

Здійснюється аналіз пружних переміщень поверхні кожуха триступеневого гіроскопа в акустичному середовищі. В рамках двовимірної задачі визначаються кількісні і якісні характеристики збуреного стану поверхні

Ключові слова: *гіроінтегратор, кожух, підвіс, акустичне випромінювання*

Проведен анализ упругих перемещений поверхности кожуха трехступенного гироскопа в акустической среде. В рамках двумерной задачи определяются количественные и качественные характеристики возмущенного состояния поверхности

Ключевые слова: *гироинтегратор, кожух, подвес, акустическое излучение*

The analysis of the resilient moving of surface of casing of three-segdate gyroscope is conducted in an acoustic environment. Within the framework of two-dimensional task, quantitative and high-quality descriptions of the perturbative state of surface are determined

Keywords: *integrating gyro, case, gimbal, acoustic radiation*

ІНЖЕКЦІЯ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РАКЕТНИМИ ДВИГУНАМИ І РОЗВИТОК ПРУЖНО-НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІДВІСУ

О.Я. Ковалець

Ассистент

Кафедра біотехніки та інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Контактний тел.: (044) 454-94-51

E-mail: karachun1@gala.net

Вступ

Дослідження стосуються області прикладної механіки і присвячені вивченню пружно-напруженого стану підвісу гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень в умовах експлуатаційного використання літальних апаратів мобільного базування як однієї з причин появи додаткових похибок вимірювань прискорень ракет-носіїв при вирішенні задач ближнього космосу.

Стендові і теоретичні дослідження підтверджують думку щодо впливу просторового хвильового впливу циклічної структури на елементну базу підвісу у вигляді виникаючих коливань поверхні, які в сукупності з кінематичним збуренням з боку основи слугують появі додаткових похибок вимірювань.

Аналіз стану проблеми і постановка задачі досліджень

Головне призначення гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень обумовлене його використанням в балістичних ракетах для формування сигналу відключення двигунів [1]. Інжектуюме в навколишнє середовище акустичне випромінювання звукової частоти великого рівня (вище за 150дБ), генерує в механічних системах приладів керування безліч форм коливань, в тому числі і резонансних [2]. У своїй сукупності, вони чинять вплив не тільки на точності характеристики інерціального обладнання, але певною мірою погіршують тактико-технічні характеристики носіїв

[3]. Просторовий характер акустичного впливу, окрім іншого, породжує нове джерело похибок вимірювань – це парусність підвісу [4]. Таким чином, окреслюється певна актуальність аналізу природи вивчаємого явища і визначення шляхів усунення його впливу.

Метою досліджень слугує визначення закономірностей збуреного стану підвісу гіроскопа в акустичних полях, його кількісна оцінка і координатні функції пружних переміщень поверхні під дією акустичного випромінювання.

3. Нестационарна пружність кожуха гіроскопа в акустичних полях

Вивчення особливостей динаміки гіроскопічних приладів, що експлуатуються в умовах впливу зовнішнього аеродинамічного шуму звукової частоти, дає змогу стверджувати про тенденцію до накопичення похибки вимірів. Так, прилади орієнтирних напрямків, що не коректуються та базуються на використанні властивостей триступеневого астатичного гіроскопа, мають систематичний дрейф осі фігури і за тривалої дії звукового випромінювання високої інтенсивності (вище за 140 децибел) можуть призвести навіть до втрати одного ступеня вільності.

Причиною цього явища є нестационарна пружна взаємодія підвісу гіроскопа з акустичним полем, що проявляється у вигляді додаткових збурюючих моментів інерційної природи, які виникають і

обумовлені наявністю кінематичного впливу з боку основи – ракети-носія.

Найбільш вразливим елементом підвісу у даному випадку виявляється кожух гіроскопа. Пружні переміщення його поверхні під дією падаючої хвилі тиску являють собою суперпозицію різних форм нелінійних коливань, що у своїй сукупності призводять до суттєвої зміни динамічного режиму приладу.

Проаналізуємо характер пружних переміщень циліндричної частини кожуха у площині шпангоута і обмежимося тільки радіальними складовими як найбільш суттєвими у кількісному та якісному вимірі.

За умови шарнірного з'єднання з торцевими поверхнями та незвичайної товщини стінок, диференціальні рівняння пружної поверхні наведемо у вигляді:

$$\omega^2 \rho V + \frac{\partial^2 V}{\partial \beta^2} - \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0; \quad \omega^2 \rho V + \frac{\partial V}{\partial \beta} + c^2 \left(\frac{1}{R^4} \frac{\partial^4 W}{\partial \beta^4} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial^4 W}{\partial z^2 \partial \beta^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial z^4} \right) + W = F(z, \beta, t), \quad (1)$$

де $c^2 = h^2(12R^2)^{-1}$ - коефіцієнт; h, R - товщина та радіус циліндричної поверхні кожуха; $V = V(z, \beta, t)$ та $W = W(z, \beta, t)$ - відповідно тангенціальна і радіальна складові переміщення точок бокової поверхні (рис.1); $0 < z < L$; $0 \leq \beta \leq 2\pi$ - центральний кут; L - довжина.

Граничні умови задамо у вигляді:

$$\begin{aligned} V|_{z=0} = V|_{z=L} = 0; \quad W|_{z=0} = W|_{z=L} = 0; \\ \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \Big|_{z=0} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \Big|_{z=L} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Задамо звуковий тиск у падаючій хвилі наступним чином (рис. 2):

$$F(z, \beta, t) = P = P_0 \exp i[\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r}], \quad (3)$$

де P_0 - тиск, що дорівнює різниці падаючої та випромінюваної поверхнею хвиль; $\vec{k}_0 = \vec{n} \frac{\omega}{c_0}$ - хвильовий вектор; c_0 - швидкість звуку; \vec{n} - одиничний вектор напрямку розповсюдження хвиль; \vec{r} - радіус-вектор точки простору.

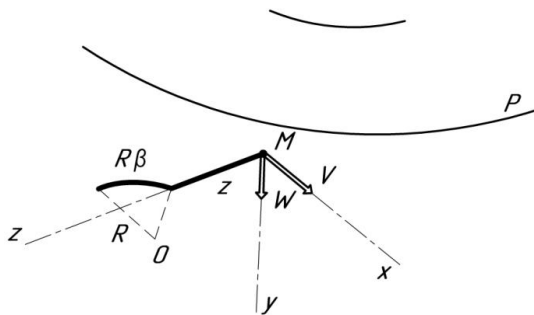


Рис. 1. Дифракція акустичних хвиль на пружній поверхні оболонкової частини підвісу

Отже, приймаючи до уваги прийняті на схемі позначення, маємо:

$$P = P_0 \exp i \left[\omega t - k_0 (x \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + R \sin \beta \sin \epsilon_1 \cos \epsilon_2 + R \cos \beta \cos \epsilon_1) \right]. \quad (4)$$

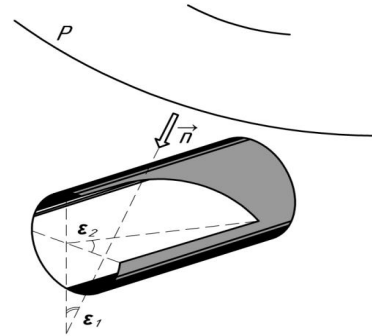


Рис. 2. Механізм дії плоскої хвилі надлишкового тиску звукової частоти

Розв'язок системи рівнянь (1) і (2) знайдемо у вигляді рядів Фур'є функцій $V = V(z, \beta, t)$ та $W = W(z, \beta, t)$ у прямокутнику:

$$\Pi = \{(z, \beta) \quad 0 < z < L; \quad 0 \leq \beta \leq 2\pi\}. \quad (5)$$

Відповідно до прийнятих граничних умов, ряд Фур'є за зміною z будується у вигляді:

$$\begin{aligned} V(z, \beta, t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn}(t) \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right); \\ W(z, \beta / t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}(t) \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right); \end{aligned} \quad (6)$$

де m, n - числа напівхвиль;

$$\begin{aligned} V_{mn} &= -im \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}}; \quad W_{mn} = \left[\omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}}; \\ F_{mn} &= l_{mn} P_0 \exp(i\omega t); \\ l_{mn} &= \frac{2n\pi [1 - (-1)^n]}{(n\pi)^2 - (k_0 L)^2} \times \\ &\times \frac{\exp i[-2\pi k_0 R (\sin \beta \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + \cos \beta \cos \epsilon_1)] - 1}{2\pi [k_0 R (\sin \beta \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + \cos \beta \cos \epsilon_1) + m]}; \\ k_0 L &\neq n\pi; \quad k_0 R (\sin \beta \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_2 + \cos \beta \cos \epsilon_1) \neq -m; \\ \Delta_{mn} &= m^2 + \left[\omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \times \\ &\times \left\{ (\omega^2 \rho + 1) + c^2 \left[\left(\frac{m}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \right\}. \end{aligned}$$

Кількісний аналіз проведемо для наступних рівнів параметрів: $P_0 = 70 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$, що відповідає 140 дБ; $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 15$ град; $R = 0,02 \text{ м}$; $k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{\omega}{330} \text{ м}^{-1}$; $\sigma = 0,32$; $\rho = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-4}$; $L = 0,06 \text{ м}$; $c^2 = \frac{h^2}{12R^2} = 2 \cdot 10^{-4}$; $h = 10^{-3} \text{ м}$; $\omega = 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

$\omega = 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Очевидно, що радіальні переміщення W включають в себе тільки непарні n -форми, а m -форми та « m »-форми будуть однакові.

Максимальні прогини у площині шпангоута спостерігається на нижчих формах у середині кожуха ($z = \frac{L}{2}$) і становить близько 4,591 мкм за заданих умов акустичного навантаження.

Збільшення номера m призводить до прогнозованої зміни конфігурації поперечного перерізу: за $m=0$ кількість напівхвиль дорівнює нулю (рис. 3, а), за $m=1$ ця кількість визначається одиницею (рис. 3, б), відповідно для $m=2$ (рис. 3, в) та $m=3$ (рис. 3, г) кількість напівхвиль відповідає номеру m . Звісна річ, мова йде про лицьову поверхню. В області акустичної тіні слухні ті ж самі висновки.

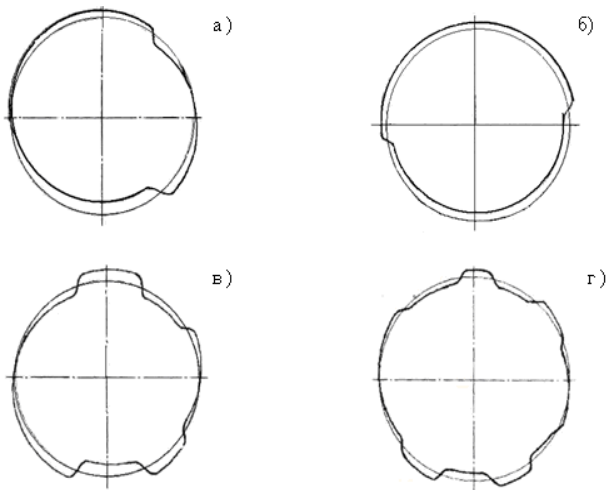


Рис. 3. Поперечні тп-форми: а) $\tau=0$; $n=1$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; б) $\tau=1$; $n=1$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; в) $\tau=2$; $n=1$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; г) $\tau=1$; $n=3$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$

Параметр n визначає кількість напівхвиль згину у поздовжньому перерізі. Так, за $m=0$ (рис. 4, а) або $m=1$ (рис. 4, б) вздовж бічної поверхні кожуха мають місце форми, що містять відповідно $n=3$ – три напівхвилі згину.

Отже, за наявності визначеного згинного руху циліндричної поверхні внутрішньої рамки гіроскопа та кутового руху основи, тобто ракети-носія, можна стверджувати, що з'являться сили інерції Коріолоса, а також моменти цих сил, які призведуть до дрейфу головної осі. Зазначимо, що цей рух може мати як систематичну, так і періодичну складові, або їх сукупність.

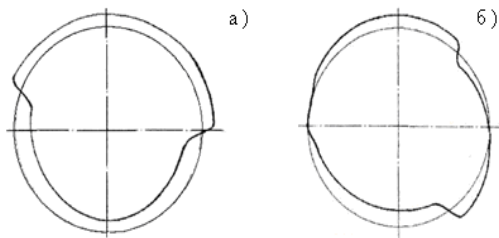


Рис. 4. Поперечні тп-форми: а) $\tau=0$; $n=3$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$; б) $\tau=1$; $n=3$; $\omega=3 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$

Таким чином, пружна податливість підвісу гіроскопа буде слугувати додатковим джерелом похибок вимірів і повинна відповідним чином визначена.

Диференціальні рівняння (1) пружної поверхні циліндричної частини кожуха дозволяють провести кількісну і якісну оцінку вимушених пружних переміщень W та V поверхні в площині шпангоута нижні форми котрих наведені на рис. 5, 6 та визначити резонансні частоти поверхні в акустичному середовищі.

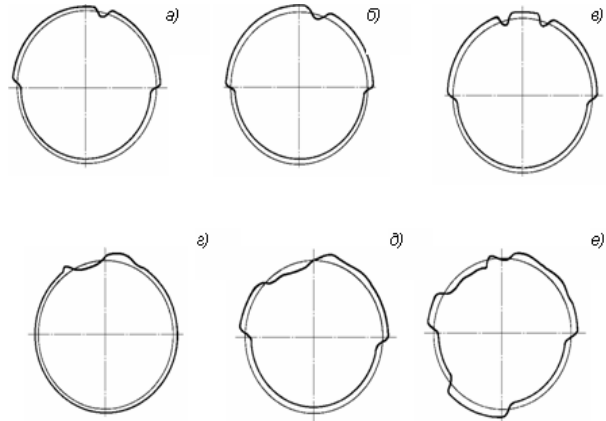


Рис. 5. Поперечні форми :а) $w=1 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$; б) $w=2 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$; в) $w=3 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$; г) $w=4 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$; д) $w=5 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$; е) $w=6 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$

$$\omega^p = (2\rho)^{\frac{1}{2}} \left\{ \left[-\frac{h^2}{12R^2} \left[\left(\frac{m}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] + \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + m^2 - 1 \pm \sqrt{\frac{h^2}{12R^2} \left[\left(\frac{m}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] + \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2} \right]^2 \times \left[\frac{h^2}{12R^2} \left[\left(\frac{m}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] + \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + m^4 + 3 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Радіальні переміщення W значно перевищують тангенціальні V (приблизно на 7...8 порядків) і, отже, більш суттєво впливають на динаміку гіроскопа ($W_{\max} \approx 4 \text{ мкм}$, $V_{\max} \approx 1,9 \cdot 10^{-8}$).

З іншого боку, зовнішня акустична хвиля, а точніше її антисиметрична складова, взаємодіючи з абсолютно твердим підвісом, також призведе до виникнення збуджуючих моментів відносно вісей підвісу.

Цей факт обумовлений наявністю геометричної асиметрії рамок, тобто парусністю (рис. 7), і наводить на думку щодо необхідності усунення цієї конструкторсько-технологічної вади.

Таким чином, дифракція звукових хвиль на абсолютно твердій і пружній податливій поверхні підвісу у своїй сукупності призведе до виникнення збуджуючих моментів відносно вісей рамок і, таким чином, до появи додаткових похибок визначення орієнтирних напрямків. За рівнів надлишкового тиску $P_0=140 \text{ дБ}$ і кутового руху основи із швидкістю $\omega=0,1 \text{ c}^{-1}$, дрейф вісі фігури гіроскопа, до речі, становить $\alpha \approx 0,024 \text{ град/хв}$, $\beta \approx 0,017 \text{ град/хв}$, тобто майже такий, як за двох – чи трьох компонентної качки.

Експериментальні дані вказують, що за 30 хвилин, при рівні акустичного випромінювання 165 дБ, гіроскоп втрачає одну ступінь вільності.

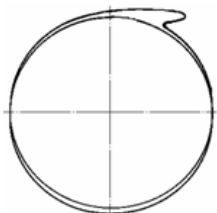


Рис. 6. Тангенціальні переміщення $V = \sum_{-150}^{150} \sum_1^{10} V_{mn}$; $z=0,01\text{м}$; $w=1 \times 10^3 \text{с}^{-1}$

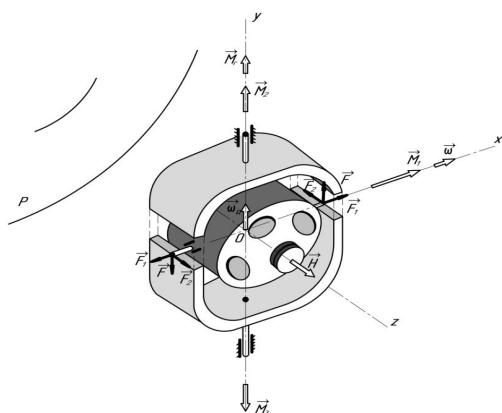


Рис. 7. Механізм взаємодії акустичної хвилі з кожухом та наружною рамкою гіроскопу

4. Висновки

Отримані аналітичні апроксимації пружних переміщень поверхні підвісу дозволяють в подальшому, з огляду на природу появи Ейлеревих сил інерції за хитавиці корпусу ракети-носія, внести інтегровані оцінки додаткових збурень гіроскопа у вигляді моментів сил інерції Кориоліса в правих частинах рівнянь руху відносно осей – внутрішньої і зовнішньої рамок.

Пояснення природи явища і механізму його прояву можуть слугувати підґрунтям для вибору шляхів боротьби з негативним впливом акустичного випромінювання.

Література

1. Данилин, В.П. Гироскопические приборы [Текст]: учебник / В.П. Данилин. – М.: Высшая шк., 1965. – 538с.
2. Даэр, И. Колебания корпуса космического аппарата под действием шума ракетных двигателей [Текст] / И. Даэр // Случайные колебания / Под ред. С. Крендела.- М.: Мир, 1967. – С. 192-211.
3. Гладкий, В.Ф. Динамика конструкции летательного аппарата [Текст] / В.Ф. Гладкий. – М.: Наука, 1969. – 496 с.
4. Melnik, V.N., Karachun, V.V. Some aspects of gyroscopic stabilisation in acoustic fields // International Applied Mechanics. – 2002. – Vol. 88, №1. – P.74-80.

УДК 629.7.054

СТАЦІОНАРНА ВЗАЄМОДІЯ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З КОЛОВОЮ ПЛАСТИНОЮ

Т.М. Лозовик

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Кафедра математичної фізики
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
Контактний тел.: (044) 454-94-51
E-mail: karachun 1@gala.net

Аналізується стаціонарна взаємодія хвилі надлишкового тиску звукової частоти з коловою ізотропною пластинною. Будується розрахункова модель явища на підґрунті променевої акустики

Ключові слова: акустическая волна, круглая пластина, акустический импеданс

Анализируется стационарное взаимодействие волны избыточного давления звуковой частоты с круглой изотропной пластиной. Строится расчетная модель явления на основе лучевой акустики

Ключевые слова: акустична хвиля, колова пластина, акустичний імпеданс

The stationary co-operating of wave of surplus pressure of audio-frequency is analysed with a round isotropic plate. The calculation model of the phenomenon is built on the basis of radial acoustics

Keywords: acoustic wave, round plate, acoustic impedance