $D_{\text{п}} = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

Для этих параметров стенда и гироскопа по результатам моделирования определены параметры КОС, обеспечивающие достаточные запасы устойчивости и качество переходных процессов:

- для ДНГ — $K_{\text{yc}} = 12 \text{ А/В}$, $K_x = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $K_{\text{xy}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $M_x = M_y = 0$, $K_y = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $K_{\text{yx}} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $T_1 = 0,015 \text{ с}$, $T_2 = 0,001 \text{ с}$;

- для стенда — $K_{\text{yc}}^{\text{п}} = 4 \text{ А/В}$, $K_{\text{дс}} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $T_{\text{c1}} = T_{\text{c2}} = 0,08 \text{ с}$, $T_{\text{c3}} = 0,008 \text{ с}$.

На рис. 6 представлены результаты моделирования движения ротора гироскопа и платформы при заданной максимальной угловой скорости ротора гироскопа $\omega_y = 150 \text{ град/с}$. Видно, что через 3 с после подачи тока управления переходной процесс практически завершается. Также из графиков следует, что установившееся значение угловой скорости ротора ДНГ ω_x практически равно нулю, так как значения, соответствующие собственному дрейфу гироскопа, а также горизонтальной и вертикальной проекции собственного вращения Земли ничтожно малы на фоне задаваемой угловой скорости стенда. Угловая скорость платформы ω_i также практически равна угловой скорости прецессии ротора гироскопа ω_y по вертикальной оси.

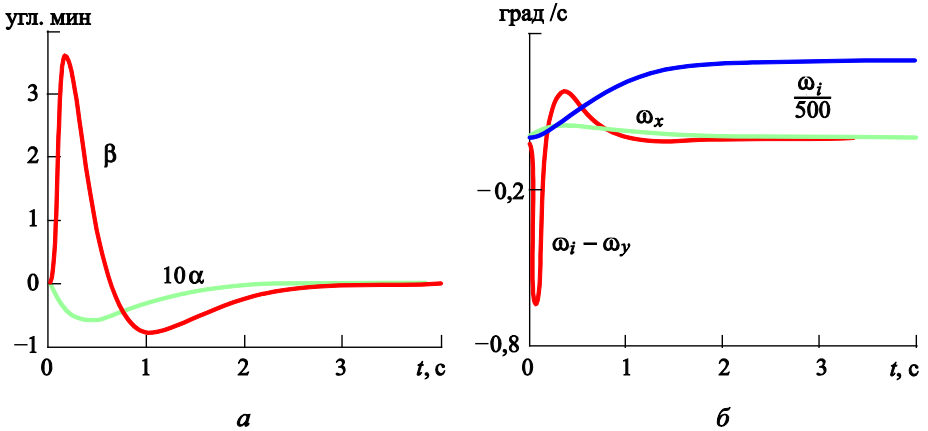


Рис. 6. Переходные процессы по углам отклонения ротора ДНГ (а) и угловым скоростям системы (б) при угловой скорости стэнда 150 град/с

Методика калибровки на одноосном поворотном стэнде. На рис. 7 приведен вариант алгоритма калибровки ДНГ в автоматизированном режиме. В исходном положении корпус стэнда устанавливается таким образом, чтобы его система координат $\xi\eta\zeta$ осью ξ была ориентирована на север. Далее процесс калибровки выполняется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 7.



Рис. 7. Алгоритм калибровки

Для установившегося движения система уравнения (5) может быть записана в следующем виде:

для положения 1 ($i = 1, 2$)

$$\begin{pmatrix} K'_x & K'_{xy} \\ K'_{yx} & K'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{xi} \\ j_{yi}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{y0} + \omega_g \\ -\omega_{x0} + \omega_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_i(t) + \omega_B \\ \omega_\Gamma \sin \omega_i t \end{pmatrix}, \quad (7)$$

для положения 2 ($i = 3, 4$)

$$\begin{pmatrix} K'_x & K'_{xy} \\ K'_{yx} & K'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_{xi}(t) \\ J_{yi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{y0} + \omega_k \\ -\omega_{x0} - \omega_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_\Gamma \sin \omega_i t \\ -\omega_i(t) - \omega_B \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В системах уравнений (7) и (8) измеряемыми величинами являются токи обратной связи j_{xi} и j_{yi} в моментных датчиках, а также угловые скорости стенда ω_i , которые, как видно из этих соотношений, помимо постоянной составляющей, определяются также и гармонической, вызываемой горизонтальной проекцией собственного вращения Земли. Для определения масштабных коэффициентов гироскопа необходимо для каждого из четырех испытаний усреднить измеряемые значения за некоторый промежуток времени t . Затем, исключая постоянные составляющие дрейфа гироскопа для положений 1 и 2, получаем систему уравнений для определения масштабных коэффициентов:

$$\begin{pmatrix} K'_x & K'_{xy} \\ K'_{yx} & K'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{x1} - J_{x2} \\ \bar{J}_{y1} - \bar{J}_{y2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 - \omega_2 \\ \omega_\Gamma \chi(\gamma) \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} K'_x & K'_{xy} \\ K'_{yx} & K'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{J}_{x3} - \bar{J}_{x4} \\ J_{y3} - J_{y4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_3 - \omega_4 \\ \omega_\Gamma \chi(\gamma) \end{pmatrix},$$

где $\chi(\gamma) = \frac{2}{\gamma}(1 - \cos \gamma)$; γ — угол поворота платформы за время t .

На рис. 8 приведен график зависимости $\chi(\gamma)$, из которого следует, что при увеличении времени усреднения эта величина уменьшается, а при усреднении в течение каждого оборота платформы она строго равна нулю. Таким образом, влияние горизонтальной проекции собственного вращения Земли может быть исключено.

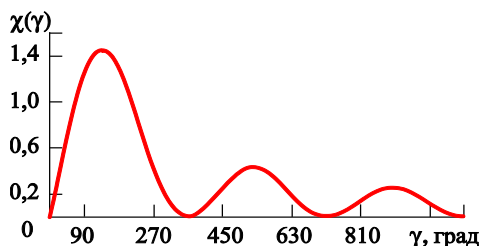


Рис. 8. График зависимости $\chi(\gamma)$

Решая систему уравнений (9) относительно масштабных коэффициентов, получаем

$$K'_x = \frac{\omega_{12}}{\Delta J_{12}(1+\delta)} + \frac{\delta \cdot \chi(\gamma)}{\Delta j_{34}(1+\delta)} \omega_\Gamma; \quad K'_y = \frac{\omega_{34}}{\Delta J_{34}(1+\delta)} + \frac{\delta \cdot \chi(\gamma)}{\Delta j_{12}(1+\delta)} \omega_\Gamma; \quad (10)$$

$$K'_{xy} = K'_x \frac{\Delta j_{34}}{\Delta J_{34}} - \omega_\Gamma \frac{\chi(\gamma)}{\Delta J_{34}}; \quad K'_{yx} = K'_y \frac{\Delta j_{12}}{\Delta J_{12}} + \omega_\Gamma \frac{\chi(\gamma)}{\Delta J_{12}},$$

где $\Delta \bar{j}_{12} = \bar{j}_1 - \bar{j}_2$; $\Delta \bar{j}_{34} = \bar{j}_3 - \bar{j}_4$; $\Delta J_{12} = J_{x1} - J_{x2}$; $\Delta J_{34} = J_{y3} - J_{y4}$;

$$\omega_{34} = \bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_4; \quad \omega_{12} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2; \quad \delta = \frac{\Delta j_{12} \Delta j_{34}}{\Delta J_{12} \Delta J_{34}}.$$

Из полученных соотношений (10) следует, что точность калибровки определяется точностью измерения угловых скоростей стенда $\omega_1 \dots \omega_4$ и токов в моментных датчиках $j_{xi}, j_{yi}, J_{xi}, J_{yi}$. Влиянием скорости вращения Земли можно пренебречь либо полностью исключить ее, как показано выше.

Точность измерения угловой скорости платформы определяется точностью измерения углов поворота платформы $\gamma_1 \dots \gamma_4$ и соответствующего времени $t_1 \dots t_4$ разворота на эти углы:

- углы поворота платформы можно измерить с помощью ДУ аналогичного ДУ в ДНГ, используя его в импульсном режиме. Эти углы можно с высокой точностью определить в процессе предварительной аттестации стенда, например с помощью оптического теодолита типа УОМЗ ЗТ2КП, имеющего точность 2". Таким образом можно обеспечить точность измерения углов поворота платформы не ниже $5 \cdot 10^{-4} \%$ при измерении углов более 120° ;

- время разворота платформы на заданный угол можно определить с помощью серийных измерительных приборов, например частотомеров типа ЧЗ-54 или ЧЗ-57, имеющих точность не ниже $10^{-5} \%$.

Точность задания и измерения токов $j_{xi}, j_{yi}, J_{xi}, J_{yi}$ определяется стабильностью источника питания, в качестве которого можно использовать, например, высокостабильный источник питания типа ВК Precision 9184 (стабильность тока 0,1 %), и точностью измерительного прибора, например электронного вольтметра типа НР-34420А с точностью $2 \cdot 10^{-4} \%$.

Таким образом, с учетом приведенной оценки определения отдельных параметров измерительной системы итоговая погрешность определения масштабных коэффициентов может быть обеспечена не ниже 0,001 %.

Заключение. Получены уравнения движения комплексной системы гироскоп — поворотный стенд на базе одноосного гиростаби-

лизатора, учитывающие особенности динамики гироскопа и стенда в реальных условиях эксплуатации.

На основе полученных уравнений проведено моделирование работы системы в переходном и установившемся режимах в среде Simulink (Matlab) и выбраны оптимальные параметры контуров обратной связи гироскопа и гиросtabilизатора.

Приведена оценка влияния собственной скорости вращения Земли на измерительные характеристики разработанной методики и даны рекомендации по снижению влияния этого фактора на точность калибровки.

Предложены средства и методика для прецизионных динамически настраиваемых гироскопов, обеспечивающие возможность калибровки с точностью 0,001 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Калихман Д.М. *Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов*. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008, 296 с.
- [2] Урядов Д.А., Скотников В.В. Разработка устройств поддержания угловой скорости повышенной точности. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*, 2015, № 3 (15), с. 159–165.
- [3] Седышев В.В., Белочкин П.Е. Управление угловым движением одноосного испытательного стенда гироскопических систем. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*, 2014, т. 14, № 4, с. 42–50.
- [4] Седышев В.В., Белочкин П.Е., Шаршин Д.Н., Карпусевич К.Р. Автоматизация двухосевого поворотного стола КИН-52. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*, 2015, т. 16, № 1, с. 81–91.
- [5] Dang Jianjun, Luo Jianjun, Wan Yanhui. Calibration Method of Strap-down Inertial Measurement Unit Based on Single-axis Rate Turntable. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 806–811.
- [6] Li Hui, Zhao Zhong. Calibration Method of Inertial Instruments Based on Single-axis Turntable. *Current Status and Development Trends of Inertial Technology in China*, 2012, pp. 195–203.
- [7] Цинь Цзыхао. Метод калибровки ДУС инерциального класса на одноосном гиросtabilизаторе. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 1. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/752662.html>
- [8] Ригли У., Холлистер У., Денхард У. *Теория, проектирование и испытания гироскопов*. Москва, Мир, 1972, 372 с.
- [9] Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. *Динамический синтез систем гироскопической стабилизации*. Ленинград, Судостроитель, 1968, 348 с.
- [10] Матвеев В.А., Подчерзев В.П., Фатеев В.В. *Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 103 с.
- [11] Колоссов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. *Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем*. В 2 ч. Ч. 2. Москва, Высшая школа, 1977, 223 с.

- [12] Матвеев В.А., Подчезерцев В.П. Погрешности динамически настраиваемого гироскопа от вибрации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 1999, № 1, с. 40–49.
- [13] Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. *Теория автоматического управления техническими системами*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 492 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Подчезерцев В.П., Цинь Цзыхао. Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1682>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на ХLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Подчезерцев Виктор Павлович, родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 100 научных работ в области гироскопической техники. e-mail: podch@list.ru

Цинь Цзыхао, родился в 1988 г., аспирант кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: qinzihao1215@163.com

Modeling the Calibration of DTG on a uniaxial gyrostabilizer

© V.P. Podchezertsev, Qin Zihao

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article discusses the features of determining the torque sensor scale factors of dynamically tuned gyroscopes on the automated turntable based on a uniaxial gyrostabilizer. Unlike conventional turntables, where very precise values of rotation speed are set and maintained by means of precision electromechanical systems, in the gyrostabilizer the turntable platform monitors the position of the controlled gyroscope. Such turntable has a simple structure, light weight, small dimensions, low energy consumption and cost. The mathematical model of the gyroscope-gyrostabilizer system is developed and its motion is studied in transient and steady-state regimes. Software Simulink (Matlab) was used for numerical simulation of gyroscope calibration process. The effect of the parameters of the measuring system including rotation angle sensors, devices for measuring the time of the turntable turn and the currents in the moment sensors on the calibration accuracy is shown. The influence of the Earth's own rotation speed is determined.

Keywords: *dynamically tuned gyroscope, gyrostabilizer, calibration*

REFERENCES

- [1] Kalikhman D.M. *Pretzionnyye upravlyaemye stendy dlya dinamicheskikh ispytaniy giroskopicheskikh priborov* [Precision Controlled Stands for Gyroscopic Device Dynamic Tests]. St. Petersburg, SRC RF CRI Elektropribor Publ., 2008, 296 p.
- [2] Uryadov D.A., Skotnikov V.V. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve – Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*, 2015, no. 3 (15), pp. 159–165.
- [3] Sedyshv V.V., Belochkin P.E. *Vestnik Yuzhno Uralskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya Kompyuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika – Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 42–50.
- [4] Sedyshv V.V., Belochkin P.E., Sharshin D.N., Karpusevich K.R. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya Kompyuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika – Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 81–91.
- [5] Dang Jianjun, Luo Jianjun, Wan Yanhui. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, vol. 31, no. 4, 2010, pp. 806-811.
- [6] Li Hui, Zhao Zhong. *Calibration method of inertial instruments based on single-axis turntable. The Current Status and Development Trends of Inertial Technology in China*, 2012, pp. 195–203.
- [7] Qin Zihao. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik — Youth Science and Technology Gazette*, January 2015, no. 1, 14 p. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/752662.html>
- [8] Wrigley W., Hollister W.M., Denhard W.G. *Gyroscopic Theory, Design and Instrumentation*. US Cambridge, MIT Press Publ., 1969 [In Russ.: Wrigley W., Hollister W., Denhard W. Theory, design and testing gyroscopes. Moscow, Mir Publ., 1972, 372 p.].

- [9] Besekersky V.A., Fabrikant E.A. *Dinamicheskiiy sintez system giroskopicheskoy stabilizatsii* [Dynamic synthesis of gyroscopic stabilization systems]. Leningrad, Sudostroitel Publ., 1968, 348 p.
- [10] Matveev V.A., Podchertsev V.P., Fateev V.V. *Giroskopicheskie stabilizatory na dinamicheski nastroivaemykh vibratsionnykh girokopakh* [Gyroscopic stabilizers on dynamically tuned vibration gyroscopes]. Moscow, BMSTU Publ., 2005, 103 p.
- [11] Kolosov U.A., Lyakhovetsky U.G., Rakhtenko E.R. *Giroskopicheskie sistemy. Proektirovanie giroskopicheskikh system. V 2 chastyakh. Ch. 2* [Gyroscopic systems. Design of gyroscopic systems. In 2 parts. Part 2]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 223 p.
- [12] Matveev V.A., Podchertsev V.P. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*, 1999, no. 1, pp. 40–49.
- [13] Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami* [The theory of technical system automatic control]. Moscow, BMSTU Publ., 1993, 492 p.

Podchertsev V.P. (b. 1945), graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Orientation, Stabilization and Navigation Instruments and Systems, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of gyro technology.
e-mail: podch@list.ru

Qin Zihao (b. 1988), postgraduate student (Ph. D.), Department of Orientation, Stabilization and Navigation Instruments and Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: qinzihao1215@163.com