

## ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ГИРОСКОПА С ВНУТРЕННИМ УПРУГИМ КАРДАННЫМ ПОДВЕСОМ В РЕЖИМЕ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В.П. Подчерзцев

victor.podchezertsev@bmstu.ru

Д.З. Нгуен

ariolvietnam@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

В системах ориентации и навигации все чаще используются гироскопы с внутренним упругим карданным подвесом благодаря их преимуществам по сравнению с традиционными гироскопами: малым массогабаритным характеристикам, отсутствию сухого трения, достаточно высокой точности. Для обеспечения работоспособности и получения наилучших характеристик гироскопических систем в процессе эксплуатации необходимо исследовать не только статические, но и динамические характеристики гироскопа как важного звена этой автоматической системы регулирования. Все это требует подробного исследования влияния конструктивных и технологических факторов на динамическую точность работы гироскопа, а также системы в целом. Рассмотрен режим двухкомпонентного датчика угловой скорости, построенного на базе гироскопа с внутренним упругим карданным подвесом. Исследованы конструктивно-технологические факторы, определяющие динамическую точность этого типа гироскопа. Дана численная оценка влияния каждого рассмотренного фактора на точность работы двухкомпонентного прибора. Предложен вариант компенсации влияния неточности установки датчиков угла и датчиков момента на динамическую точность гироскопа и численно оценена его эффективность

### Ключевые слова

*Системы ориентации и навигации, гироскоп, внутренний упругий карданный подвес, датчик угловой скорости, динамическая точность*

Поступила 04.12.2020

Принята 30.12.2020

©Автор(ы), 2021

---

**Введение.** Одной из разновидностей гироскопа с внутренним упругим карданным подвесом является динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ), широко используемый в качестве чувствительного элемента в системах ориентации и беспилотных инерциальных навигационных системах [1–8]. При наличии погрешности выставки датчиков угла (ДУ)

и датчиков момента (ДМ) относительно базовых осей  $x$  и  $y$  корпуса, на каждую ось  $x$  и  $y$  проецируются моменты обратной связи от ДМ. Кроме того, динамическая расстройка из-за технологической неточности при изготовлении и регулировке гироскопа и газодинамические моменты, определяющие постоянную времени  $\tau$  ДНГ [9], создают моменты одновременно по двум осям  $x$  и  $y$  при отклонении ротора гироскопа относительно корпуса. Эти моменты влияют на динамическую точность ДНГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС). В настоящей работе исследовано влияние каждого этого фактора на динамическую точность ДНГ в режиме ДУС. На основе полученных результатов предложен вариант компенсации влияния неточности установки ДУ, ДМ на динамическую точность гироскопа в режиме ДУС и исследована его эффективность.

**Уравнения движения ДНГ в режиме ДУС.** Кинематическая схема ДНГ–ДУС с учетом конструктивно-технологических погрешностей выставки ДУ и ДМ вокруг оси  $z$  приведена на рис. 1, на котором введены обозначения:  $xuz$  — декартова система координат, связанная с корпусом;  $x_1y_1z_1$ ,  $x_2y_2z_2$  — аффинные системы координат, связанные с ДУ $_x$ , ДУ $_y$  и ДМ $_x$ , ДМ $_y$ ;  $H$  — кинетический момент ротора гироскопа;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  — проекции абсолютной угловой скорости корпуса;  $J_x$ ,  $J_y$  — токи в катушках ДМ;  $U_\alpha$  и  $U_\beta$  — напряжения, снимаемые с датчиков угла;  $U_x$ ,  $U_y$  — напряжения на измерительных резисторах  $R_x$ ,  $R_y$ .

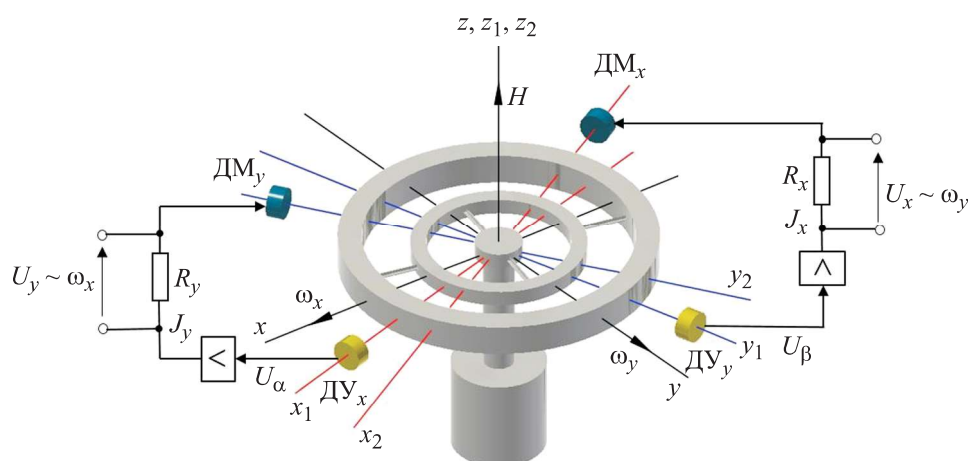


Рис. 1. Кинематическая схема ДНГ в режиме ДУС

Моменты, приложенные к ротору гироскопа, приведены на рис. 2, где  $A$  — экваториальный момент инерции ротора гироскопа;  $M_{x_2}^{ДМ}$



$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \gamma_y^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} & \frac{\sin \gamma_y^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_{x1} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \\ -\frac{\sin \gamma_x^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} & \frac{\cos \gamma_x^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}. \quad (2)$$

С учетом нулевых сигналов ДУ и усилителей-преобразователей тока в катушках ДМ равны

$$\begin{aligned} J_x &= U_\beta k_x^i W_x(s) = \\ &= k_\beta^{\text{ДЮ}} \left( -\frac{\sin \gamma_x^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \alpha + \frac{\cos \gamma_x^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \beta + \beta_0 \right) k_x^i W_x(s); \\ J_y &= U_\alpha k_y^i W_y(s) = \\ &= k_\alpha^{\text{ДЮ}} \left( \frac{\cos \gamma_y^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \alpha + \frac{\sin \gamma_y^{\text{ДЮ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДЮ}} - \gamma_y^{\text{ДЮ}})} \beta + \alpha_0 \right) k_y^i W_y(s), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k_\alpha^{\text{ДЮ}}$ ,  $k_\beta^{\text{ДЮ}}$  — крутизны ДУ по осям  $x_1$  и  $y_1$ ;  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  — нулевые сигналы ДУ и электроники, приведенные к углу поворота ротора;  $W_x(s)$  и  $W_y(s)$  — передаточные функции усилителей — преобразователей контуров обратной связи;  $k_x^i$ ,  $k_y^i$  — коэффициенты преобразования напряжения в ток усилителя обратной связи.

Моменты, создаваемые ДМ<sub>x</sub> и ДМ<sub>y</sub> в системе координат  $x_2 y_2 z_2$ , аналогично соотношению (1) преобразуются в систему координат  $x y z$  корпуса:

$$\begin{aligned} M_x^{\text{ДМ}} &= M_{x_2}^{\text{ДМ}} \cos \gamma_y^{\text{ДМ}} - M_{y_2}^{\text{ДМ}} \sin \gamma_y^{\text{ДМ}} = \\ &= J_x k_x^{\text{ДМ}} \cos \gamma_x^{\text{ДМ}} - J_y k_y^{\text{ДМ}} \sin \gamma_y^{\text{ДМ}}; \\ M_y^{\text{ДМ}} &= M_{y_2}^{\text{ДМ}} \cos \gamma_y^{\text{ДМ}} + M_{x_2}^{\text{ДМ}} \sin \gamma_x^{\text{ДМ}} = \\ &= J_y k_y^{\text{ДМ}} \cos \gamma_y^{\text{ДМ}} + J_x k_x^{\text{ДМ}} \sin \gamma_x^{\text{ДМ}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} k_x &= k_x^{\text{ДМ}} \cos \gamma_x^{\text{ДМ}}; \quad k_y = k_y^{\text{ДМ}} \cos \gamma_y^{\text{ДМ}}; \\ k_{xy} &= k_x^{\text{ДМ}} \sin \gamma_x^{\text{ДМ}}; \quad k_{yx} = -k_y^{\text{ДМ}} \sin \gamma_y^{\text{ДМ}}, \end{aligned} \quad (5)$$

тогда выражения (4) приводятся к виду

$$M_x^{\text{ДМ}} = J_x k_x + J_y k_{xy}, \quad M_y^{\text{ДМ}} = J_y k_y + J_x k_{yx}. \quad (6)$$

Моменты  $M_{x_2}^{\text{ДМ}}$  и  $M_{y_2}^{\text{ДМ}}$ , создаваемые токами (3), могут быть записаны как

$$\begin{aligned} M_{x_2}^{\text{ДМ}} &= J_x k_x^{\text{ДМ}} = \\ &= \left( \frac{\sin \gamma_x^{\text{ДУ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_x^{\text{ДУ}})} \alpha - \frac{\cos \gamma_x^{\text{ДУ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДУ}})} \beta + \beta_0 \right) k_\beta^{\text{ДУ}} k_x^i k_x^{\text{ДМ}} W_x(s); \\ M_{y_2}^{\text{ДМ}} &= J_y k_y^{\text{ДМ}} = \\ &= \left( \frac{\cos \gamma_y^{\text{ДУ}}}{\cos(\gamma_y^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДУ}})} \alpha + \frac{\sin \gamma_y^{\text{ДУ}}}{\cos(\gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДУ}})} \beta + \alpha_0 \right) k_\alpha^{\text{ДУ}} k_y^i k_y^{\text{ДМ}} W_y(s), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k_x^{\text{ДМ}}$ ,  $k_y^{\text{ДМ}}$  — крутизны ДМ по оси  $x$  и  $y$ .

Уравнения движения ДНГ–ДУС в соответствии с приведенными на рис. 2 действующими на ротор гироскопа моментами имеют вид

$$\begin{aligned} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_x) + H(\dot{\beta} + \omega_y) &= \\ &= M_x + M_{x_2}^{\text{ДМ}} \cos \gamma_x^{\text{ДМ}} - M_{y_2}^{\text{ДМ}} \sin \gamma_y^{\text{ДМ}} - \Delta K \alpha - k_\tau \beta; \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_y) - H(\dot{\alpha} + \omega_x) &= \\ &= M_y + M_{y_2}^{\text{ДМ}} \cos \gamma_y^{\text{ДМ}} + M_{x_2}^{\text{ДМ}} \sin \gamma_x^{\text{ДМ}} - \Delta K \beta + k_\tau \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Для малых углов  $\gamma_x^{\text{ДУ}}$ ,  $\gamma_y^{\text{ДУ}}$ ,  $\gamma_x^{\text{ДУ}}$  и  $\gamma_y^{\text{ДУ}}$  выражения для углов  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  (2), токов  $J_x$ ,  $J_y$  (3) и моментов  $M_{x_2}^{\text{ДМ}}$ ,  $M_{y_2}^{\text{ДМ}}$  (7) принимают вид

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha + \gamma_y^{\text{ДУ}} \beta; \\ \beta_1 &= \beta - \gamma_x^{\text{ДУ}} \alpha; \\ J_x &= (-\beta + \gamma_x^{\text{ДУ}} \alpha + \beta_0) k_\beta^{\text{ДУ}} k_x^i W_x(s); \\ J_y &= (\alpha + \gamma_y^{\text{ДУ}} \beta + \alpha_0) k_\alpha^{\text{ДУ}} k_y^i W_y(s); \\ M_{x_2}^{\text{ДМ}} &= (-\beta + \gamma_x^{\text{ДУ}} \alpha + \beta_0) K_x W_x(s); \\ M_{y_2}^{\text{ДМ}} &= (\alpha + \gamma_y^{\text{ДУ}} \beta + \alpha_0) K_y W_y(s), \end{aligned}$$

где  $K_x = k_\beta^{\text{ДУ}} k_x^i k_x^{\text{ДМ}}$ ;  $K_y = k_\alpha^{\text{ДУ}} k_y^i k_y^{\text{ДМ}}$ .

Система (8) при этом приводится к виду

$$\begin{aligned} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_x) + H(\dot{\beta} + \omega_y) &= M_x + M_{x2}^{DM} - \gamma_y^{DM} M_{y2}^{DM} - \Delta K \alpha - K_\tau \beta; \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_y) - H(\dot{\alpha} + \omega_x) &= M_y + M_{y2}^{DM} + \gamma_x^{DM} M_{x2}^{DM} - \Delta K \beta + K_\tau \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Структурная схема ДНГ-ДУС, построенная в соответствии с уравнениями (9), приведена на рис. 3.

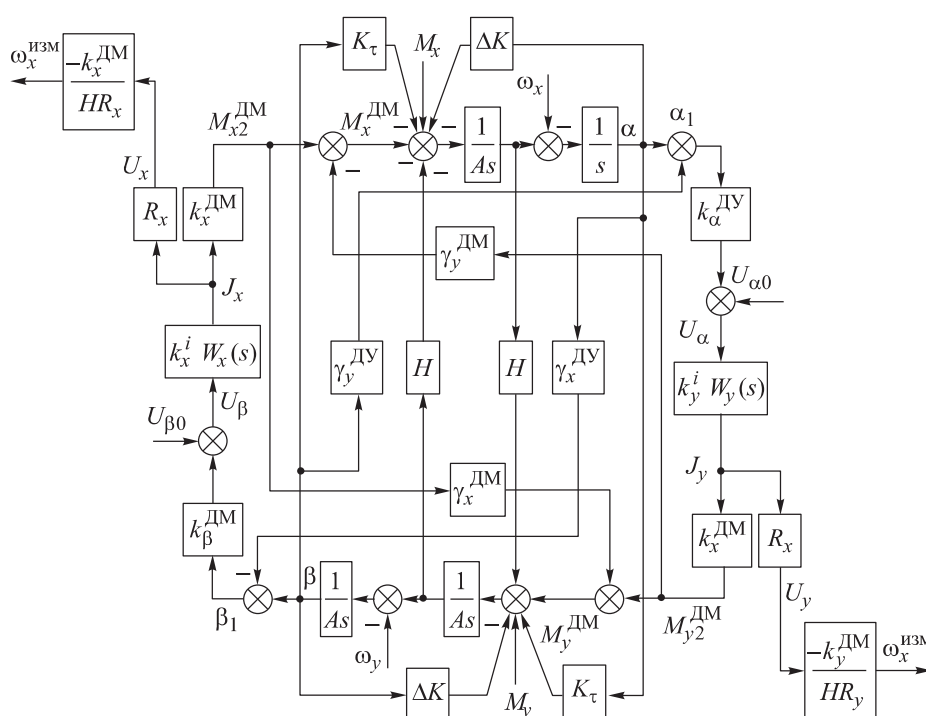


Рис. 3. Структурная схема ДНГ-ДУС

При отсутствии внешних возмущающих моментов с учетом симметрии каналов система уравнений (9) примет вид

$$\begin{aligned} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_x) + H(\dot{\beta} + \omega_y) &= KW(s)(-\beta + \gamma_x^{DY} \alpha + \beta_0) - \\ &\quad - \gamma_y^{DM} KW(s)(\alpha + \gamma_y^{DY} \beta + \alpha_0) - \Delta K \alpha - K_\tau \beta; \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_y) - H(\dot{\alpha} + \omega_x) &= KW(s)(\alpha + \gamma_x^{DY} \beta + \alpha_0) + \\ &\quad + \gamma_x^{DM} KW(s)(-\beta + \gamma_x^{DY} \alpha + \beta_0) - \Delta K \beta + K_\tau \alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Применяя преобразование Лапласа к системе (10), получаем

$$\begin{aligned} (As^2 + \Delta K - (\gamma_x^{DY} - \gamma_y^{DM}) KW(s)) \alpha + (Hs + K_\tau + KW(s)) \beta &= \\ = -As\omega_x - H\omega_y - KW(s)\beta_0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
& -(Hs + K_\tau + KW(s))\alpha + \left(As^2 + \Delta K - \left(\gamma_y^{IIY} - \gamma_x^{IIM}\right)KW(s)\right)\beta = \\
& = H\omega_x - As\omega_y + KW(s)\alpha_0.
\end{aligned} \tag{11}$$

Решая систему (11), получаем углы отклонения ротора гироскопа относительно базовых осей  $x$  и  $y$  корпуса, на основе которых найдем измеренные гироскопом значения угловой скорости корпуса:

$$\begin{aligned}
\omega_x^{изм}(s) &= -U_y k^{IIM}(HR_y)^{-1} = (-KW(s)H^{-1})\left(\alpha + \gamma_y^{IIY}\beta + \alpha_0\right) = \\
&= \left(1 + A_1(s) + \gamma_x^{IIM} \frac{s}{\omega_n} + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K_\tau}{KW(s)}\right) \frac{\omega_x}{1 + \Delta(s)} + \\
&+ \left(-\frac{s}{\omega_n} + \gamma_x^{IIM} + \gamma_y^{IIY} A_1(s) + \frac{\Delta K}{KW(s)} - \frac{K_\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n}\right) \frac{\omega_y}{1 + \Delta(s)} + \frac{g_1(\alpha_0, \beta_0, s)}{1 + \Delta(s)}; \\
\omega_y^{изм}(s) &= -U_x k^{IIM}(HR_x)^{-1} = (-KW(s)H^{-1})\left(\beta - \gamma_x^{IIY}\alpha + \beta_0\right) = \\
&= \left(1 + A_1(s) + \gamma_y^{IIM} \frac{s}{\omega_n} + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K_\tau}{KW(s)}\right) \frac{\omega_y}{1 + \Delta(s)} + \\
&+ \left(\frac{s}{\omega_n} - \gamma_y^{IIM} - \gamma_x^{IIY} A_1(s) - \frac{\Delta K}{KW(s)} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n}\right) \frac{\omega_x}{1 + \Delta(s)} + \frac{g_2(\alpha_0, \beta_0, s)}{1 + \Delta(s)},
\end{aligned} \tag{12}$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta(s) &= \left(2 + A_1(s) + \left(\gamma_x^{IIM} + \gamma_y^{IIM} - \gamma_x^{IIY} - \gamma_y^{IIY}\right) \frac{s}{\omega_n} + \frac{2\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{2K_\tau}{KW(s)}\right) \times \\
&\times R(s) + \frac{2K_\tau}{KW(s)};
\end{aligned}$$

$\omega_n = \frac{H}{A}$  — нутационная частота;  $R(s) = \frac{Hs}{KW(s)}$  — отношение гироскопической реакции ДНГ к моментам обратной связи;  $A_1(s) = \left(1 + \frac{s^2}{\omega_n^2}\right)R(s)$ ;

$$g_1(\alpha_0, \beta_0, s) = \frac{-s}{R(s)} \left[ h_\alpha(\alpha_0, \beta_0, s) + \gamma_y^{IIY} h_\beta(\alpha_0, \beta_0, s) + \frac{R^2(s)}{H^2 s^2} \alpha_0 \right];$$

$$g_2(\alpha_0, \beta_0, s) = \frac{-s}{R(s)} \left[ h_\beta(\alpha_0, \beta_0, s) - \gamma_x^{IIY} h_\alpha(\alpha_0, \beta_0, s) + \frac{R^2(s)}{H^2 s^2} \beta_0 \right];$$

$$\begin{aligned}
 h_{\alpha}(\alpha_0, \beta_0, s) &= -\left(1 + R(s) + \frac{K_{\tau}R(s)}{Hs}\right)\alpha_0 - \\
 &- \left(\frac{s}{\omega_n}R(s) + (\gamma_x^{ДУ} - \gamma_y^{ДМ}) + \frac{\Delta KR(s)}{Hs}\right)\beta_0; \\
 h_{\beta}(\alpha_0, \beta_0, s) &= -\left(1 + R(s) + \frac{K_{\tau}R(s)}{Hs}\right)\beta_0 + \\
 &+ \left(\frac{s}{\omega_n}R(s) + (\gamma_y^{ДУ} - \gamma_x^{ДМ}) + \frac{\Delta KR(s)}{Hs}\right)\alpha_0.
 \end{aligned}$$

Выражения (12) показывают, что измеренные значения угловой скорости корпуса зависят от погрешностей выставки ДУ и ДМ относительно базовых осей  $x$  и  $y$  корпуса, а также от динамической расстройки, постоянной времени гироскопа и нулевых сигналов ДУ.

**Влияние погрешности выставки ДУ и ДМ на статическую и динамическую точности ДНГ–ДУС.** Пренебрегая нулевыми сигналами ДУ, а также дрейфом гироскопа от динамической расстройки и постоянной времени, оценим влияние погрешностей выставки ДУ и ДМ относительно базовых осей  $x$  и  $y$  корпуса на статическую и динамическую точность ДНГ–ДУС. Из выражений (12) найдем их установившиеся значения:

$$\begin{aligned}
 \lim_{s \rightarrow 0} \omega_x^{изм}(s) &= \omega_x + \gamma_x^{ДМ} \omega_y; \\
 \lim_{s \rightarrow 0} \omega_y^{изм}(s) &= \omega_y - \gamma_y^{ДМ} \omega_x,
 \end{aligned} \tag{13}$$

из которых следует, что установившиеся значения измеренной угловой скорости корпуса принципиально не зависят от погрешности выставки ДУ, но зависят от технологической точности установки ДМ.

Для анализа влияния неточности выставки ДУ и ДМ на динамику ДНГ–ДУС рассмотрим отношения  $\omega_x^{изм} / \omega_x$  и  $\omega_y^{изм} / \omega_x$  при входном воздействии только по оси  $x$ :

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega_x^{изм}}{\omega_x} &= \frac{1 + A_1(s)}{1 + \Delta_0(s)} \left(1 + \gamma_x^{ДМ} \frac{s}{\omega_n (1 + A_1(s))}\right); \\
 \frac{\omega_y^{изм}}{\omega_x} &= \frac{1}{(1 + \Delta_0(s))} \left(\frac{s}{\omega_n} - \gamma_x^{ДУ} A_1(s) - \gamma_y^{ДМ}\right),
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\text{где } \Delta_0(s) = \left(1 + \frac{\gamma_x^{ДМ} + \gamma_y^{ДМ} - \gamma_x^{ДУ} - \gamma_y^{ДУ}}{2 + A_1(s)} \frac{s}{\omega_n}\right) (2 + A_1(s)) R(s).$$



Применяя разложение в ряд Тейлора по малым параметрам  $\gamma_i$  и пренебрегая величинами второго порядка малости и более, из (14) получаем соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\omega_x^{\text{изм}}}{\omega_x} &= \frac{1 + A_1(s)}{1 + (2 + A_1(s))R(s)} \times \\ &\times \left( 1 + \left( \gamma_x^{\text{ДУ}} + \gamma_y^{\text{ДУ}} - \gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДУ}} \right) \frac{\frac{s}{\omega_n} R(s)}{1 + (2 + A_1(s))R(s)} + \gamma_x^{\text{ДМ}} \frac{s}{\omega_n(1 + A_1(s))} \right); \\ \frac{\omega_y^{\text{изм}}}{\omega_x} &= \frac{1}{1 + (2 + A_1(s))R(s)} \times \\ &\times \left( \frac{s}{\omega_n} - \gamma_y^{\text{ДМ}} - \gamma_x^{\text{ДУ}} A_1(s) + \left( \gamma_x^{\text{ДУ}} + \gamma_y^{\text{ДУ}} - \gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДУ}} \right) \frac{\frac{s}{\omega_n} R(s)}{1 + (2 + A_1(s))R(s)} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

в которых в явном виде можно видеть влияние погрешностей  $\gamma_i$  выставки ДУ и ДМ на динамическую точность ДНГ–ДУС по основному и ортогональному каналам (под основным каналом будем понимать тот канал, вдоль оси которого задается входная угловая скорость, при этом другой канал будет ортогональным по отношению к основному).

На основе выражений (15) оценим влияние погрешностей выставки ДУ и ДМ на динамическую точность ДНГ–ДУС в численном виде на примере гироскопа МГ-4 с параметрами:

$$A = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2; \quad H = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с};$$

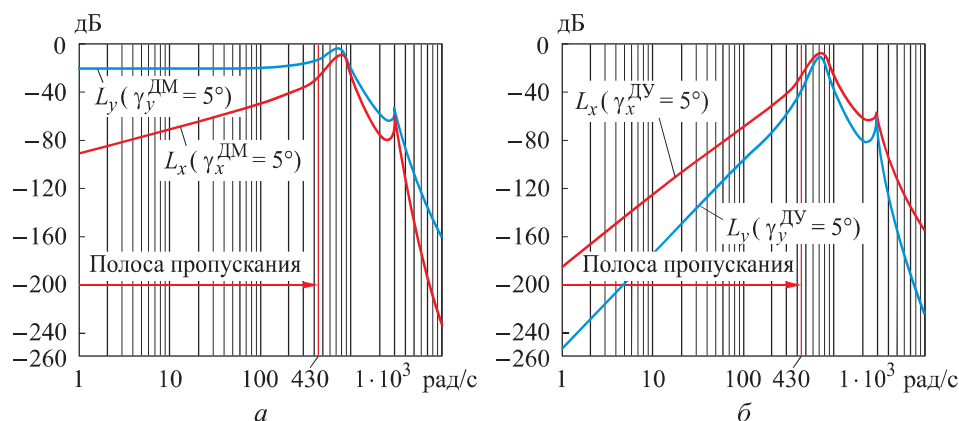
$$k^{\text{ДУ}} = 6 \text{ В/рад}; \quad k^i = 12 \text{ А/В}; \quad k^{\text{ДМ}} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м/А}.$$

В качестве передаточной функции усилителя — преобразователя контура обратной связи может быть использован следующий вид [9]:

$$W(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_1 s (T_2 s + 1)^2},$$

где  $T_1 = 0,015 \text{ с}$ ,  $T_2 = 0,001 \text{ с}$ .

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) влияния неточности установки ДУ и ДМ по основному и ортогональному каналам  $L_x(\gamma_i) = \omega_x^{\text{изм}} / \omega_x$  и  $L_y(\gamma_i) = \omega_y^{\text{изм}} / \omega_x$  приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Влияние погрешностей выставки ДМ (а) и ДУ (б) на динамическую точность ДНГ–ДУС

Из рис. 4 следует:

- влияние неточности установки ДМ на динамику ДНГ в режиме ДУС намного больше, чем неточность установки ДУ, например, при угле  $5^\circ$  неточности установки ДМ его максимальное влияние (на границе полосы пропускания) может достигать 23,7 % значения измеряемого сигнала, при такой же неточности установки ДУ погрешность составляет всего лишь 3,4 % значения измеряемого сигнала;

- сравнение влияния соответствующих датчиков основной и ортогональной осей на динамику гироскопа показывает, что ДУ основной оси и ДМ ортогональной влияют больше, чем ДУ ортогональной и ДМ основной оси. Это объясняется особенностью построения контура обратной связи, при которой ДУ основной оси измеряет отклонение ротора гироскопа, вызванное входной угловой скоростью, а что касается ДМ, то ДМ ортогональной оси задает прецессию гироскопа вокруг основной оси, поэтому его погрешность установки существенно влияет на динамику измеренной угловой скорости. При угле неточности установки  $5^\circ$  в полосе пропускания влияние неточности установки ДУ основной оси и ДМ ортогональной превышает влияние неточности установки ДУ ортогональной и ДМ основной оси не менее чем в 4 раза, а в среднем более чем в 24 раза.

Кроме того, как приведено ранее в выражениях (13), неточности установки ДМ вызывают погрешность измеренной угловой скорости в установившемся режиме, а неточности установки ДУ — не вызывают.

**Влияние динамической расстройки, постоянной времени гироскопа, нулевые сигналы ДУ на статическую и динамическую точности ДНГ–ДУС.** Для гироскопа МГ-4 постоянная времени  $\tau = 6$  с, что соответствует дрейфу  $10^\circ$  в час при отклонении ротора относительно корпуса

на 1 угл. мин. Если предположить, что дрейф от динамической расстройки равен дрейфу от постоянной времени гироскопа, то  $\Delta K = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Н· м/рад. Пренебрегая погрешностями  $\gamma_i$  выставки ДУ и ДМ, из (12) получаем

$$\begin{aligned} \omega_x^{изм}(s) &= \frac{1 + A_1(s) + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K\tau}{KW(s)}}{1 + \Delta_1(s)} \omega_x - \\ &- \frac{\frac{s}{\omega_n} - \frac{\Delta K}{KW(s)} + \frac{K\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n}}{1 + \Delta_1(s)} \omega_y + \frac{g_3(\alpha_0, \beta_0, s)}{1 + \Delta_1(s)}; \\ \omega_y^{изм}(s) &= \frac{1 + A_1(s) + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K\tau}{KW(s)}}{1 + \Delta_1(s)} \omega_y + \\ &+ \frac{\frac{s}{\omega_n} - \frac{\Delta K}{KW(s)} + \frac{K\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n}}{1 + \Delta_1(s)} \omega_x + \frac{g_4(\alpha_0, \beta_0, s)}{1 + \Delta_1(s)}, \end{aligned} \tag{16}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_1(s) &= (2 + A_1(s))R(s) + \frac{2\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} R(s) + \frac{2K\tau}{KW(s)}(1 + R(s)); \\ g_3(\alpha_0, \beta_0, s) &= \frac{-s}{R(s)} \left[ h_\alpha(\alpha_0, \beta_0, s) + \frac{R^2(s)}{H^2 s^2} \alpha_0 \right]; \\ g_4(\alpha_0, \beta_0, s) &= \frac{-s}{R(s)} \left[ h_\beta(\alpha_0, \beta_0, s) + \frac{R^2(s)}{H^2 s^2} \beta_0 \right]. \end{aligned}$$

Для расчета статической точности гироскопа из выражений (16) найдем установившиеся значения измеренной угловой скорости корпуса:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} \omega_x^{изм}(s) &= \omega_x + \omega_x(\theta_0); \\ \lim_{s \rightarrow 0} \omega_y^{изм}(s) &= \omega_y + \omega_y(\theta_0), \end{aligned} \tag{17}$$

где  $\omega_x(\theta_0) = \frac{K\tau}{H} \alpha_0 + \frac{\Delta K}{H} \beta_0$ ;  $\omega_y(\theta_0) = -\frac{\Delta K}{H} \alpha_0 + \frac{K\tau}{H} \beta_0$  — постоянное значение дрейфа от динамической расстройки и постоянной времени гироскопа. Из выражений (17) следует, что нулевые сигналы  $\alpha_0, \beta_0$  датчиков угла при условии  $\Delta K, K\tau \neq 0$ , приводят к статической погрешности измеренной угловой скорости корпуса;

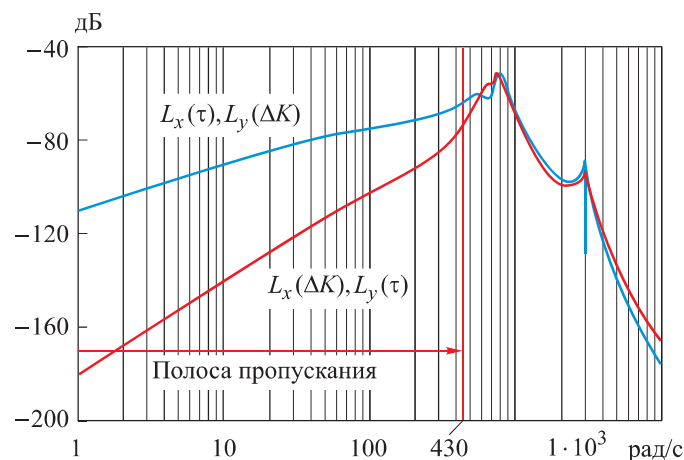
Для оценки влияния динамической расстройки и постоянной времени на динамическую точность гироскопа при входном воздействии по оси  $x$  воспользуемся выражениями (16), откуда находим:

$$\frac{\Delta\omega_x^{\text{изм}}(s)}{\omega_x} = \left( \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \right) \left( \frac{-1 - 2A_1(s) - A_1(s)R(s)}{(1 + (2 + A_1(s))R(s))^2} \right);$$

$$\frac{\Delta\omega_y^{\text{изм}}(s)}{\omega_x} = -\frac{\Delta K}{KW(s)} \left( \frac{1 + (4 + A_1(s))R(s)}{(1 + (2 + A_1(s))R(s))^2} \right) +$$

$$+ \frac{s}{\omega_n} \frac{K_\tau}{KW(s)} \left( \frac{A_1(s)R(s) - 1}{(1 + (2 + A_1(s))R(s))^2} \right).$$

Амплитудно-частотные характеристики влияния динамической расстройки и постоянной времени гироскопа по основному и ортогональному каналам  $L_x(\Delta K, \tau) = \Delta\omega_x^{\text{изм}} / \omega_x$  и  $L_y(\Delta K, \tau) = \Delta\omega_y^{\text{изм}} / \omega_x$  приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Влияние динамической расстройки  $\Delta K = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Н · м/рад и постоянной времени  $\tau = 6$  с гироскопа на динамическую точность ДНГ-ДУС

Видно, что в полосе пропускания влияние динамической расстройки и постоянной времени на 3 порядка меньше значения измеряемого сигнала, при этом по основному каналу газодинамический момент влияет больше, чем момент от динамической расстройки, а по ортогональному каналу — наоборот.

Как следует из выражений (16), нулевые сигналы  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  ДУ не входят в выражения-множители при  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ , поэтому они не влияют на дина-

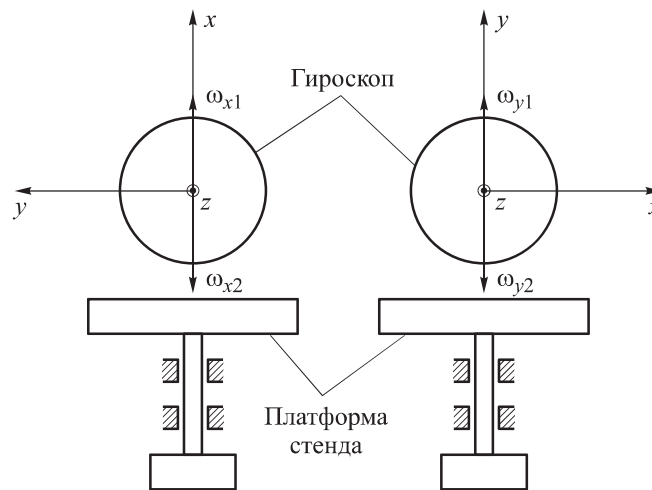
мическую точность ДНГ–ДУС, но при условии  $\Delta K$ ,  $K_\tau \neq 0$ , они вызывают статическую погрешность при измерении угловой скорости, как показано соотношениями (17).

**Повышение статической и динамической точности ДНГ–ДУС.**

Для повышения статической и динамической точности ДНГ–ДУС зададим следующий алгоритм обработки сигналов с выхода ДУС:

$$\omega_x^{изм}(s) = -\frac{J_y k_y^{DM}}{H} - \frac{k_{xy}}{k_x} \frac{J_x k_x^{DM}}{H}; \quad \omega_y^{изм}(s) = -\frac{J_x k_x^{DM}}{H} + \frac{k_{xy}}{k_y} \frac{J_y k_y^{DM}}{H}, \quad (18)$$

где  $k_x$ ,  $k_y$  и  $k_{xy}$ ,  $k_{yx}$  — масштабные коэффициенты, определяемые соотношением (5). Для определения этих параметров можно воспользоваться методом калибровки [10–15] путем задания угловой скорости корпуса по осям  $x$  и  $y$  (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема калибровки ДНГ

В силу работы контура обратной связи в установившемся режиме скорости прецессии ротора гироскопа вокруг осей  $x$  и  $y$  равны скорости вращения корпуса. Скорость прецессии гироскопа под действием моментов обратной связи, определяемых соотношением (6), может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \omega_{x1} &= \omega_{x0} + J_{y1} k_y + J_{x1} k_{yx}; & \omega_{x2} &= -\omega_{x1} = \omega_{x0} + J_{y2} k_y + J_{x2} k_{yx}; \\ \omega_{y1} &= 0 = \omega_{y0} + J_{x1} k_x + J_{y1} k_{xy}; & \omega_{y2} &= 0 = \omega_{y0} + J_{x2} k_x + J_{y2} k_{xy}; \\ \omega_{x3} &= 0 = \omega_{x0} + J_{y3} k_y + J_{x3} k_{yx}; & \omega_{x4} &= 0 = \omega_{x0} + J_{y4} k_y + J_{x4} k_{yx}; \\ \omega_{y3} &= \omega_{y0} + J_{x3} k_x + J_{y3} k_{xy}; & \omega_{y4} &= -\omega_{y3} = \omega_{y0} + J_{x4} k_x + J_{y4} k_{xy}, \end{aligned}$$

где  $\omega_{x0}$ ,  $\omega_{y0}$  — величины собственного дрейфа гироскопа по каналам  $x$  и  $y$ . Решая эти системы, получаем значения искомым масштабных коэффициентов:

$$k_x = \frac{\omega_{y3} - \omega_{y4}}{J_{x3} - J_{x4}} \frac{1}{1 - \Delta_K}; \quad k_y = \frac{\omega_{x1} - \omega_{x2}}{J_{y1} - J_{y2}} \frac{1}{1 - \Delta_K};$$

$$k_{xy} = -k_x \frac{J_{x1} - J_{x2}}{J_{y1} - J_{y2}}; \quad k_{yx} = -k_y \frac{J_{y3} - J_{y4}}{J_{x3} - J_{x4}},$$

где

$$\Delta_K = \frac{J_{x1} - J_{x2}}{J_{y1} - J_{y2}} \frac{J_{y3} - J_{y4}}{J_{x3} - J_{x4}}.$$

Измеренные угловые скорости корпуса гироскопа с учетом алгоритма (18) обработки сигналов будут иметь вид:

$$\omega_x^{изм} = \frac{\left( \left( 1 + A_1(s) + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \right) \omega_x - \left( \frac{s}{\omega_n} + (\gamma_x^{DM} - \gamma_y^{DY}) A_1(s) - \right. \right.}{\left. \left. - \frac{\Delta K}{KW(s)} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} \right) \omega_y + g_5(\alpha_0, \beta_0, s) \right)}{\left( 1 + 2R(s) + A_1(s)R(s) + (\gamma_x^{DM} + \gamma_y^{DM} - \gamma_x^{DY} - \gamma_y^{DY}) \frac{s}{\omega_n} R(s) + \right. \left. + \frac{2\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} R(s) + \frac{K_\tau}{KW(s)} (R(s) + 1) \right)}$$

$$\omega_y^{изм} = \frac{\left( \left( \frac{s}{\omega_n} + (\gamma_y^{DM} - \gamma_x^{DY}) A_1(s) - \frac{\Delta K}{KW(s)} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} \right) \omega_x + \right. \left. + \left( 1 + A_1(s) + \frac{\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} + \frac{K_\tau}{KW(s)} \right) \omega_y + g_6(\alpha_0, \beta_0, s) \right)}{\left( 1 + 2R(s) + A_1(s)R(s) + (\gamma_x^{DM} + \gamma_y^{DM} - \gamma_x^{DY} - \gamma_y^{DY}) \frac{s}{\omega_n} R(s) + \right. \left. + \frac{2\Delta K}{KW(s)} \frac{s}{\omega_n} R(s) + \frac{K_\tau}{KW(s)} (R(s) + 1) \right)},$$

(19)

где

$$\begin{aligned} g_5(\alpha_0, \beta_0, s) &= g_1(\alpha_0, \beta_0, s) + \gamma_x^{\text{ДМ}} g_2(\alpha_0, \beta_0, s); \\ g_6(\alpha_0, \beta_0, s) &= g_2(\alpha_0, \beta_0, s) - \gamma_y^{\text{ДМ}} g_1(\alpha_0, \beta_0, s). \end{aligned}$$

Из выражений (19) находим установившиеся значения измеряемых угловых скоростей:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} \omega_x^{\text{ИЗМ}}(s) &= \omega_x + \omega_x(\theta_0) + \gamma_x^{\text{ДМ}} \omega_y(\theta_0); \\ \lim_{s \rightarrow 0} \omega_y^{\text{ИЗМ}}(s) &= \omega_y + \omega_y(\theta_0) - \gamma_y^{\text{ДМ}} \omega_x(\theta_0). \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнивая выражения (20) с (13) и (17), получаем, что при обработке сигналов по алгоритму (18) исключается статическая погрешность, вызываемая неточностью установки ДМ, но при этом добавляется статическая пренебрежимо малая погрешность, вызываемая нулевыми сигналами ДУ от ортогонального канала.

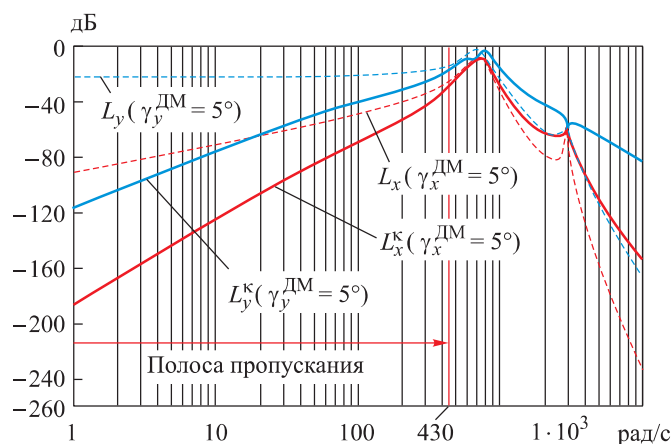
Оценим влияние неточности установки ДУ и ДМ на динамическую точность гироскопа при алгоритме (18) обработки сигналов на выходе ДУС. Для этой цели из выражения (19) найдем отношения  $\omega_x^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$  и  $\omega_y^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$ :

$$\begin{aligned} \frac{\omega_x^{\text{ИЗМ}}}{\omega_x} &= \left( \gamma_x^{\text{ДУ}} + \gamma_y^{\text{ДУ}} - \gamma_x^{\text{ДМ}} - \gamma_y^{\text{ДМ}} \right) \frac{s}{\omega_n} \frac{(1 + A_1(s))R(s)}{(1 + (2 + A_1(s))R(s))^2}; \\ \frac{\omega_y^{\text{ИЗМ}}}{\omega_x} &= \left( - \left( \gamma_x^{\text{ДУ}} - \gamma_y^{\text{ДМ}} \right) \left( 1 + \frac{s^2}{\omega_n^2} \right) + \frac{\left( \gamma_x^{\text{ДУ}} + \gamma_y^{\text{ДУ}} - \gamma_x^{\text{ДМ}} - \gamma_y^{\text{ДМ}} \right)}{(1 + 2R(s) + A_1(s)R(s))^2} \left( \frac{s}{\omega_n} \right)^2 \right) R(s). \end{aligned} \quad (21)$$

Сравнение АЧХ влияния погрешностей выставки ДУ основной оси и ДМ ортогональной  $L_x(\gamma_i) = \omega_x^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$ ,  $L_y(\gamma_i) = \omega_y^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$  (из (15) до компенсации) и  $L_x^k(\gamma_i) = \omega_x^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$ ,  $L_y^k(\gamma_i) = \omega_y^{\text{ИЗМ}} / \omega_x$  (из (21) после компенсации) приведено на рис. 7.

Как следует из рис. 7, при обработке сигналов с выхода ДУС по алгоритму (18) влияние неточности установки ДМ на динамическую точность измерения угловой скорости (при угле неточности установки  $5^\circ$ ) в полосе пропускания в среднем снижается в 15,5 раза.

Сравнивая выражения (19) и (16), выявили, что при алгоритме (18) обработки сигналов не изменяется влияние динамической расстройки и постоянной времени на динамическую точность гироскопа.



**Рис. 7.** Сравнение влияния погрешностей выставки ДУ и ДМ на динамическую точность ДНГ-ДУС до (штриховые) и после (сплошные) компенсации

**Заключение.** Показано, что погрешности выставки ДМ относительно базовых осей корпуса влияют на динамическую и статическую точности ДНГ в режиме ДУС, а погрешности выставки ДУ влияют только на его динамическую точность.

Неточность установки ДМ намного больше влияет на динамику ДНГ-ДУС, нежели неточность установки ДУ. В полосе пропускания при угле неточности установки ДМ ( $5^\circ$ ) его максимальное влияние может достигать 24 % значения измеряемого сигнала, в то же время такая же неточность установки ДУ приводит к максимальной погрешности значения измеряемого сигнала, равной всего лишь 4 %.

Неточность установки ДУ основной оси (по отношению к измеряемой угловой скорости) и ДМ ортогональной влияют на динамику гироскопа больше, чем неточность установки ДУ ортогональной и ДМ основной оси. При угле неточности установки ( $5^\circ$ ) в полосе пропускания влияние неточности установки ДУ основной оси и ДМ ортогональной превышает влияние неточности установки ДУ ортогональной оси и ДМ основной не менее чем в 4 раза, а в среднем в 24 раза.

Динамическая расстройка и постоянная времени гироскопа мало влияют на динамическую точность ДНГ-ДУС. В полосе пропускания их значение на 3 порядка меньше значения измеряемого сигнала. По основному каналу влияние газодинамического момента больше, чем влияние момента от динамической расстройки, а по ортогональному каналу — наоборот.

Нулевые сигналы датчиков угла приводят к постоянной составляющей дрейфа ДНГ-ДУС при  $\Delta K, K_\tau \neq 0$ , однако на динамическую точность гироскопа они не влияют.



Предложенный алгоритм обработки сигналов с выхода ДУС обеспечивает снижение влияния погрешностей выставки ДМ на динамическую точность ДНГ–ДУС. В полосе пропускания при неточности установки ДМ в  $5^\circ$  влияние ДМ уменьшается в среднем в 15,5 раза. Кроме того, при таком алгоритме обработки сигналов полностью исключается влияние неточности установки ДМ на точность ДНГ–ДУС в установившемся режиме, но добавляется статическая погрешность, вызываемая нулевыми сигналами ДУ от ортогонального канала, но она пренебрежимо мала.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Craig R.J.G. Theory of operation of a two-axis-rate gyro. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1990, vol. 26, no. 5, pp. 722–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/7.102707>
- [2] Craig R.J.G. Dynamically tuned gyros in strapdown systems. *AGARD Conf. on Inertial Navigation Computers and Systems*, 1972, pp. 12-1–12-17.
- [3] Craig R.J.G. Theory of errors of a multigimbal, elastically supported, tuned gyroscope. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1972, vol. AES-8, no. 3, pp. 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1972.309510>
- [4] Howe E.W., Savet P.H. The dynamically tuned free rotor gyro. *Control Engineering*, 1964, pp. 67–72.
- [5] De Castro Junqueira F., de Barros E. Development of a dynamically tuned gyroscope. *ABCMS Symposium Series in Mechatronics*, 2004, vol. 1, pp. 470–478.
- [6] Mansour W.M., Lacchini C. Two-axis dry tuned-rotor gyroscope — design and technology. *J. Guid. Control. Dyn.*, 1993, vol. 16, no. 3, pp. 417–425. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.21026>
- [7] Umadevi P., Navas A., Karuturi K., et al. Inertial navigation system for India's reusable launch vehicle-technology demonstrator (RLV-TD HEX) mission. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 2017, vol. 98, no. 6, pp. 689–696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-017-0404-8>
- [8] Elanskiy N.A., Pikunov D.G., Logachev A.V., et al. Algorithmic compensation of thermal errors of sensors of a strapdown inertial unit. *Proc. ICINS*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICINS.2017.7995632>
- [9] Подчезерцев В.П., Тан С., Цинь Ц. Компоненты модели погрешности динамически настраиваемого гироскопа. *Авиакосмическое приборостроение*, 2015, № 1, с. 8–18.
- [10] Подчезерцев В.П., Цинь Ц. Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 10. DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1682>
- [11] Zhao Y., Zhao H., Huo X. Fixture error analysis and an improved calibration method for dynamically tuned gyroscopes. *Proc. CGNCC*, 2016, pp. 765–770. DOI: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2016.7828882>

[12] Guo J., Zhong M. Calibration and compensation of the scale factor errors in DTG POS. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2013, vol. 62, no. 10, pp. 2784–2794.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2261631>

[13] Hegazy S.A.E.H., Mahmoud A., Kamel A.M., et al. Calibration and compensation of scale factor non-linearity and non-orthogonality errors for dynamically tuned gyroscope. *Proc. ICEENG*, 2020, pp. 371–376.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171734>

[14] Dai M., Zhang C., Lu J. In-field calibration method for DTG IMU including g-sensitivity biases. *IEEE Sensors J.*, 2019, vol. 19, no. 13, pp. 4972–4981.

DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2898104>

[15] Fu L., Yang X., Wang L.L. A novel calibration procedure for dynamically tuned gyroscope designed by D-optimal approach. *J. Int. Meas. Confed.*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 3173–3180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.05.026>

**Подчерзцев Виктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Нгуен Динь Зуй** — аспирант кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Подчерзцев В.П., Нгуен Д.З. Повышение динамической точности гироскопа с внутренним упругим карданным подвесом в режиме датчика угловой скорости. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 4 (137), с. 188–207. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-4-188-207>

**INCREASING THE DYNAMIC ACCURACY  
OF A GYROSCOPE WITH INTERNAL ELASTIC GIMBAL  
IN THE ANGULAR RATE SENSOR MODE**

**V.P. Podchezertsev**

[victor.podchezertsev@bmstu.ru](mailto:victor.podchezertsev@bmstu.ru)

**D.D. Nguyen**

[ariolvietnam@gmail.com](mailto:ariolvietnam@gmail.com)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

Orientation and navigation systems increasingly use gyroscopes with internal elastic gimbal, due to their advantages in comparison with traditional gyroscopes: small mass-size characteristics, absence of dry friction, high enough accuracy. It is necessary to re-

**Keywords**

*Orientation and navigation systems, gyroscope, inner elastic gimbal, angular rate sensor, dynamic accuracy*

search not only static but also dynamic characteristics of gyroscope as an important link of this automatic control system, in order to ensure the functionality and to get the best characteristics of gyroscope systems in the process of operation. All this requires a detailed study of design and technological factors influence on the dynamic accuracy of the gyroscope, as well as the system as a whole. The paper deals with two-component angular rate sensor based on a gyroscope with an internal elastic gimbal. The design and technological factors determining the dynamic accuracy of this type of gyroscope are investigated. The numerical evaluation of each considered factor influence on the accuracy of the two-component device is given. A variant of compensation of the angle sensors inaccuracy influence and torque sensors influence on the dynamic accuracy of gyroscope is proposed and its efficiency is numerically evaluated

Received 04.12.2020

Accepted 30.12.2020

© Author(s), 2021

## REFERENCES

- [1] Craig R.J.G. Theory of operation of a two-axis-rate gyro. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1990, vol. 26, no. 5, pp. 722–731. DOI: <https://doi.org/10.1109/7.102707>
- [2] Craig R.J.G. Dynamically tuned gyros in strapdown systems. *AGARD Conf. on Inertial Navigation Computers and Systems*, 1972, pp. 12-1–12-17.
- [3] Craig R.J.G. Theory of errors of a multigimbal, elastically supported, tuned gyroscope. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1972, vol. AES-8, no. 3, pp. 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1972.309510>
- [4] Howe E.W., Savet P.H. The dynamically tuned free rotor gyro. *Control Engineering*, 1964, pp. 67–72.
- [5] De Castro Junqueira F., de Barros E. Development of a dynamically tuned gyroscope. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2004, vol. 1, pp. 470–478.
- [6] Mansour W.M., Lacchini C. Two-axis dry tuned-rotor gyroscope — design and technology. *J. Guid. Control. Dyn.*, 1993, vol. 16, no. 3, pp. 417–425. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.21026>
- [7] Umadevi P., Navas A., Karuturi K., et al. Inertial navigation system for India's reusable launch vehicle-technology demonstrator (RLV-TD HEX) mission. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 2017, vol. 98, no. 6, pp. 689–696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-017-0404-8>
- [8] Elanskiy N.A., Pikunov D.G., Logachev A.V., et al. Algorithmic compensation of thermal errors of sensors of a strapdown inertial unit. *Proc. ICINS*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICINS.2017.7995632>
- [9] Podchertsev V.P., Tang X., Qin Z. Components of model of drift dynamically tuned gyro. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2015, no. 1, pp. 8–18 (in Russ.).

[10] Podchezertsev V.P., Qin Z. Modeling the calibration of DTG on a uniaxial gyrostabilizer. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 10 (in Russ.).

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

[11] Zhao Y., Zhao H., Huo X. Fixture error analysis and an improved calibration method for dynamically tuned gyroscopes. *Proc. CGNCC*, 2016, pp. 765–770.

DOI: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2016.7828882>

[12] Guo J., Zhong M. Calibration and compensation of the scale factor errors in DTG POS. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2013, vol. 62, no. 10, pp. 2784–2794.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2261631>

[13] Hegazy S.A.E.H., Mahmoud A., Kamel A.M., et al. Calibration and compensation of scale factor non-linearity and non-orthogonality errors for dynamically tuned gyroscope. *Proc. ICEENG*, 2020, pp. 371–376.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEENG45378.2020.9171734>

[14] Dai M., Zhang C., Lu J. In-field calibration method for DTG IMU including g-sensitivity biases. *IEEE Sensors J.*, 2019, vol. 19, no. 13, pp. 4972–4981.

DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2898104>

[15] Fu L., Yang X., Wang L.L. A novel calibration procedure for dynamically tuned gyroscope designed by D-optimal approach. *J. Int. Meas. Confed.*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 3173–3180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.05.026>

**Podchezertsev V.P.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Attitude Control and Navigation Instruments and Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Nguyen D.D.** — Post-Graduate Student, Department of Attitude Control and Navigation Instruments and Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Podchezertsev V.P., Nguyen D.D. Increasing the dynamic accuracy of a gyroscope with internal elastic gimbal in the angular rate sensor mode. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 4 (137), pp. 188–207 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-4-188-207>