*Здійснюється аналіз похибок курсовказування на основі тристепеневого вільного гіроскопа з двохканальною автокомпенсацією впливу сторонніх перешкод. З'ясовується ступінь впливу двохкомпонентної гармонічної та полігармонічної хитавиці фюзеляжу на дрейф осі фігури відносно осей підвісу*

*Ключові слова: автокомпенсація, гармонічна хитавиця, полігармонічна хитавиця*

*Проводится анализ погрешностей курсоуказания на основе трехстепенного свободного гироскопа с двухканальной автокомпенсацией влияния внешних помех. Устанавливается степень влияния двухкомпонентной гармонической и полигармонической качки фюзеляжа на дрейф оси фигуры относительно осей подвеса*

*Ключевые слова: автокомпенсация, гармоническая качка, полигармоническая качка*

*The analysis of errors of kursoukazaniya is conducted on the basis of three-sedate free gyroscope with twochannel autoindemnification of influence of external noises. The degree of influence of the dvukhkomponentnoy harmonic and polyhaploid tossing of fuselage is set on the drift of ax of figure in relation to the axes of podvesa*

*Keywords: autoindemnification, harmonic tossing, polyhaploid tossing*

УДК 629.7.054

# СТРУКТУРНАЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КУРСОУКАЗАНИЯ

**В.В. Карачун**
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

**В.Н. Мельник**
Доктор технических наук, доцент, профессор*
*Кафедра биотехники и инженерии
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056
Контактный тел.: (044) 454-94-51
E-mail: karachun1@gala.net

## 1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению эффективности курсоуказания на основе трехстепенного свободного гироскопа. В качестве средства повышения точности используется принцип двухканальности Б.Н. Петрова.

Использование этого принципа подразумевает двукратное увеличение массогабаритных характеристик прибора, что является несомненным недостатком такой схемы. С другой стороны, если требования точности курсоуказания преобладают над всеми иными, тогда двухканальная схема автокомпенсации влияния внешних помех имеет несомненные преимущества по сравнению с другими методами атокомпенсации. Прежде всего, это достоинство состоит в уменьшении влияния мгновенных значений помех, а не в среднем за какой-то период времени, как в иных технических решениях. Во-вторых, существует возможность влияния на характеристики гироскопа путем введения гибкой отрицательной обратной связи.

Вопросы курсоуказания всегда остаются актуальными для любого класса подвижных объектов. Степень применимости тех или иных модификаций приборов определяется системой требований к эксплуатационным характеристикам аппаратов. Наиболее часто для этой цели используются приборы инерциальной навигации, хорошо зарекомендовавшие себя как в режиме автоматического управления подвижным объектом, так и в режиме наведения.

## 2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

Для определения отклонения продольной оси аппарата в плоскости азимута достаточно часто используют свободный гироскоп [1, 2, 3]. В самой идеологии конструкции заложены внутренние причины, приводящие к погрешностям инерциальной ориентировки. Они делятся на методические и инструментальные [4, 5]. История создания средств борьбы с ними имеет достаточно протяженное летоисчисление.

С другой стороны, целый ряд внешних возмущающих факторов также приводят к погрешностям гироскопических приборов. К ним можно отнести угловое движение летательного аппарата, эллиптическую и круговую вибрацию, проникающее акустическое излучение, тепловой факел и др. [6, 7, 8]. Отличительной особенностью этих воздействий является их влияние на гироскоп. В первых двух случаях они воздействуют через опоры, в двух других – через окружающую среду. Очевидно, что и расчетные модели погрешностей, и средства борьбы с их влиянием будут существенно отличаться.

**Целью** проводимых исследований является анализ эффективности подавления влияния кинематического возмущения со стороны места установки прибора на точность курсоуказания на основе прямого использования принципа двухканальности Б.Н. Петрова.

## 3. Структура взаимодействия трехосного свободного гироскопа со своей физической моделью

Итак, метод двухканальности подразумевает создание второго канала прохождения внешнего воздействия. Применительно к гироскопу, это сводится к построению физической модели в виде такого же трехосного свободного гироскопа, с таким же подвесом, но с вектором кинетического момента, направленным противоположно и равным по величине.

Остановимся на наиболее интересном, с точки зрения приложений, моменте – определении систематических составляющих ухода оси фигуры относительно осей подвеса.

Формулы для вычисления систематических уходов системы автокомпенсации представим в виде:

$$\left\langle \dot{\beta}_2 \right\rangle = \frac{1}{2\Delta_0} C_\beta ; \; \left\langle \dot{\alpha}_2 \right\rangle = \frac{1}{2\Delta_0} C_\alpha , \tag{1}$$

где $C_\alpha$, $C_\beta$ – постоянные составляющие правых частей уравнений движения. Таким образом, независимо от характера колебаний основания, задача определения систематической составляющей ухода схемы автокомпенсации сводится к выделению постоянных составляющих внешних возмущений.

*Двухкомпонентная качка. Полигармоническая структура углового движения основания.* Определим уходы системы при двухкомпонентной гармонической качке вида:

$$\omega_{2x} = \rho\omega \sin\psi_0 \cos(\omega t + \varepsilon) ;$$

$$\omega_{2y} = \rho\omega \cos\psi_0 \cos(\omega t + \varepsilon) ,$$

причем колебания вокруг оси $z$ могут иметь произвольную структуру.

Из соотношений (4) найдем первое приближение для углов $\beta_{1i}$ ($i = 1, 2$). Имеем:

$$\beta_{11} = \frac{\rho\omega\sin\psi_0}{\omega^4\left(b - a\omega^2\right) + \left(f - d\omega^2\right)} \Big\{ \Big[ -C_1 \mathrm{tg}\beta_{01}\omega^2 H_1 \cos\beta_{01} \times$$

$$\times \left(A_2(\beta_{02}) B_2 \omega^2 - H_2^2 \cos^2\beta_{02}\right) + k_{01}k_{02}A_1(\beta_{01}) H_2 \cos\beta_{02} -$$

$$-C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{01}k_{02} H_1 \cos\beta_{01} +$$

$$+C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{01}k_{02} \left(H_1\cos\beta_{01} + H_2\cos\beta_{02}\right) \Big] \times$$

$$\times \cos(\omega t + \varepsilon) + \omega \Big[ C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{01} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} +$$

$$+k_{02}A_1(\beta_{01})\left(A_2(\beta_{02}) B_2\omega^2 - H_1^2\cos^2\beta_{01}\right) +$$

$$+C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{02} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} +$$

$$+C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{02} A_1(\beta_{01}) B_2 \omega^2 -$$

$$-C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{01} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} \Big] \sin(\omega t + \varepsilon) \Big\} =$$

$$= \Phi\left[L_1 \cos(\omega t + \varepsilon) + L_2 \sin(\omega t + \varepsilon)\right];$$

$$\beta_{12} = \frac{\rho\omega\sin\psi_0}{\omega^4\left(b - a\omega^2\right) + \left(f - d\omega^2\right)} \Big\{ \Big[ C_2 \mathrm{tg}\beta_{02}\omega^2 H_2 \cos\beta_{02} \times$$

$$\times \left(A_1(\beta_{01}) B_1 \omega^2 - H_1^2 \cos^2\beta_{01}\right) - k_{01}k_{02}A_2(\beta_{02}) H_1 \cos\beta_{01} +$$

$$+C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{01}k_{02} H_2 \cos\beta_{02} +$$

$$+C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{01}k_{02} \left(H_1\cos\beta_{01} + H_2\cos\beta_{02}\right) \Big] \times$$

$$\times \cos(\omega t + \varepsilon) + \omega \Big[ C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{01} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} +$$

$$+k_{02}\left(A_1(\beta_{01}) B_1\omega^2 - H_1^2\cos^2\beta_{01}\right) A_2(\beta_{02}) -$$

$$C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} k_{02} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} -$$

$$-C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{02} A_2(\beta_{02}) B_1 \omega^2 +$$

$$+C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} k_{01} H_1 \cos\beta_{01} H_2 \cos\beta_{02} \Big] \sin(\omega t + \varepsilon) \Big\} =$$

$$= \Phi\left[L_3 \cos(\omega t + \varepsilon) + L_4 \sin(\omega t + \varepsilon)\right]. \tag{2}$$

Из уравнений движения, с учетом соотношений (1), (2), получаем формулы для осредненных уходов системы автокомпенсации при двухкомпонентной качке. Имеем:

$$\left\langle \dot{\beta}_2 \right\rangle =$$

$$= \frac{1}{2k_{01}k_{02}\left(H_1\cos\beta_{01} + H_2\cos\beta_{02}\right)^2} \Big\{ \Big\{ k_{01}k_{02}\Phi\left[A_1(\beta_{01}) - A_2(\beta_{02})\right] \times$$

$$\times \left\{ \frac{H_1 \sin\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})} \Big[ k_{01}\Phi\left(L_1^2 + L_2^2 + L_1L_3 + L_2L_4\right) - \right.$$

$$-C_1 \mathrm{tg}\beta_{01} \rho\omega^2 \sin\psi_0 L_2 \Big] \times$$

$$\times \left[1 - \frac{2R_1\cos^2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}\right] + \frac{H_2 \sin\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})} \Big[ k_{01}\Phi\left(L_1^2 + L_2^2 + L_1L_3 + L_2L_4\right) -$$

$$-C_2 \mathrm{tg}\beta_{02} \rho\omega^2 \sin\psi_0 L_4 \Big] \left[1 - \frac{2R_2\cos^2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right] - \rho\omega\sin\psi_0 \times$$

$$\times \Big[ \rho\omega\sin\psi_0 \left(L_1H_1\cos\beta_{01} - L_3H_2\cos\beta_{02}\right) + k_{01}\left(L_1 + L_3\right) \times$$

$$\left. \times \left( \frac{R_1}{A_1(\beta_{01})} - \frac{R_2}{A_2(\beta_{02})} \right) \Big] \right\} \Big\} - \frac{R_1 \sin 2\beta_{01}}{4A_1^2(\beta_{01})} \Big[ -k_{02}A_2(\beta_{02}) H_1 \cos\beta_{01} +$$

$$+(2k_{01}+k_{02})A_1(\beta_{01})H_2\cos\beta_{02}\Big]\times$$

$$\times\Big[k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)+$$

$$+C_1^2 tg^2\beta_{01}\rho^2\omega^2\sin^2\psi_0-2k_{01}C_1 tg\beta_{01}\Phi(L_2+L_4)\rho\omega^2\sin\psi_0\Big]-$$

$$-\frac{R_2\sin 2\beta_{02}}{4A_2^2(\beta_{02})}\Big[(2k_{01}+k_{02})A_2(\beta_{02})H_1\cos\beta_{01}-$$

$$-k_{02}A_1(\beta_{01})H_2\cos\beta_{02}\Big]\times$$

$$\times\Big[k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)+$$

$$+C_2^2 tg^2\beta_{02}\rho^2\omega^4\sin^2\psi_0-2k_{01}C_2 tg\beta_{02}\Phi(L_2+L_4)\rho\omega^2\sin\psi_0\Big]+$$

$$+k_{01}k_{02}\rho\omega\cos\psi_0(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02})\times$$

$$\times\Big\{\Phi(L_1H_1\sin\beta_{01}+L_3H_2\sin\beta_{02})-$$

$$-\rho\omega(D_1-D_2)\sin\psi_0-\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\times$$

$$\times\Big[\Phi L_1H_1\cos\beta_{01}+C_1 tg\beta_{01}\rho\omega\sin\psi_0\Big]+$$

$$+\frac{R_2\sin 2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\Big[\Phi L_3H_2\cos\beta_{02}+C_2 tg\beta_{02}\rho\omega\sin\psi_0\Big]\Big\}-$$

$$-\frac{1}{4}k_{01}\Phi(L_1+L_3)\times$$

$$\times\rho\omega\cos\psi_0\left\{\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\times\right.$$

$$\times\Big[(k_{02}+2k_{01})H_1\cos\beta_{01}+k_{01}H_2\cos\beta_{02}\Big]-$$

$$\frac{R_2\sin 2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\times$$

$$\times\Big[k_{01}H_1\cos\beta_{01}+(k_{02}+2k_{01})H_2\cos\beta_{02}\Big]\Big]\Big\}\Big\}; \qquad (3)$$

$$\langle\dot\alpha_2\rangle=\frac{1}{2k_{01}k_{02}(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02})^2}\Big\{\Big\{\ 2k_{01}k_{02}(H_1\cos\beta_{01}+$$

$$+H_2\cos\beta_{02})\Phi\left\{\frac{H_1^2(L_1^2+L_2^2)\Phi\sin 2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\left[1-\frac{R_1\cos^2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\right]-\right.$$

$$-\frac{H_2^2(L_3^2+L_4^2)\Phi\sin 2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\left[1-\frac{R_2\cos^2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\right]-\frac{H_1L_1\rho\omega\sin\psi_0}{2\cos\beta_{01}}\times$$

$$\left.\times\left[1-\frac{2R_1\cos^2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}\right]-\frac{H_2L_3\rho\omega\sin\psi_0}{2\cos\beta_{02}}\left[1-\frac{2R_2\cos^2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right]\right\}-$$

$$-\frac{\Phi}{A_1(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\times$$

$$\times\Big[(k_{01}+2k_{02})H_1\cos\beta_{01}+k_{01}H_2\cos\beta_{02}\Big]\left\{\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\times\right.$$

$$\times H_1\cos\beta_{01}\times$$

$$\times\Big[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-C_1 tg\beta_{01}L_2\rho\omega^2\sin\psi_0\Big]+$$

$$+k_{01}A_1(\beta_{01})(L_1+L_3)\rho\omega\sin\psi_0\ \Big\}+\frac{\Phi}{A_2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\times$$

$$\times\Big[k_{01}H_1\cos\beta_{01}+(k_{01}+2k_{02})H_2\cos\beta_{02}\Big]\left\{\frac{-R_2\sin 2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\times\right.$$

$$\times H_2\cos\beta_{02}\times$$

$$\times\Big[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-C_2 tg\beta_{02}L_4\rho\omega^2\sin\psi_0\Big]+$$

$$+k_{01}A_2(\beta_{02})(L_1+L_3)\rho\omega\sin\psi_0\ \Big\}-\frac{1}{4}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}\times$$

$$\times\Big\{k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)\times$$

$$\times\left[\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{A_1^2(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}+\right.$$

$$\left.+\frac{R_2\sin 2\beta_{02}}{A_2^2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\right]+$$

$$+\frac{2R_1C_1\sin^2\beta_{01}}{A_1^2(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\rho\omega^2\sin\psi_0\times$$

$$\times\Big[C_1 tg\beta_{01}\rho\omega^2\sin\psi_0-2k_{01}\Phi(L_2+L_4)\Big]+$$

$$+\frac{2R_2C_2\sin^2\beta_{02}}{A_2^2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\times$$

$$\times\rho\omega^2\sin\psi_0\Big[C_2 tg\beta_{02}\rho\omega^2\sin\psi_0-2k_{01}\Phi(L_2+L_4)\Big]\ \Big\}-$$

$$-\frac{1}{2}k_{01}^2k_{02}\Phi(B_1-B_2)(L_1+L_3)\rho\omega\cos\psi_0\times$$

$$\times\left[\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}-\frac{R_2\sin 2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right]\Big\}\Big\}, \qquad (4)$$

где $H_1$, $H_2$ – кинетические моменты гироскопов, причем, $\vec{H}_2=-H_1$; $k_{01},k_{02}$ – коэффициенты усиления в цепях обратной связи; $\beta_{01},\beta_{02}$ – углы поворота гироскопов относительно внутренних осей; $R_i, A_i(\beta_{0i})$ – моменты инерции; $\rho,\omega,\psi_0,\varepsilon$ – параметры качки; $B_i, L_i, C_i$ – коэффициенты.

Формулы (4) распространяются также на случай полигармонической качки, если представить ее как сумму колебаний вида:

$$\omega_{2x}=\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\cos(\omega_i t+\varepsilon_i);$$

$$\omega_{2y}=\cos\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\cos(\omega_i t+\varepsilon_i).$$

С учетом сказанного, из выражения (4) окончательно получаем:

$$\langle\dot{\beta}_2\rangle=$$

$$=\frac{1}{2k_{01}k_{02}\left(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02}\right)^2}\Big\{\Big\{k_{01}k_{02}\Phi\left[A_1(\beta_{01})-A_2(\beta_{02})\right]\times$$

$$\left\{\frac{H_1\sin\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}\right.\Big[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-$$

$$\left.-C_1\mathrm{tg}\beta_{01}L_2\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]\times$$

$$\times\left[1-\frac{2R_1\cos^2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}\right]+\frac{H_2\sin\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\Big[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-$$

$$\left.-C_2\mathrm{tg}\beta_{02}L_2\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]\left[1-\frac{2R_2\cos^2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right]-\sin\psi_0\times$$

$$\times\left[\sin\psi_0\left(L_1H_1\cos\beta_{01}-L_3H_2\cos\beta_{02}\right)\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i+k_{01}\left(L_1+L_3\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(\frac{R_1}{A_1(\beta_{01})}-\frac{R_2}{A_2(\beta_{02})}\right)\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\Bigg\}-$$

$$-\frac{R_1\sin2\beta_{01}}{4A_1^2(\beta_{01})}\Big[-k_{02}A_2(\beta_{02})H_1\cos\beta_{01}+$$

$$+\left(2k_{01}+k_{02}\right)A_1(\beta_{01})H_2\cos\beta_{02}\Big]\times$$

$$\times\Big[k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)+$$

$$+C_1^2\mathrm{tg}^2\beta_{01}\sin^2\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i^2\omega_i^2-$$

$$\left.-2k_{01}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}\Phi\left(L_2+L_4\right)\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]-$$

$$-\frac{R_2 2\sin\beta_{02}}{4A_2^2(\beta_{02})}\Big[\left(2k_{01}+k_{02}\right)A_2(\beta_{02})H_1\cos\beta_{01}-$$

$$-k_{02}A_1(\beta_{01})H_2\cos\beta_{02}\Big]\times$$

$$\times\Big[k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)+$$

$$+C_2^2\mathrm{tg}^2\beta_{02}\sin^2\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i^2\omega_i^2-$$

$$\left.-2k_{01}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}\Phi\left(L_2+L_4\right)\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]+$$

$$+k_{01}k_{02}\cos\psi_0\left(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02}\right)\times$$

$$\times\Big\{\Phi\left(L_1H_1\sin\beta_{01}+L_3H_2\sin\beta_{02}\right)-$$

$$-\left(D_1-D_2\right)\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i-\frac{R_1\sin2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\times$$

$$\times\left[\Phi L_1H_1\cos\beta_{01}+C_1\mathrm{tg}\beta_{01}\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\right]+\frac{R_2\sin2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\times$$

$$\times\left[\Phi L_3H_2\cos\beta_{02}+C_2\mathrm{tg}\beta_{02}\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\right]\Big\}\times$$

$$\times\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i-\frac{1}{2}k_{01}\Phi\left(L_1+L_3\right)\times$$

$$\times\cos\psi_0\left\{\frac{R_1\sin2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\times\right.$$

$$\times\left[\left(k_{02}+2k_{01}\right)H_1\cos\beta_{01}+k_{01}H_2\cos\beta_{02}\right]-$$

$$-\frac{R_2\sin2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\times$$

$$\times\left[k_{01}H_1\cos\beta_{01}+\left(k_{02}+2k_{01}\right)H_2\cos\beta_{02}\right]\Big\}\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\Big\}\Big\};\qquad(5)$$

$$\langle\dot{\alpha}_2\rangle=$$

$$=\frac{1}{2k_{01}k_{02}\left(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02}\right)^2}\Big\{\Big\{2k_{01}k_{02}\Phi\big(H_1\cos\beta_{01}+$$

$$+H_2\cos\beta_{02}\big)\left\{\frac{H_1^2\left(L_1^2+L_2^2\right)\Phi\sin2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\left[1-\frac{R_1\cos^2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\right]-\right.$$

$$-\frac{H_2^2\left(L_3^2+L_4^2\right)\Phi\sin2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\left[1-\frac{R_2\cos^2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}\right]-\frac{H_1L_1\sin\psi_0}{2\cos\beta_{01}}\times$$

$$\times\left[1-\frac{2R_1\cos^2\beta_{01}}{A_1(\beta_{01})}\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i-$$

$$\left.-\frac{H_2L_3\sin\psi_0}{2\cos\beta_{02}}\left[1-\frac{2R_2\cos^2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\right\}+$$

$$+\frac{\Phi}{A_2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\left[k_{01}H_1\cos\beta_{01}+\left(k_{01}+2k_{02}\right)H_2\cos\beta_{02}\right]\times$$

$$\times\left\{\frac{-R_2\sin2\beta_{02}}{2A_2(\beta_{02})}H_2\cos\beta_{02}\right.\Big[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-$$

$$\left.-C_2\mathrm{tg}\beta_{02}L_4\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]+$$

$$\left.+k_{01}A_2(\beta_{02})\left(L_1+L_3\right)\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\right\}-$$

$$-\frac{\Phi}{A_1(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\left[\left(k_{01}+2k_{02}\right)H_1\cos\beta_{01}+k_{01}H_2\cos\beta_{02}\right]\times$$

$$\times\left\{\frac{R_1\sin2\beta_{01}}{2A_1(\beta_{01})}\times H_1\cos\beta_{01}\times\right.$$

$$\times\left[k_{01}\Phi\left(L_1^2+L_2^2+L_1L_3+L_2L_4\right)-C_1\mathrm{tg}\beta_{01}L_2\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\right]+$$

$$\left.+k_{01}A_1(\beta_{01})\left(L_1+L_3\right)\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\right\}-\frac{1}{4}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}\times$$

$$\times\Big\{k_{01}^2\Phi^2\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2+L_4^2+2L_1L_3+2L_2L_4\right)\times$$

$$\times\left[\frac{R_1\sin 2\beta_{01}}{A_1^2(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}+H_2\cos\beta_{02}+\right.$$

$$\left.+\frac{R_2\sin^2\beta_{02}}{A_2^2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\right]+\frac{2R_1C_1\sin^2\beta_{01}}{A_1^2(\beta_{01})}H_2\cos\beta_{02}\sin\psi_0\times$$

$$\times\left[C_1\mathrm{tg}\beta_{01}\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2-2k_{01}\Phi\left(L_2+L_4\right)\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2+$$

$$+\frac{2R_2C_2\sin^2\beta_{02}}{A_2^2(\beta_{02})}H_1\cos\beta_{01}\sin\psi_0\times$$

$$\times\left[C_2\mathrm{tg}\beta_{02}\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2-2k_{01}\Phi\left(L_2+L_4\right)\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i^2\Big\}-$$

$$-\frac{1}{2}k_{01}^2k_{02}\Phi\left(B_1-B_2\right)\left(L_1+L_3\right)\cos\psi_0\times$$

$$\times\left[\frac{R_1\sin^2\beta_{02}}{A_1(\beta_{01})}-\frac{R_2\cos^2\beta_{02}}{A_2(\beta_{02})}\right]\sum_{i=1}^{n}\rho_i\omega_i\Big\}\Big\}\quad. \qquad (6)$$

Здесь

$$\Phi=\sin\psi_0\sum_{i=1}^{n}\frac{\rho_i\omega_i}{\omega_i^4\left(b-a\omega_i^2\right)+\left(f-d\omega_i^2\right)};$$

$$L_1=C_1H_1\cos\beta_{01}\mathrm{tg}\beta_{01}\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2\left[A_2(\beta_{02})B_2\omega_i^2-H_2^2\cos^2\beta_{02}\right]+$$

$$+k_{01}k_{02}\times A_1(\beta_{01})H_2\cos\beta_{02}-k_{01}k_{02}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}H_1\cos\beta_{01}+$$

$$+k_{01}k_{02}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}\left(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02}\right);$$

$$L_2=\Big[k_{01}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}+k_{02}A_2(\beta_{02})\times$$

$$\times\left(A_2(\beta_{02})B_2\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2-H_2^2\cos^2\beta_{02}\right)+$$

$$+C_1\mathrm{tg}\beta_{01}k_{02}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}+$$

$$+k_{02}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}A_1(\beta_{01})\times$$

$$\times B_2\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2-k_{01}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}\Big]\sum_{i=1}^{n}\omega_i\ ;$$

$$L_3=C_2\mathrm{tg}\beta_{02}H_2\cos\beta_{02}\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2\left[A_1(\beta_{01})B_1\omega_i^2-H_1^2\cos^2\beta_{01}\right]-$$

$$-k_{01}k_{02}A_1(\beta_{01})H_1\cos\beta_{01}+k_{01}k_{02}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}H_2\cos\beta_{02}+$$

$$+k_{01}k_{02}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}\left(H_1\cos\beta_{01}+H_2\cos\beta_{02}\right);$$

$$L_4=\Big[-k_{01}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}-k_{02}A_2(\beta_{02})\times$$

$$k_{02}A_2(\beta_{02})\times$$

$$\times\left(A_1(\beta_{01})B_1\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2-H_1^2\cos^2\beta_{01}\right)-$$

$$-k_{02}C_2\mathrm{tg}\beta_{02}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}-$$

$$-k_{02}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}A_2(\beta_{02})\times$$

$$\times B_1\sum_{i=1}^{n}\omega_i^2+k_{01}C_1\mathrm{tg}\beta_{01}H_1\cos\beta_{01}H_2\cos\beta_{02}\Big]\sum_{i=1}^{n}\omega_i\ .$$

## 4. Выводы

Проведенные аналитические исследования позволяют установить усредненные во времени уходы свободного гироскопа относительно оси внутренней рамки $<\dot\beta>$ и относительно оси наружной рамки $<\dot\alpha>$ в случае двухкомпонентной гармонической качки фюзеляжа, а также полигармонической качки.

Становится ясным, что возможности двухканальной схемы автокомпенсации влияния углового движения основания достаточно широки. Кроме того, коэффициенты усиления усилителя в цепях общей отрицательной обратной связи существенным образом могут снизить влияние качки основания. Наконец, появление в знаменателе квадрата суммы кинетических моментов практически сводит к нулю дрейф оси гироскопа.

Следует заметить, что в случае вибрирующего основания двухканальная схема позволяет только усреднить влияние внешних помех на гироскоп.

Литература


1. Сайдов, П.И. Теория гироскопов [Текст]: учеб. / П.И. Сайдов. –М.: Высш. шк., 1965. – 378 с.
2. Ткачев, Л.И. Системы инерциальной ориентировки [Текст] / Л.И. Ткачев. – М.: МЭИ, 1973. – 213 с.
3. Фридлендер, Г.О. Инерциальные системы навигации [Текст] / Г.О. Фридлендер. – М.: Физматгиз, 1961. – 435 с.
4. Данилин, В.П. Гироскопические приборы [Текст]: учеб. / В.П. Данилин. – М.: Высш. шк., 1965. – 539 с.
5. Ишлинский, А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст] / А.Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1976. – 671 с.
6. Назаров, Б.И. О погрешностях двухстепенного интегрирующего гироскопа, вызванных колебаниями основания [Текст] / Б.И. Назаров // Изв. вузов. Приборостроение. – 1960. – Т. 3, № 6. – С. 17 – 24.
7. Павловский, М.А. Об автокомпенсации погрешностей гиротахометров при угловой вибрации основания [Текст] / М.А. Павловский, В.Е. Петренко // Доклады АН УССР, Серия А. – 1977. - № 8. – С. 81 – 84.
8. Карачун, В.В. Волновые задачи поплавкового гироскопа [Текст] / В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник; под общ. ред. В.В. Карачуна; МОН Украины. – К.: “Корнейчук”, 2007. – 228 с.