

УДК 629.7.054

# ЦИКЛИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫЙ КОЖУХ СВОБОДНОГО ГИРОСКОПА В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**В. Н. Мельник**

Доктор технических наук, профессор\*

**В. В. Карачун**

Доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой\*

\*Кафедра биотехники и инженерии

Национальный технический университет

Украины «Киевский политехнический институт»

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

Контактный тел.: (044) 454-94-51

E-mail: karachun11@i.ua

*Аналізується збурений рух підвісу гіроскопа при циклічній дії хвилі надлишкового тиску звукової частоти. Вивчається вплив плоскої монохроматичної хвилі і дифузного поля. Визначається структура породжуваних напруженим станом підвісу збурюючих чинників, що призводять до дрейфу*

*Ключові слова: стан, що циклічно деформується, дифузне поле*

*Анализируется возмущенное движение подвеса гироскопа при циклическом воздействии волны избыточного давления звуковой частоты. Изучается действие плоской монохроматической волны и диффузного поля. Определяется структура порождаемых напряженным состоянием подвеса возмущающих факторов, приводящих к дрейфу*

*Ключевые слова: циклически деформируемое состояние, диффузное поле*

*The disturbed motion of suspend of gyroscope is analysed at cyclic influence of wave of surplus pressure of audio-frequency. The action of flat monochromatic wave and diffuse field is studied. A structure is determined generated by the tense state of suspend of revolting factors resulting in a drift*

*Keywords: cyclic deformed state, diffuse field*

## 1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению воздействия избыточного давления на механические системы подвеса инерциальных приборов, в частности, трехстепенного астаического гироскопа. Как оказалось, при летной эксплуатации проникающее акустическое излучение вызывает упруго-напряженное состояние подвеса, приводящее к дрейфу оси фигуры относительно его осей.

Природа этого явления и механизм проявления в режиме эксплуатационного использования летательных аппаратов требует аналитического описания с проведением глубокого анализа опасности возникновения особенностей функционирования инерциальной техники.

## 2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

Инерциальные приборы нашли широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике не только как пилотажные, но и в составе навигаторов. Вместе с тем, увеличение мощности двигательных установок и повышение уровня инжектируемой ими акустической энергии привело к изменению физико-механических свойств комплектующих, которые можно очертить категорией *импедансных* [1, 2, 3]. Это свойство в полетных условиях приводит к возникновению особенностей систем с носи-

телями кинетического момента [4, 5]. Возникающие при упругом взаимодействии с проникающим излучением нелинейные колебания подвеса привели к упруго-напряженному состоянию поверхности и, как следствие, к вынужденной прецессии гироагрегата [6, 7].

Наиболее опасными, с этих позиций, являются два режима летной эксплуатации – старт с открытых позиций и преодоление звукового барьера. Изучение природы этого явления применительно к аппаратам длительного действия – таким как палубная авиация – является весьма актуальным и необходимым.

*Целью* проводимых исследований является один из аспектов летной эксплуатации – циклическое нагружение механических систем подвеса гироскопа акустическим излучением высокого уровня, проявляющегося в виде N-волны.

## 3. Циклически деформируемое состояние внутренней рамки – кожуха

а) *плоская волна*

При циклическом нагружении ( $2 \leq k$ ), координатные функции строятся в виде:

$$U_z = \sum_{k=2}^{\infty} [a_k^{(1)}(t)z^2(1-z)^2 \cos k\varphi \cos z + a_k^{(2)}(t)z^2(1-z)^2 \sin k\varphi \sin z];$$

$$U_\varphi = \sum_{k=2}^{\infty} [b_k^{(1)}(t)z^2(1-z)^2 \sin k\varphi \cos z + b_k^{(2)}(t)z^2(1-z)^2 \cos k\varphi \sin z]; \quad (1)$$

$$W = \sum_{k=2}^{\infty} [c_k^{(1)}(t)z^4(1-z)^4 \cos k\varphi \cos z + c_k^{(2)}(t)z^4(1-z)^4 \sin k\varphi \sin z],$$

где  $a_k^{(1)}, a_k^{(2)}, b_k^{(1)}, b_k^{(2)}, c_k^{(1)}, c_k^{(2)}$  – произвольные постоянные.

б) диффузное поле

В случае *циклического* ( $2 \leq k$ ) нагружения, координатные функции будут иметь вид:

$$U_z(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} \left[ a_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \cos z + a_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \sin z \right] \right\} \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 \partial \varepsilon_1 \partial \varepsilon_2;$$

$$U_\varphi(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} \left[ b_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \cos z + b_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \sin z \right] \right\} \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 \partial \varepsilon_1 \partial \varepsilon_2;$$

$$W(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} \left[ c_k^{(1)}(t) z^4 (1-z)^4 \cos k\varphi \cos z + c_k^{(2)}(t) z^4 (1-z)^4 \sin k\varphi \sin z \right] \right\} \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 \partial \varepsilon_1 \partial \varepsilon_2.$$

*Влияние угловых колебаний корпуса носителя.*

Корпус носителя, как во время старта, так и во время полета, в общем случае имеет три составляющих угловой скорости, которые могут быть выражены через углы Эйлера  $\psi(t)$ ,  $\theta(t)$  и  $\gamma(t)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_x &= -\dot{\gamma} \sin \theta \cos \psi - \dot{\psi} \cos \theta; \\ \omega_y &= \dot{\psi} \sin \theta - \dot{\gamma} \cos \theta \cos \psi; \\ \omega_z &= \dot{\theta} - \dot{\gamma} \sin \psi. \end{aligned}$$

Повторяя ход предыдущих рассуждений несложно провести анализ этого явления и выяснить степень их влияния на динамику гироскопа.

Согласно сказанному выше, приходим к выводу, что относительно оси Ох, при акустическом воздействии, в элементах конструкции внутренней рамки гироскопа возникают угловые скорости возмущенного движения, имеющие следующую структуру –

$$\omega_x^a = \omega_{KV}^a + 2\omega_{KT}^a, \quad (2)$$

где  $\omega_{KV}^a$  – угловая скорость упругой крышки кожуха;

$\omega_{KT}^a$  – угловая скорость абсолютно твердой крышки кожуха (так как две крышки, то впереди сомножитель “2”).

Аналогично для оси  $O_z$ :

$$\omega_z^a = 2\omega_{KT}^a + \omega_{ЦТ}^a + \omega_{ЦУ}^a, \quad (3)$$

где  $\omega_{ЦТ}^a$  – угловая скорость абсолютно твердого цилиндра;

$\omega_{ЦУ}^a$  – угловая скорость упругого цилиндра.

В формулах (2), (3) в правых частях для удобства опущены индексы “х” и “z” соответственно.

Используя предыдущие результаты, можно раскрыть содержание выражений (2) и (3):

$$\begin{aligned} \omega_x^a &= \frac{3i\omega}{4R} \sum_{j=1}^6 c^j u_j + \frac{2R}{i\omega m_K} P_0 \times \\ &\times \int_0^{2\pi} \exp i \left[ \omega t - k_0 r (-\cos \beta \cos \theta_1 \sin \theta + \sin \beta \sin \theta_1 + \varepsilon_K) \right] \sin \beta d\beta \end{aligned} \quad (4)$$

где  $j = \overline{1,6}$ ;  $m_K$  – массы крышек;  $R$  – радиус крышки;

$$C = (c^1 \ c^2 \ \dots \ c^6)^T = G^{-1}F;$$

$$G = \frac{4^5}{R^6} \pi \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 5 & 5 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 19 & 7 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 7 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{pmatrix} \quad \text{– матрица Грама;}$$

$$F = \frac{64\pi}{DR^2} P_0 \begin{pmatrix} \frac{2J_1(\lambda)}{\lambda} \\ 6i \cos \varepsilon \frac{J_2(\lambda)}{\lambda} \\ -6i \sin \varepsilon \frac{J_2(\lambda)}{\lambda} \\ 7 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} - 18 \frac{J_2(\lambda)}{\lambda^2} - 6 \cos 2\varepsilon \frac{J_3(\lambda)}{\lambda} \\ 7 \frac{J_1(\lambda)}{\lambda} - 18 \frac{J_2(\lambda)}{\lambda^2} + 6 \cos 2\varepsilon \frac{J_3(\lambda)}{\lambda} \\ 6 \sin 2\varepsilon \frac{J_3(\lambda)}{\lambda} \end{pmatrix};$$

$$\lambda = k_0 \gamma R; \quad \gamma = \left[ \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta + \sin^2 \theta_1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\cos \varepsilon = \frac{\cos \theta_1 \sin \theta}{\gamma}; \quad \sin \varepsilon = \frac{\sin \theta_1}{\gamma};$$

$J_k(\lambda)$  – функции Бесселя;

$$u_1 = \left( 1 - \frac{x^2}{R^2} - \frac{y^2}{R^2} \right)^2; \quad u_2 = \frac{x}{R} u_1; \quad u_3 = \frac{y}{R} u_1;$$

$$u_4 = \frac{x^2}{R^2} u_1; \quad u_5 = \frac{y^2}{R^2} u_1; \quad u_6 = \frac{xy}{R^2} u_1; \quad x^2 + y^2 = r^2 \leq R^2;$$

$x, y$  – координаты точки поверхности крышки кожуха.

$$\begin{aligned} \omega_z^a &= \frac{4R}{3i\omega m_K} P_0 \int_0^{2\pi} \exp i \left[ \omega t - k_0 r (-\cos \beta \cos \theta_1 \sin \theta + \sin \beta \sin \theta_1 + \varepsilon_K) \right] \times \\ &\times (\cos \beta - \sin \beta) d\beta + \frac{2}{i\omega m_K} P_0 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} dz \int_0^{2\pi} \exp i \left[ \omega t - k_0 (-z \cos \theta_1 \sin \theta + R\beta \sin \theta) \right] \times \\ &\times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{6R^2}{L^2 + 3R^2} \right) \operatorname{tg} \beta \right] \cos \beta d\beta, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $L$  – длина цилиндра;

$m_K$  – масса цилиндра;

$z$  – линейная координата на боковой образующей,  $0 \leq z \leq L$ .

#### 4. Выводы

Проведенные исследования дают возможность установить степень влияния проникающего акустического излучения на оболочечные и плоские фрагменты подвеса.

Построенные координатные функции подвеса раскрывают содержательную часть явления, с одной стороны, с другой – создают предпосылки для выработки средств и методов борьбы с негативным влиянием мощной ударной волны при звуковом барьере.

#### Литература

1. Карачун, В.В. О погрешности гироскопического датчика угловых скоростей при акустическом возмущении [Текст]/ В.В. Карачун, О.Н. Юдин // Механика гироскопических систем. – 1993. – Вып. 12. – С. 107-110.
2. Карачун, В.В. О влиянии звукового излучения на механические системы [Текст]/ В.В. Карачун // «Аерокосмічний комплекс: конверсія та технології»: Житомир, 11-16 вересень 1995 р., ЖИТИ. -1995. –С.20-21. – 1993. – Вып. 12. – С. 23-28.
3. Карачун, В.В. О влиянии акустического излучения на динамику чувствительных элементов ГСП [Текст]/ В.В. Карачун, В.Г. Лозовик // Космічна наука: технологія. – 1996. – Т. 1, №2-6. – С. 73-75.
4. Карачун, В.В. Напряженно-деформированное состояние поверхности круговой цилиндрической оболочки под действием акустической волны [Текст] / В.В. Карачун, В.Г. Лозовик // Проблемы прочности. – 1997. №3. – С.139-144.
5. Мельник, В.М. Похибки поплавкового гіроскопа за синхронної хитавиці фіюзеляжу РН [Текст] / В.М. Мельник, В.В. Карачун // Вісник ЖДТУ/ Технічні науки. – 2008. №1(44). – С.83-94.
6. Мельник, В.Н. Первое приближение погрешности поплавкового гироскопа в натуральных условиях [Текст] / В.Н. Мельник, В.В. Карачун// Materialy IV Mezinarodny vedecko-prekticka conference «Věda a technologig: Krok do budoucnosti -2008», 1-15 březen 2008 roku. Technscé vedy. Dil 11. Praha: Publishing House «Education and Scince», Str.67-70.
7. Мельник, В.Н. Нелинейные колебания в полиагрегатном подвесе гироскопа [Текст]: моногр. / В.Н. Мельник, В.В. Карачун; НТУУ «КПИ». – «Корнейчук», 2008. -104с. Библиогр: с.80-82. – ISBN 978-966-7599-48-5.

*Розглянуті методи відновлення бронзових втулок розподільних валів двигунів ЯМЗ методом вібраційного зміцнення*

*Ключові слова: бронзові втулки, механічні коливання*

*Рассмотрены методы восстановления бронзовых втулок распределительных валов двигателей ЯМЗ методом вибрационного упрочнения*

*Ключевые слова: бронзовые втулки, механические колебания*

*The methods for recovery of bronze bushings camshaft engines using vibration hardening JAMZ are considered*

*Keywords: bronze bushings, mechanical vibrations*

Всё более широкое применение в промышленности высокопрочных материалов – нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов, а также интенсификация процессов металлообработки, выдвинули на первый план использование вибрации при обработке металлов давлением.

Вибрационная технология существенно отличается от традиционных методов обработки. Нетрадиционный подход позволяет создавать новые методы обработки и технологические процессы, способствующие разработке экологически чистых ресурсосберегающих технологий, характеризующихся более высокой ин-

УДК 621.9.048.6

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ БРОНЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВТУЛОК МЕТОДОМ ВИБРАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

**А.А. Келемеш**

Ассистент

Кафедра ремонта машин и технологии  
конструкционных материалов

Полтавская государственная аграрная академия  
ул. Сковороды, 1/3, г. Полтава, Украина, 36003