

ЭФФЕКТ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ НА ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ СЕНСОР КИНЕМАТИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. В. Карачун

Доктор технических наук, профессор*

В. Н. Мельник

Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой*

*Кафедра биотехники и инженерии

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: karachun11@i.ua

Розкривається природа виникнення додаткового зсуву нуля вихідного сигналу поплавкового диференційного гіроскопа за льотної експлуатації. Звертається увага на появу систематичної складової зсуву нуля за асинхронної хитавиці фюзеляжу внаслідок ефекту вибірності частот акустичної вібрації поверхні підвісу гіроскопа кутовим рухом апарату

Ключові слова: асинхронна хитавиця, систематичний зсув нуля, диференційний гіроскоп, акустичне випромінювання, похибки

Раскрывается природа появления дополнительного сдвига нуля выходного сигнала поплавкового дифференцирующего гироскопа при летной эксплуатации. Обращается внимание на появление систематической составляющей сдвига нуля при асинхронной качке фюзеляжа вследствие эффекта избирательности частот акустической вибрации поверхности подвеса гироскопа угловым движением аппарата

Ключевые слова: асинхронная качка, систематический сдвиг нуля, дифференцирующий гироскоп, акустическое излучение, погрешности

1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению влияния жестких условий эксплуатационного использования современной ракетно-космической техники на бортовую аппаратуру. Рассматривается одновременное влияние на пилотажно-навигационные инерциальные приборы двух внешних воздействий – углового движения фюзеляжа и проникающего акустического излучения высокой интенсивности. Второе наблюдается, в частности, на открытых стартовых позициях, в режиме преодоления звукового барьера и т.п. Проникая внутрь аппарата, акустическое излучение генерирует вибрацию в механических системах оборудования, которая в совокупности с другими возмущающими факторами может не только ухудшить точностные характеристики, но и в отдельных случаях привести к возникновению локальных особенностей резонансного типа.

2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

Приборы инерциальной навигации в настоящее время остаются самыми надежными и высокоточными. Их характеристики и свойства достаточно глубоко изучены [1, 2]. Разработаны методы повышения точности, в том числе атокомпенсационные, позволяющие

достичь частичной инвариантности гироскопических приборов по отношению к внешнему и внутренним моментам – помехам, инструментальным методическим [3, 4].

Вместе с тем, исследования последних лет убедительно доказали, что современные носители инжектируют такой уровень звуковой энергии, который проникая внутрь, раскачивает механические системы приборов, понижая их точность [5, 6]. Причем, одновременное действие двух возмущающих факторов – кинематического и акустического – приводит к непрогнозируемому эффекту – появлению систематической погрешности прибора при асинхронной качке, когда известно, что только синхронная качка порождает это явление [7, 8, 9, 10].

Целью исследований является анализ возможности появления систематического сдвига нуля гироскопа при асинхронной качке фюзеляжа в полетных условиях.

3. Поплавковый дифференцирующий гироскоп при полетной эксплуатации

Предположим, что имеет место только *асинхронная* качка корпуса летательного аппарата вида

$$\theta(t) = \rho_\theta \sin(v_1 t + \delta_\theta); \psi(t) = \rho_\psi \sin(v_2 t + \delta_\psi);$$

$$\omega_{iy} = \omega_y = v_3 \rho_\phi \cos(v_3 t + \delta_\phi).$$

В этом случае частное решение $\tilde{\beta}_1^k$ уравнения возмущенного движения подвижной части определяется первыми тремя составляющими правой части [5, 6]:

$$\begin{aligned} & \gamma \omega_{1x} - q \omega_{1y} - \dot{\omega}_{1z} = \\ & = v_1 \rho_\theta (r - \omega_0) \cos(v_1 t + \delta_\theta) - \\ & - \rho_\psi (r \omega_0 - v_2^2) \sin(v_2 t + \delta_\psi) - \\ & - q v_3 \rho_\phi \cos(v_3 t + \delta_\phi). \end{aligned}$$

Тогда $\tilde{\beta}_1^k$ отражается соотношением:

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_1^k &= \left[(n^2 - v_1^2)^2 + 4h^2 v_1^2 \right]^{\frac{1}{2}} v_1 \rho_\theta (r - \omega_0) \cos(v_1 t + \delta_\theta - \epsilon_1) - \\ & - \left[(n^2 - v_2^2)^2 + 4h^2 v_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} (r \omega_0 - v_2^2) \rho_\psi \sin(v_2 t + \delta_\psi - \epsilon_2) - \\ & - \left[(n^2 - v_3^2)^2 + 4h^2 v_3^2 \right]^{\frac{1}{2}} q v_3 \rho_\phi \cos(v_3 t + \delta_\phi - \epsilon_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Как следует из приведенного, в выходном сигнале присутствуют периодические составляющие всех трех частот – v_1 , v_2 и v_3 [11, 12].

Теперь рассмотрим одновременное действие качки и акустического излучения. Вычислим частное решение $\tilde{\beta}_1^a$. Последние два слагаемых в правой части уравнения движения имеют вид:

$$\begin{aligned} & -q(\omega_1^a + \omega_2^a - \omega_3^a) + (\dot{\omega}_{v_1}^a - \dot{\omega}_{v_2}^a - \dot{\omega}_{v_3}^a) = \\ & = \frac{1}{2} C_1 \{ v_1 \rho_\theta \cos[(v_1 - \omega_1)t + \delta_\theta] + v_1 \rho_\theta \cos[(v_1 + \omega_1)t + \delta_\theta] - \\ & - \omega_0 \rho_\psi \sin[(v_2 - \omega_1)t + \delta_\psi] + \omega_0 \rho_\psi \sin[(v_2 + \omega_1)t + \delta_\psi] \} + \\ & + \frac{1}{2} C_2 v_3 \rho_\phi \{ \cos[(v_3 - \omega_1)t + \delta_\phi] + \cos[(v_3 + \omega_1)t + \delta_\phi] \} - \\ & - \frac{1}{2} C_3 \{ v_2 \rho_\psi \cos[(v_2 - \omega_1)t + \delta_\psi] + v_2 \rho_\psi \cos[(v_2 + \omega_1)t + \delta_\psi] - \\ & - \omega_0 \rho_\theta \sin[(v_1 - \omega_1)t + \delta_\theta] - \omega_0 \rho_\theta \sin[(v_1 + \omega_1)t + \delta_\theta] \}. \end{aligned}$$

Частные решения $\tilde{\beta}_1^a$ в первом приближении примут вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{15}^a &= \frac{v_1 \rho_\theta}{2} (-qQ_{11} + Q_{41} - Q_{61}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_1 - \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_1 - \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_1 - \omega_1)t + \delta_\theta - \epsilon_{15}]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{16}^a &= \frac{\omega_0 \rho_\theta}{2} q Q_{31} \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_1 - \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_1 - \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \sin[(v_1 - \omega_1)t + \delta_\theta - \epsilon_{16}]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{17}^a &= \frac{v_1 \rho_\theta}{2} (-qQ_{11} + Q_{41} - Q_{61}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_1 + \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_1 + \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_1 + \omega_1)t + \delta_\theta - \epsilon_{17}]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{18}^a &= \frac{\omega_0 \rho_\theta}{2} q Q_{31} \left\{ \left[n^2 - (v_1 + \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_1 + \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \sin[(v_1 + \omega_1)t + \delta_\theta - \epsilon_{18}]; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{19}^a &= \frac{-\omega_0 \rho_\psi}{2} (-qQ_{11} + Q_{41} - Q_{61}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_2 - \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_2 - \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \sin[(v_2 - \omega_1)t + \delta_\psi - \epsilon_{19}]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{20}^a &= \frac{-v_2 \rho_\psi}{2} q Q_{31} \left\{ \left[n^2 - (v_2 - \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_2 - \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_2 - \omega_1)t + \delta_\psi - \epsilon_{20}]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{21}^a &= \frac{-v_2 \rho_\psi}{2} q Q_{31} \left\{ \left[n^2 - (v_2 + \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_2 + \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_2 + \omega_1)t + \delta_\psi - \epsilon_{21}]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{22}^a &= \frac{\omega_0 \rho_\psi}{2} (-qQ_{11} + Q_{41} - Q_{61}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_2 + \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_2 + \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \sin[(v_2 + \omega_1)t + \delta_\psi - \epsilon_{22}]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{23}^a &= \frac{v_3 \rho_\phi}{2} (qQ_{21} - Q_{51} - Q_{71}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_3 - \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_3 - \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_3 - \omega_1)t + \delta_\phi - \epsilon_{23}]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_{24}^a &= \frac{v_3 \rho_\phi}{2} (qQ_{21} - Q_{51} - Q_{71}) \times \\ & \times \left\{ \left[n^2 - (v_3 + \omega_1)^2 \right]^2 + 4h^2 (v_3 + \omega_1)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & \times \cos[(v_3 + \omega_1)t + \delta_\phi - \epsilon_{24}]. \end{aligned} \quad (11)$$

Систематические составляющие, как видно, могут появиться в величинах $\tilde{\beta}_{15}^a, \tilde{\beta}_{16}^a, \tilde{\beta}_{19}^a, \tilde{\beta}_{20}^a, \tilde{\beta}_{23}^a$ при совпадении значений частот v_1, v_2 или v_3 с частотой акустического излучения ω_1 [12]. Остальные пополняют спектр периодических составляющих. Таким образом, при асинхронной качке летательного аппарата звуковое излучение, проникающее внутрь приборного отсека, может привести к дополнительным погрешностям [13]. Происходит, своего рода, избирательность частот генерируемой в подвесе акустической вибрации.

Представляет практический интерес анализ природы появления систематического *сдвига нуля* у поплавкового гироскопа под действием проникающего акустического излучения.

Для этого следует принять величину измеряемой угловой скорости ω_0 равной нулю, соответствующий ей угол поворота подвижной части β_0 также положить равным нулю, т.е. обеспечить выполнение условий

$\omega_0 = 0; \beta_0 = 0.$

Тогда получаем [6]:

$$(\tilde{\beta}_1^a)_{\text{сист.}} = \frac{\tilde{\beta}_{11}^a}{2n^2} = \frac{v \cos \epsilon_{11}}{2n^2} \times \left[C_1 \rho_\theta + \rho_\phi (qQ_{21} - Q_{51} - Q_{71}) - \rho_\psi qQ_{31} \right], \tag{12}$$

причем

$$C_1 = -qQ_{11} + Q_{41} - Q_{61}; q = \frac{H}{B};$$

$$Q_{11} = \frac{4\pi h I_z \omega_1 a_1^{(1)}}{HR_0}; Q_{41} = \frac{8h I_z \omega_1^2 c_1^{(1)}}{3HR_0};$$

$$Q_{61} = \frac{8h I_z \omega_1^2 b_1^{(1)}}{3HR_0}; Q_{21} = \frac{4\pi h I_z \omega_1 a_1^{(2)}}{HR_0};$$

$$Q_{51} = Q_{41}; Q_{71} = \frac{8h I_z \omega_1^2 b_1^{(2)}}{3HR_0}; Q_{31} = \frac{8h I_z \omega_1' c_1^{(2)}}{HR_0}; n^2 = \frac{c}{B}.$$

Окончательно, сдвиг нуля определяется выражением

$$(\tilde{\beta}_1^a)_{\text{сист.}} = \langle \tilde{\beta}_{11}^a \rangle = \left\langle \frac{4v h I_z \cos \epsilon_{11}}{3c R_0} \left[\rho_\theta \left(-6\omega_1 a_1^{(1)} + \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(1)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(1)} \right) + \rho_\phi \left(6\omega_1 a_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(2)} \right) - 3\rho_\psi \omega_1' c_1^{(2)} \right] \right\rangle, \tag{13}$$

$$\omega_1 = v; v + \pi; v + 2\pi; v + 3\pi, \dots, \omega_1 = v + \ell_1 \pi (\ell_1 = 0, 1, 2, \dots);$$

$$\omega_1' = v - \frac{1}{2}\pi; v + \frac{1}{2}\pi; v + \frac{3}{2}\pi; v + \frac{5}{2}\pi; \omega_1' = v + (-1 + \ell_2) \frac{\pi}{2},$$

$$(\ell_2 = 0, 2, 4, 6, \dots).$$

4. Выводы

Таким образом, не только синхронная, но и асинхронная качка фюзеляжа могут быть причиной появления систематического сдвига нуля прибора при летной эксплуатации.

И если синхронная качка сама по себе порождает сдвиг нуля, то асинхронная – только при наличии акустического нагружения механических систем приборов.

Литература

1. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст]: моногр. / А. Ю. Ишлинский - М.: Наука, 1976. – 671 с.
2. Пельпор, Д. С. Гироскопические приборы систем ориентации и стабилизации [Текст]: моногр. / Д. С. Пельпор, Ю.А. Осокин, Е.Р. Рахтеенков. МВТУ им. Н. Батмана. - М.: Наука, 1977. – 219 с.
3. Одинцов, А. А. Компенсационные гиротахометры [Текст]: Уч. пособ./ - К: Изд-во КПИ, 1970. – 170 с.
4. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем [Текст]: монография / С.М. Зельдович, М.И. Малтинский, И.М., Окон Я.Г. Остромухов. – Л.: Судостроение, 1976. – 183с.
5. Карачун, В.В. Рухомі міражі [Текст]: моногр./ В.В. Карачун, В.М. Мельник; Нац. техн. ун-т України «КПІ». –К.: «Корнійчук», 2009. – 136с. –Бібліогр.: с. 135-136. - ISBN 978-966-7599-58-4.
6. Карачун, В.В. Задачі супроводу та маскування рухомих об'єктів [Текст]: моногр./ В.В. Карачун, В.М. Мельник; Нац. техн. ун-т України «КПІ». –К.: «Корнійчук», 2011. – 264с. –Бібліогр.: с. 261-263. - ISBN 978-966-7599-58-4.
7. Арутюнов, С.С. К вопросу о погрешностях двухстепенного интегрирующего гироскопа, вызванных угловыми колебаниями основания [Текст] / С.С. Арутюнов // Изв. Вузов. Приборостроение, 1960. – Т.3, №3 – С. 32-36.
8. Karachun, V.V. Vibration of a plate under an acoustic load [Текст]/ V.V. Karachun // Engineering, Technology Applied Science; PA, USA, T 20 (37). 1989. –с. 271-275.
9. Karachun, V.V. About the Influence of Acoustic Influence to the Equipment of Space Apparatus Complex [Текст]/ V.V. Karachun // Proceeding of Fourth Ukraine-Russia-China simposium on space science and technology. 1996. - p. 720.
10. Karachun, V.V. Resilient interation of external acoustical emission with mechanical systems of management devices. [Текст]/ V.V. Karachun, V.V. Yankovoj, E.R. Potapova// Ankara International Aerospace conference. 1996. – с. 217-220.
11. Melnik, V.N. Nonstationary Problem of Acoustic Radiation Interaction with Polyphase Systems of Carriers [Текст]/ V.N. Melnik, E.R. Potapova, V.V. Karachun, A.B. Astapova// HEADS OF THE REPORT. THE FIFTH SINO-RUSSIAN-UKRAIN SIMPOSIUM ON SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY Held Jointly With THE FIRST INTERNATIONAL FORUM ON ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS. 6th-9th June, 2000. Harbin, P.R.China. p. 350-355.
12. Melnik, V.N. Some Aspects of the Gyroscopic Stabilization in Acoustic fields [Текст]/ V.N. Melnik, V.V. Karachun// Int. Appl. Mech. – 2002. – 38, № 1. – 74-80.
13. Karachun, V.V. Vibration of Porous Plates under the Action Acoustic [Текст]/ V.V. Karachun// SOVIET APLIED MECHANICS, 1987. – T 22 (3). – 236-238.