

## ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 531.383

### ДВУХКАНАЛЬНАЯ СХЕМА ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО ГИРОСКОПА

Зазимко А. В., Мелешко В. В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

*Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) приобрели широкое распространение в качестве чувствительных элементов в разнообразных системах стабилизации и ориентации. Основным преимуществом таких гироскопов можно назвать упругий подвес ротора, который освобождает прибор от моментов сил сухого трения. Одним из основных недостатков прибора есть то, что присутствующие перекрестные связи вызывают погрешность в выходном сигнале прибора.*

*Двухканальная схема ДНГ, как метод борьбы с перекрестными связями, был предложен Одинцовым [1]. Он дает возможность избавиться от этих вредных составляющих. Однако анализируемые уравнения движения неполны, и ДНГ рассматривается в режиме датчика угла.*

*В данной статье исследовался ДНГ в режиме датчика угловой скорости. Использовалась двухканальная схема с наиболее полными уравнениями движения прибора. Созданы модели одноканальной и двухканальной схем, реальной и идеальной работы. В результате проведенных исследований и сравнения выходных сигналов различных схем, мы видим, что двухканальная значительно (на два порядка) снижает влияние перекрестных связей.*

*Полученные положительные результаты исследования доказывают целесообразность использования данной схемы в том случае, когда имеется более двух ДНГ. Дальнейшие исследования будут направлены на нахождение способа применения данного преимущества в избыточных каналах поступления информации из блоков с неортогональной ориентацией чувствительных осей.*

**Ключевые слова:** динамически настраиваемый гироскоп, перекрестные связи, двухканальная схема.

#### **Вступление**

Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) приобрели широкое распространение в качестве чувствительных элементов в разнообразных системах стабилизации и ориентации. Одним из основных недостатков ДНГ является наличие перекрестных связей, что приводит к возникновению ощутимой ошибки в выходном сигнале. Двухканальная схема ДНГ, как метод борьбы с перекрестными связями, был предложен Одинцовым [1]. Суть метода заключается в добавлении другого ДНГ с противоположным направлением кинетического момента. При суммировании выходных сигналов гироскопов вредные составляющие устраняются. Однако анализируемые в [1] уравнения движения неполны, и ДНГ рассматривается в режиме датчика угла.

Целью данной статьи является исследование ДНГ в режиме датчика угловой скорости в двухканальной схеме с наиболее полными уравнениями движения

прибора. Создание моделей одноканальной и двухканальной схем, реальной и идеальной работы.

Полученные положительные результаты исследования доказывают целесообразность использования данной схемы в том случае, когда имеется более двух ДНГ. Дальнейшие исследования будут направлены на нахождение способа применения данного преимущества в избыточных каналах поступления информации из блоков с неортогональной ориентацией чувствительных осей.

### Уравнения движения динамически настраиваемого гироскопа

Уравнение движения ДНГ (рис. 1) условно разделяются на две составляющие: уравнения моментов кольца и уравнения моментов ротора гироскопа [1].

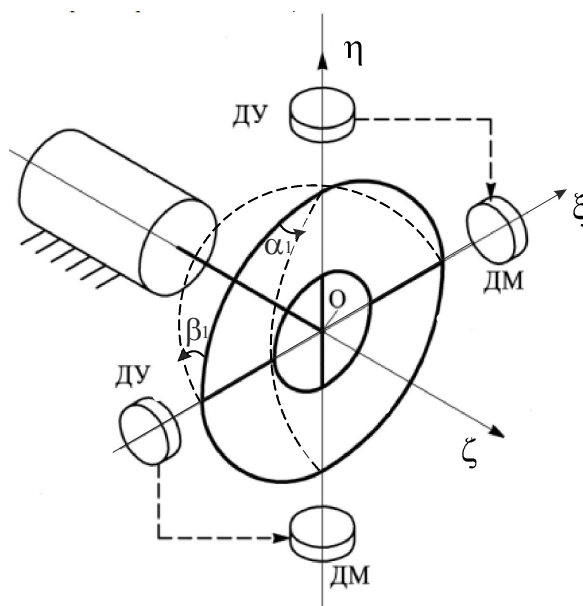


Рис. 1. Схема динамически настраиваемого гироскопа, где: ДМ – датчик моментов, ДУ – датчик угла

Для получения уравнений моментов всей подвижной части гироскопа суммируются эти уравнения кольца и ротора в осях  $\xi$  и  $\eta$  (которые не вращаются вместе с приводным валом).

Получим уравнение моментов вокруг оси  $\xi$ :

$$\begin{aligned} & (J_{\vartheta} + \frac{1}{2}J_{xk})\ddot{\beta}_1 + \frac{1}{2}(f_1 + f_2)\dot{\beta}_1 + \frac{1}{2}(k_1 + k_2)\beta_1 - \frac{1}{2}(J_{xk} + J_{yk} - J_{zk})\dot{\gamma}^2\beta_1 + \\ & + \frac{1}{2}(f_1 + f_2)\dot{\gamma}\alpha_1 + (J_0 + J_{xk})\dot{\gamma}\alpha_1 + \frac{1}{2}M_{\xi}^0\dot{\gamma}\alpha_1 = -[J_0 + \frac{1}{2}(J_{zk} + J_{xk} - J_{yk})]\dot{\gamma}\omega_{\eta} - (1) \\ & - (J_{zk} - J_{yk})\dot{\gamma}\omega_{\xi}\beta_1 - (J_{\vartheta} + \frac{1}{2}J_{xk})\dot{\omega}_{\xi} - M_{xk}^{6.c} \cos \gamma - M_{yp}^{6.c} \sin \gamma + M_{\xi}^{6.c}. \end{aligned}$$

Аналогичное уравнение моментов вокруг оси  $\eta$ :

$$\begin{aligned}
 & (J_o + \frac{1}{2}J_{xk})\ddot{\alpha}_1 + \frac{1}{2}(f_1 + f_2)\dot{\alpha}_1 + \frac{1}{2}(k_1 + k_2)\alpha_1 - \frac{1}{2}(J_{xk} + J_{yk} - J_{zk})\dot{\gamma}^2\alpha_1 - \\
 & - \frac{1}{2}(f_1 + f_2 + M_{\xi}^o)\dot{\gamma}\beta_1 + (J_o + J_{xk})\dot{\gamma}\beta_1 + [J_o + \frac{1}{2}(J_{zk} + J_{xk} - J_{yk})]\dot{\gamma}\omega_{\xi} - \\
 & - (J_{zk} - J_{yk})\dot{\gamma}\omega_{\xi}\alpha_1 - (J_o + \frac{1}{2}J_{xk})\dot{\omega}_{\eta} + M_{xk}^{e.c}\sin\gamma + M_{yp}^{e.c}\cos\gamma + M_{\eta}^{e.c},
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J_o$  – экваториальный момент инерции ротора,  $J_o$  – осевой момент инерции ротора,  $J_{xk}, J_{yk}$  – экваториальные моменты инерции карданового кольца,  $J_{zk}$  – осевой момент инерции карданового кольца,  $f_1, f_2$  – коэффициенты вязкого сопротивления,  $k_1$  – жесткость торсионов, которые связывают приводной вал с кардановым кольцом;  $k_2$  – жесткость другой пары торсионов;  $\dot{\gamma}$  – постоянная угловая скорость приводного вала,  $\omega_{\xi}, \omega_{\eta}$  – составляющие угловой скорости вращения основания гироскопа,  $M_{xk}^{e.c}, M_{yp}^{e.c}, M_{\eta}^{e.c}$  – моменты других внешних сил,  $\alpha_1$  – угол отклонения экваториальной плоскости ротора вокруг оси  $\xi$  прибора,  $\beta_1$  – угол отклонения плоскости ротора вокруг оси  $\eta$  прибора.

Упростим выражения (1) и (2) до более компактных. Для этого используем обозначения

$$\begin{aligned}
 J_e + \frac{1}{2}J_{xk} &= J; \quad (J_o + J_{xk})\dot{\gamma} = H; \quad \frac{1}{2}[(k_1 + k_2) - (J_{zk} + J_{xk} - J_{yk})\dot{\gamma}^2] = \Delta k; \\
 \frac{1}{2}(f_1 + f_2 + M_{\xi}^o)\dot{\gamma} &= D. \quad \frac{1}{2}(f_1 + f_2) = f; \quad [J_o + \frac{1}{2}(J_{zk} + J_{xk} - J_{yk})]\dot{\gamma} = H_1; \\
 (J_{zk} - J_{yk})\dot{\gamma} &= H_2.
 \end{aligned}$$

Получим:

$$\begin{aligned}
 J\ddot{\beta}_1 + f\dot{\beta}_1 + \Delta k\beta_1 + D\alpha_1 + H\dot{\alpha}_1 + K\alpha_1 &= -H_1\omega_{\eta} - H_2\omega_{\xi}\beta_1 - J\dot{\omega}_{\xi} + M_{\xi\Sigma}^{e.c} \\
 J\ddot{\alpha}_1 + f\dot{\alpha}_1 + \Delta k\alpha_1 - D\beta_1 - H\dot{\beta}_1 - K\beta_1 &= H_1\omega_{\xi} - H_2\omega_{\xi}\alpha_1 - J\dot{\omega}_{\eta} + M_{\eta\Sigma}^{e.c}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Полный вывод уравнений движения описан в [1].

Условие динамической настройки в схеме – равенство суммарной жесткости торсионов и динамического момента сил инерции карданового кольца:

$$k_1 + k_2 - (J_{xk} + J_{yk} + J_{zk})\dot{\gamma}^2 = 0. \quad (4)$$

### Схема динамически настраиваемого гироскопа с устранением перекрестных связей

Оба выходных сигнала гироскопа зависят от углового движения основания вокруг двух его осей. Для устранения этого недостатка можно применить схему из двух одинаковых гироскопов, отличающихся противоположным знаком вращения роторов.

Уравнения движения одного гироскопа (будем называть его первым гироскопом), имеют вид согласно (3).

В операторной форме уравнения (3) будут выглядеть:

$$(Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)\beta_1 + (Hp + D + K)\alpha_1 = -H_1\omega_\eta - Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.};$$

$$-(Hp + D + K)\beta_1 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)\alpha_1 = H_1\omega_\xi - Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{6.c.}.$$

Решив эту алгебраическую систему уравнений получим:

$$\beta_1 = \beta_1' = \frac{(Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)(-H_1\omega_\eta - Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2} - \frac{(Hp + D + K)(H_1\omega_\xi - Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2}.$$

$$\alpha_1 = \alpha_1' = \frac{(Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)(H_1\omega_\xi - Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2} + \frac{(Hp + D + K)(-H_1\omega_\eta - Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2}.$$

Для второго гироскопа решения будут отличаться лишь противоположными знаками кинетических моментов

$$\beta_1 = \beta_1'' = \frac{(Jp^2 + fp + \Delta k - H_2\omega_\zeta)(H_1\omega_\eta - Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2} + \frac{(Hp + D + K)(-H_1\omega_\xi - Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2}.$$

$$\alpha_1 = \alpha_1'' = \frac{(Jp^2 + fp + \Delta k - H_2\omega_\zeta)(-H_1\omega_\xi - Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2} - \frac{(Hp + D + K)(H_1\omega_\eta - Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.})}{(Hp + D + K)^2 + (Jp^2 + fp + \Delta k + H_2\omega_\zeta)^2}.$$

Гироскопический момент  $H_2\omega_\zeta$  учитывать не будем ввиду его малости по сравнению, к примеру, с гироскопическим моментом  $H_1$  [1].

Составим выражения сумм выходных сигналов, снимаемых с выходов одноименных датчиков угла двух гироскопов:

$$U_{\Sigma\beta_1} = \frac{2(Jp^2 + fp + \Delta k)(-Jp\omega_\xi + M_{\xi\Sigma}^{6.c.}) - 2H_1\omega_\xi(Hp + D + K)}{(Jp^2 + fp + \Delta k)^2 + (Hp + D + K)^2}; \quad (5)$$

$$U_{\Sigma\alpha_1} = \frac{2(Jp^2 + fp + \Delta k)(-Jp\omega_\eta + M_{\eta\Sigma}^{e.c.}) - 2H_1\omega_\eta(Hp + D + K)}{(Jp^2 + fp + \Delta k)^2 + (Hp + D + K)^2}. \quad (6)$$

Выражения (6) и (7) подтверждают возможность устранения перекрестных связей в выходных сигналах ДНГ.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для исследования преимуществ использования двухканальной схемы ДНГ были созданы математические модели в среде Matlab по вышеизложенным уравнениям. Было исследовано поведение идеальных и реальных одноканальных и двухканальных схем приборов (табл. 1).

В одноканальном режиме под идеальной работой прибора подразумевается, что динамическая настройка идеальная, т.е. условие (4) выполняется. Под реальной работой понимаем, что условие (4) отличается от 0 на величину порядка  $10^{-5}$ .

В двухканальной схеме под идеальной работой прибора имеется в виду, что в двух гироскопах выполняется условие (4), и они абсолютно одинаковые. Под реальной работой понимаем, что в гироскопах условие (4) отличается от 0 на величину порядка  $10^{-5}$ , а также такие характеристики приборов, как осевые и экваториальные моменты инерции карданового кольца и ротора, коэффициенты упругости внутренних и наружных торсионов и коэффициенты демпфирования различаются на величину до 5%.

Также аналитически было рассчитано, что результаты оценки по формулам (5) (6) соответствуют результатам моделирования с погрешностью менее 1%.

Таблица 1. Результаты исследований.

Исследуемый режим	Входное действие	Погрешность от перекрестной связи, [%]			
		Одноканальная схема		Двухканальная схема	
		Идеальная	Реальная	Идеальная	Реальная
Поворот основания относительно оси $\xi$	$\omega_\xi = 1^\circ/\text{с}$	$1,1 \cdot 10^{-11}\%$	0,042% (Рис.2)	0 (Рис.4)	$1,08 \cdot 10^{-4}\%$ (Рис.5)
Вибрация по оси $\xi$	$\omega_{\xi_m} = 1^\circ/\text{с}$ $f = 2\text{Гц}$	0,77%	0,77% (Рис.3)	0 (Рис.6)	$5,66 \cdot 10^{-3}\%$ (Рис.7)

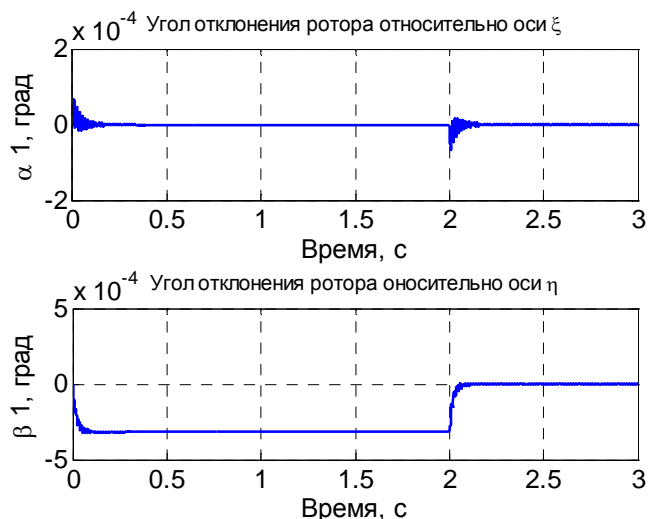


Рис. 2. Выходные сигналы одноканального ДНГ при реальной работе. Угловая скорость поворота основания  $\omega_{\xi}=1^{\circ}/с$ , время действия-2с

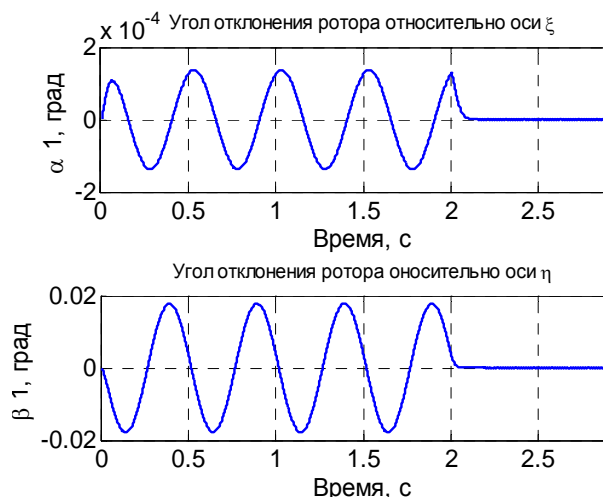


Рис. 3. Выходные сигналы одноканального ДНГ при реальной работе. Действует вибрация относительно оси  $\xi$  с амплитудой  $1^{\circ}/с$  и частотой 2 Гц, время действия-2с.

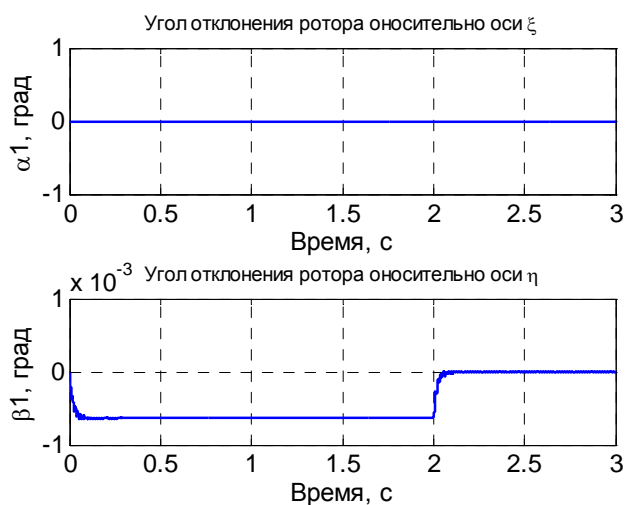


Рис. 4. Выходные сигналы двухканального ДНГ при идеальной работе. Угловая скорость поворота основания  $\omega_{\xi}=1^{\circ}/с$ , время действия-2с

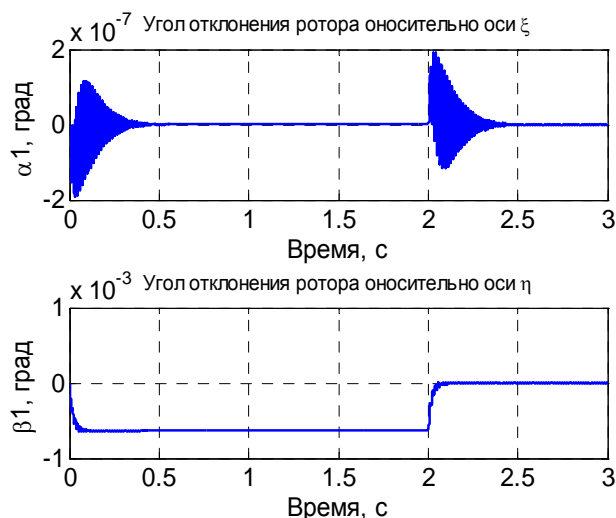


Рис. 5. Выходные сигналы двухканального ДНГ при реальной работе. Угловая скорость поворота основания  $\omega_{\xi}=1^{\circ}/с$ , время -2с

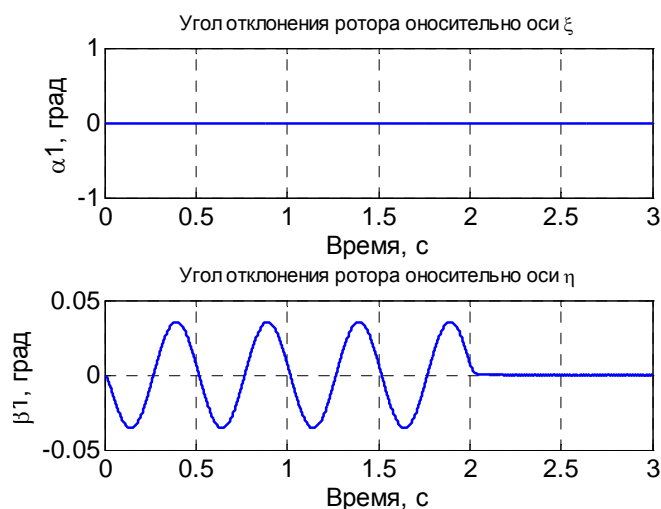


Рис. 6. Выходные сигналы двухканального ДНГ при идеальной работе. Действует вибрация относительно оси  $\xi$  с амплитудой  $1^\circ/\text{с}$  и частотой 2 Гц, время действия-2с.

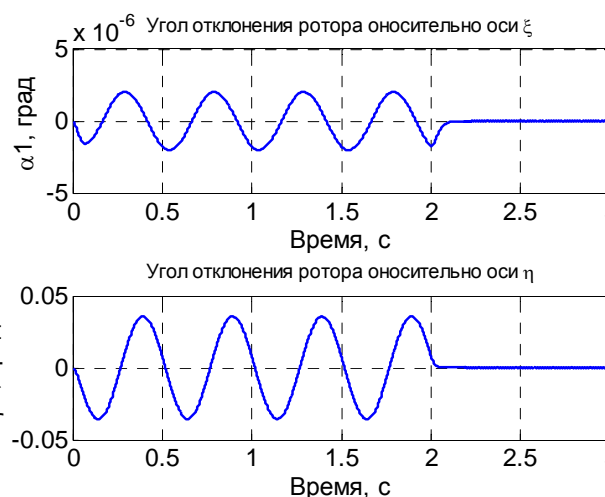


Рис. 7. Выходные сигналы двухканального ДНГ при реальной работе. Действует вибрация относительно оси  $\xi$  с амплитудой  $1^\circ/\text{с}$  и частотой 2 Гц, время действия-2с.

### Выводы

Перекрестные связи в одноканальном ДНГ приводят к погрешностям в выходном сигнале до 1%. В идеальной двухканальной схеме перекрестные связи устраняются полностью, а в реальной схеме эти погрешности значительно меньше (два порядка) по сравнению с погрешностями в одноканальной схеме. Следовательно, данный метод устранения погрешностей от перекрестных связей показывает хорошие результаты (погрешности не более  $10^{-2}\%$ ).

Полученные положительные результаты исследования доказывают целесообразность использования данной схемы в том случае, когда имеется более двух ДНГ. Дальнейшие исследования будут направлены на нахождение способа применения данного преимущества в избыточных каналах поступления информации из блоков с неортогональной ориентацией чувствительных осей.

### Литература

1. Одинцов А.А. Динамически настраиваемые гироскопы / А.А. Одинцов. - К.: УМК ВО, 1992. - 66 с.

Надійшла до редакції  
20 лютого 2013 року

© Зазимко А.В., Мелешко В.В., 2013