

УДК 629.7.054

Проводиться аналіз ступеню впливу гаусової кривизни підвісу поплавкового гіроскопа на зменшення похибки приладів при льотній експлуатації. Розрахункова модель підтверджує доцільність переходу до ненульової гаусової кривизни підвісу гіроскопа і окреслює ступінь ефективності цього переходу в жорстких умовах гіперзвукових швидкостей

Ключові слова: похибка вимірювань, ненульова гаусова кривизна, N-хвиля

Проводится анализ степени влияния гауссовой кривизны подвеса поплавкового гироскопа на уменьшение погрешности приборов при летной эксплуатации. Расчетная модель подтверждает целесообразность перехода к ненулевой гауссовой кривизне подвеса гироскопа и очерчивает степень эффективности этого перехода в жестких условиях гиперзвуковых скоростей

Ключевые слова: погрешность измерений, ненулевая гауссовая кривизна, N-волна

ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА ПРИ ДЕЙСТВИИ N-ВОЛНЫ

В. В. Карачун

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

Контактный тел.: (044) 454-94-51

E-mail: karachun11@i.ua

В. Ю. Шибецкий

Ассистент*

Контактный тел.: (044) 454-94-51

E-mail: karachun11@i.ua

*Кафедра биотехники и инженерии

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

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

1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению воздействия мощной ударной N-волны на подвес сенсоров ГСП, при эксплуатации гиперзвуковых летательных аппаратов. Несомненный интерес представляет анализ пассивных методов снижения величины погрешности измерений, обусловленной дифракцией N-волны на подвесе, и наиболее простым, с точки зрения конструкции, может считаться переход подвеса гироскопа из нулевой гауссовой кривизны к подвесу с ненулевой гауссовой кривизной, например, в виде катеноида.

2. Анализ состояния проблемы и постановка задач исследований

Проблема создания качественного и надежного навигационного оборудования (навигаторов) является одной из важнейших составляющих боевого обеспечения, в частности, для автономного позиционирования, а ее решение, таким образом, становится чрезвычайно актуальной.

Невзирая на стремительное развитие альтернативных средств навигации, в частности спутниковых радионавигационных систем, инерциальные навигационные системы не потеряли своих позиций и оста-

ются, в определенном смысле, самыми надежными на движущихся объектах различного класса [1].

Существенной особенностью и бесспорным преимуществом инерциальных навигационных систем является их автономность.

На точность инерциальных навигационных систем влияет вибрация, угловое движение аппарата, проникающее акустическое излучение высокой интенсивности, тепловой факел, и другие внешние факторы.

Среди прочих «опасных» внешних факторов, которые влияют на гироскопические сенсоры, наименее изученными являются акустические поля, действие которых существенно влияет на бортовую аппаратуру при летной эксплуатации [2]. Особенно это проявляется в гиперзвуковых летательных аппаратах, которые во время набора скорости неоднократно подвергаются акустическому удару.

Доказано, что при пространственном воздействии на подвес проникающего акустического излучения высокой интенсивности, механические системы в кокойто момент времени переходят в разряд *импедансных*, а возникающее упруго-напряженное состояние подвеса гироскопа воспринимается прибором как полезный сигнал, на самом деле, будучи *ложным* [3].

Естественно возникает вопрос об уменьшении уровня влияния этого воздействия.

Целью исследований является оценка степени эффективности конструкций с ненулевой гауссовой кривизной при подавлении влияния дифракционных

явлений, и, как следствие, уменьшении погрешности измерений.

3. Систематическая погрешность измерений ДУС при технической реализации подвеса гироскопа как поверхности с ненулевой гауссовой кривизной

Подвес поплавкового двухстепенного гироскопа в виде классического кругового цилиндра имеет тот очевидный недостаток, что в плоскости шпангоута радиальные упругие перемещения поверхности под действием акустической волны существенно превышают величины упругих перемещений в двух других направлениях. Особенно ярко это прослеживается в направлении радиуса оболочки и, как следствие, ее большая подверженность действию акустического излучения, в виде возникающих нелинейных колебаний.

Выходом из сложившейся ситуации может служить переход к ненулевой гауссовой кривизне подвеса, например, в виде *катеноида*.

Погрешность измерений прибора содержит две составляющие – систематическую и периодическую. Первая представляет наибольшую опасность, так как соответствует *ложной* угловой скорости, в то время как вторая может быть существенно уменьшена известными техническими решениями [2].

Систематическая составляющая погрешности определяется известной формулой [4], полученной для классического цилиндра:

$$\Delta\omega^a = \frac{4vhI_z \cos \varepsilon_{11}}{3R[H(1+N_1)+B(N_2+N_3)]} \times$$

$$\times \left[\rho_0 \left(-6\omega_1 a_1^{(1)} + \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(1)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(1)} \right) \right. \quad (1)$$

$$\left. + \rho_\varphi \left(-6\omega_1 a_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 c_1^{(2)} - \frac{B}{H} \omega_1^2 b_1^{(2)} \right) - 3\rho_\psi \omega_1' c_1^{(2)} \right],$$

где $\omega_1 = v + \ell_1 \pi$, $\ell_1 = 0, 1, 2, \dots$;

$$\omega_1' = v + (-1 + \ell_2) \frac{\pi}{2}, \quad (\ell_2 = 0, 2, 4, 6, \dots);$$

$$N_1 = \frac{4\pi I_z \omega_1}{HR} a_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin z; N_2 = \frac{8I_z \omega_1^2}{3HR} c_1^{(1)} z^4 (1-z)^4 \cos z;$$

$$N_3 = \frac{8I_z \omega_1^2}{3HR} b_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin z.$$

Радиус R образующей поверхности подвеса с ненулевой гауссовой кривизной определяется зависимостью:

$$R = R_0 - \delta \sin \pi z, \quad (2)$$

где R_0 – радиус цилиндра с нулевой гауссовой кривизной, δ – прогиб образующей в среднем шпангоуте, z – безразмерная координата вдоль протяжности подвеса.

Количественный анализ влияния гауссовой кривизны подвеса гироскопа на уменьшение погрешности

приборов проводился для следующих значений основных параметров:

$$c = 0,12 \text{ Нм}; B = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс}^2; H = 0,2093 \text{ Нмс};$$

$$E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2 \quad \nu = 0,32; h = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}; L = 0,06 \text{ м};$$

$$R_0 = 0,02 \text{ м}; \rho = 2,7 \cdot 10^3; P_{10} = 0,7 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{\pi}{6} \text{ рад}; A = 0,7; B = 0,3; I_z = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс}^2;$$

$$\nu_1 = 0,5 \text{ с}^{-1}; \rho_\varphi = \rho_\theta = \rho_\psi = \frac{\pi}{36} \text{ рад}; n = 34,5;$$

$$\delta = 0,1 \cdot 10^{-3} \dots 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м, шаг } 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Полученные данные были разделены на две категории: I – максимальное абсолютное значение погрешности меньше или равно $0,6 \text{ град с}^{-1}$; II – максимальное абсолютное значение погрешности больше $0,6 \text{ град с}^{-1}$. Значение $0,6 \text{ град с}^{-1}$ принято как ориентир по результатам стендовых испытаний.

В первую категорию попадают следующие значения величины прогиба образующей в среднем шпангоуте δ : $0,1 \cdot 10^{-3}$; $0,2 \cdot 10^{-3}$; $0,3 \cdot 10^{-3}$; $0,5 \cdot 10^{-3}$; $0,6 \cdot 10^{-3}$; $0,8 \cdot 10^{-3}$; $1,0 \cdot 10^{-3}$; $1,3 \cdot 10^{-3}$; $1,4 \cdot 10^{-3}$; $1,7 \cdot 10^{-3}$; $1,9 \cdot 10^{-3}$; $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

В этой категории оптимальными значениями δ можно считать $0,1 \cdot 10^{-3}$ и $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Все остальные варианты, хотя и дают уменьшение погрешности, но ее максимальное значение, все же, остается достаточно высоким.

При величине прогиба $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (рис. 1, а), наблюдается снижение погрешности на всех частотах. Ее максимальное абсолютное значение, на частоте 580 Гц, составляет $0,32 \text{ град с}^{-1}$. Кроме этого наблюдается еще два значения, которые превышают порог чувствительности: на частоте 505 Гц значение погрешности достигает $(-0,14 \text{ град с}^{-1})$, а на частоте 510 Гц – $0,2 \text{ град с}^{-1}$.

В диапазоне высоких и низких частот погрешность практически не наблюдается.

В отличие от предыдущего значения, при прогибе в $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (рис. 1, б), полное отсутствие погрешности наблюдается в среднем диапазоне частот, а пики находятся на высоких и низких частотах. Максимальная величина погрешности составляет $(-0,32 \text{ град с}^{-1})$ на частоте 280 Гц. На частоте 250 Гц приобретает значение $0,16 \text{ град с}^{-1}$, а на частоте 850 Гц – $(-0,15 \text{ град с}^{-1})$.

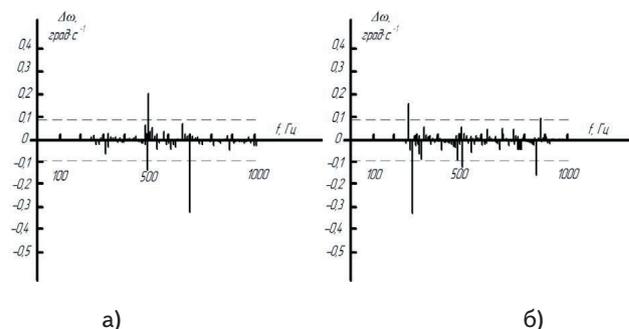


Рис. 1. Расчетная систематическая погрешность ДУС с ненулевой гауссовой кривизной подвеса под действием N-волны: а) $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; б) $\delta = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Пунктирная линия отмечает порог чувствительности прибора

На рис. 1 пунктирной линией ограничен порог чувствительности прибора ДУСУ2 – 6АС, который составляет $0,09 \text{ град } \text{с}^{-1}$. Для других приборов порог чувствительности может отличаться. Так например, для датчика ДУСУ2 – 30А он составляет $0,45 \text{ град } \text{с}^{-1}$, и в этом случае расчетная погрешность не будет иметь акустической составляющей.

Во второй категории прогиб δ принимает следующие значения:

$$0,4 \cdot 10^{-3}; 0,7 \cdot 10^{-3}; 0,9 \cdot 10^{-3}; 1,1 \cdot 10^{-3}; \\ 1,2 \cdot 10^{-3}; 1,5 \cdot 10^{-3}; 1,6 \cdot 10^{-3}; 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для этой категории характерно резкое увеличение значения погрешности на резонансных частотах. Максимальное значение ($-5,1 \text{ град } \text{с}^{-1}$) достигается на частоте 380 Гц при прогибе $\delta = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Для более детального анализа, прогиб δ изменялся в диапазоне $0,1 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с шагом $0,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

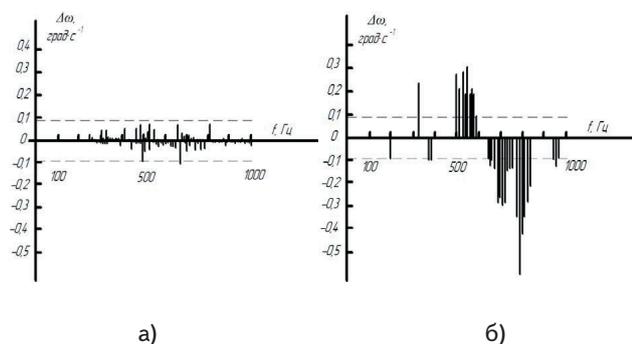


Рис. 2. Погрешность ДУС в акустическом поле: а) расчетная, при ненулевой гауссовой кривизне ($\delta = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); б) стендовая, в акустической камере. Пунктирная линия отмечает порог чувствительности прибора

Полученные результаты, в свою очередь, можно разделить на две категории: I - максимальное аб-

солютное значение погрешности меньше или равно $0,6 \text{ град } \text{с}^{-1}$; II - максимальное абсолютное значение погрешности больше $0,6$.

В первую категорию можно отнести следующие значения δ : $0,11 \cdot 10^{-3}$; $0,12 \cdot 10^{-3}$; $0,13 \cdot 10^{-3}$; $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

В ней просматривается оптимальный вариант технической реализации подвеса с ненулевой гауссовой кривизной, т. е. при значении $\delta = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (рис. 2а).

Во вторую категорию попадают следующие варианты технической реализации подвеса δ : $0,14 \cdot 10^{-3}$; $0,15 \cdot 10^{-3}$; $0,16 \cdot 10^{-3}$; $0,18 \cdot 10^{-3}$; $0,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Для этой категории максимальное значение погрешности составляет $4,8 \text{ град } \text{с}^{-1}$ при частоте 720 Гц и прогибе $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

4. Выводы

Приведенные результаты подтверждают исходные предположения об уменьшении погрешностей измерений в случае задания поверхности поплавкового подвеса в виде катеноида.

Показано, что при этом имеет место более низкая насыщенность спектра, а максимальные значения существенно снижены по сравнению со стендовыми испытаниями.

Оптимальным значением прогиба в среднем шангоуте является величина $0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, при которой максимальная погрешности измерений не превышает $0,1 \text{ град } \text{с}^{-1}$, при пороге чувствительности в $0,09 \text{ град } \text{с}^{-1}$. Обращается внимание, что при некоторых значения прогиба погрешность измерений не только не снижается, но и наоборот, имеет тенденцию к увеличению, и может достигать даже значения $5,1 \text{ град } \text{с}^{-1}$.

Литература

- Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст] / Ин-т проблем механики Российской акад. наук. – М.: Наука, 1976. – 671 с. – Библиогр.: с. 661-666.
- Карачун, В.В. Дифракция звуковых волн на подвесе гироскопа / В.В.Карачун, В. Г. Лозовик, В. Н. Мельник; Нац. техн. ун-т Укр. «КПИ». – К.: «Корнейчук», 2000. – 176с. – Библиогр.: с.153-155.
- Шендеров, Е. Л. Прохождение звуковой волны через упругую цилиндрическую оболочку [Текст] // Акустический журнал. – 1963. – 9. – Вып. 2. – С. 47-49.
- Карачун, В.В. Задачі супроводу та маскування рухомих об'єктів [Текст] / В. В. Карачун, В. Н. Мельник; Нац. техн. ун-т Укр. «КПИ». – К.: «Корнейчук», 2011. – 263 с. – Библиогр.: с. 261-263.

Abstract

This article analyses the possibility of employment of floated-type gyroscope suspension with nonzero total curvature. It is regarded as a method of passive reduction of measurement error influenced by the powerful shock wave. The surface of suspension is represented by catenoid. The radius of the shell part changes along the sinusoid $\delta \sin(\pi z)$ at $z \in [0, 1]$, where is generatrix deflection in the middle bulkhead. The value of δ changes within the limits of $0,1 \cdot 10^{-3} - 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. The quantitative analysis gave an opportunity to choose the optimal value of generatrix deflection $\delta = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, where the systematic error does not exceed $(-0,1 \text{ г } \text{с}^{-1})$. The estimated error confirms the reduction of error below bench test data. This means that the suspension with nonzero total curvature allows to reduce the influence of powerful shock waves on the sensitive elements of gyro-stabilized platform. The data obtain may be used while designing the floated-type gyroscope for flying in hypersonic speed conditions

Keywords: measurement error, nonzero total curvature, N-wave