

Ảnh hưởng của thông số giá đỡ đến sai số con quay vi cơ trong điều kiện rung góc chân đế

Error of a micromechanical gyroscope caused by the base's angular vibration with uneven-stiffness of the torsion

Tăng Quốc Nam, Vũ Thế Trung Giáp, Vũ Minh Đức
Học viện Kỹ thuật Quân sự
e-Mail: vuthetronggiap@mta.edu.vn

Tóm tắt

Bài viết nghiên cứu mô hình toán học dao động của con quay vi cơ với dao động góc của phần tử cảm ứng trong điều kiện chân đế rung góc. Phương trình chuyển động được đưa ra dưới dạng hệ phương trình vi phân Mathew-Hill. Áp dụng phương pháp trung bình Krylov-Bogolyubov nghiên cứu động lực học con quay theo biến chậm thấy rằng thông số giá đỡ ảnh hưởng tới độ chính xác của con quay vi cơ trong điều kiện rung góc chân đế.

Từ khóa: động lực học, con quay vi cơ, rung chân

Abstract:

The article considered a mathematical model of fluctuation of a micromechanical gyroscope with angular fluctuations of a sensitive element in case of the base's angular vibration. The motions equations given in the form of Mathew-Hill's differential equation. By Krylov-Bogolyubov's averaging method, considering of dynamics of a sensitive element on slow variables showed an error of a micromechanical gyroscope caused by the base's angular vibration with uneven-stiffness of the torsion.

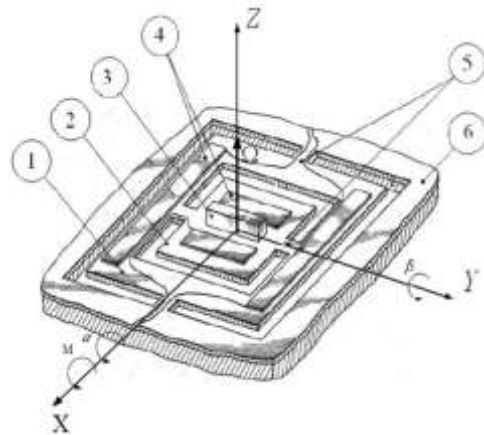
Keywords: dynamic, micromechanical gyroscope, vibration base.

1. Phần mở đầu

Trong khoảng 30 năm trở lại đây, sự ra đời và phát triển của công nghệ vi cơ điện tử (MEMS), một lĩnh vực công nghệ cao đã tạo ra một cuộc cách mạng về khoa học công nghệ trong việc chế tạo các linh kiện cảm biến và chấp hành ở phạm vi kích thước dưới milimet. Cảm biến quán tính có triển vọng nhất là con quay hồi chuyển vi cơ (micro mechanical gyroscope - gọi tắt là con quay vi cơ) đã và đang ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống dẫn hướng và ổn định chính xác như các vật thể bay, các ăng ten vệ tinh, thiết bị quang điện tử, thiết bị gắn trên ô tô và các thiết bị gia dụng. Chính vì vậy vấn đề nghiên cứu nhằm nâng cao độ chính xác của con quay vi cơ đang là một trong những vấn đề cấp thiết được nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước quan tâm.

Con quay vi cơ về bản chất là một hệ thống cơ điện tử, được chế tạo trên cơ sở nguyên lý làm việc dao động rung. Ở bài viết này tác giả nghiên cứu con quay vi cơ loại RR theo mẫu phát minh của Boxenhorn B.

[1,4] với chuyển động góc của phần tử cảm ứng trong hệ các đối tượng chuyển động được tạo ra từ một lớp silicon dày 300 micromet, sử dụng thuật in đá quang học (photolithography) được mô tả trên hình H. 1:



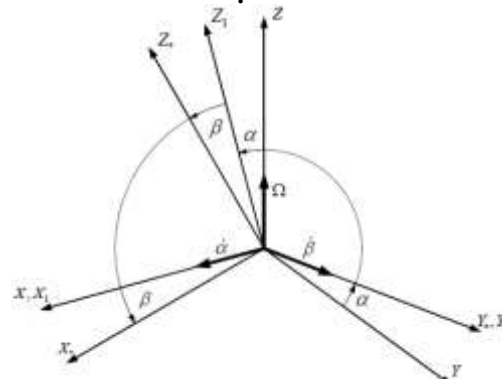
H. 1 Cấu tạo con quay vi cơ loại RR.

1- Khung ngoài. 2- Khung trong. 3- Phần tử cảm ứng.
4- Điện cực tĩnh điện. 5- Thanh xoắn. 6- Chân đế.

Trong tài liệu [6] đã nghiên cứu ảnh hưởng của rung góc chân đế đến độ chính xác của con quay vi cơ. Nghiên cứu trong bài viết này phát triển tiếp với việc xét đến ảnh hưởng của các thông số của giá đỡ đến sai số con quay vi cơ trong điều kiện rung góc chân đế.

2. Động lực học phần tử cảm ứng con quay vi cơ loại RR trong điều kiện rung góc chân đế

2.1. Mô hình toán học



H. 2 Cấu tạo con quay vi cơ loại RR.

Hệ tọa độ Oxyz gắn với chân đế của con quay vi cơ. Có trục Ox trùng với trục quay của khung ngoài, trục Oy trùng với trục quay của khung trong, trục Oz tạo thành tam diện thuận. Hệ tọa độ Ox₁y₁z₁ gắn với khung ngoài có trục Ox₁ trùng với trục dao động quay của khung ngoài, Oy₁ trùng với trục quay của khung trong, Oz₁ tạo thành tam diện thuận. Hệ tọa độ Ox_{*}y_{*}z_{*} gắn cứng với trục đối xứng chính của phần tử cảm ứng có trục Ox_{*} trùng với trục quay ngoài, Oy_{*} trùng với trục quay của khung trong, Oz_{*} tạo thành tam diện thuận. W- Vận tốc góc của chân đế. a - Góc dao động của khung ngoài đối với chân đế con quay vi cơ. b - Góc dao động của phần tử cảm ứng (khung trong) đối với khung ngoài.

Quan hệ tương đối giữa các hệ trục tọa độ [2]:

$$Oxyz \xrightarrow{3/4} Ox_1y_1z_1 \xrightarrow{3/4} Ox_*y_*z_*$$

Từ tương quan giữa các hệ trục tọa độ, áp dụng công thức tính động năng:

$$T = \frac{1}{2} \Omega_*^T \times J \times \Omega_* + \frac{1}{2} \Omega_a^T \times I \times \Omega_a,$$

trong đó: Ω_* - vector vận tốc góc của phần tử cảm ứng, J - ma trận momen quán tính của phần tử cảm ứng con quay hồi chuyển đối với hệ trục Oxyz, Ω_a - vận tốc của khung ngoài với hệ trục tọa độ Oxyz, I - ma trận momen quán tính của khung trong và khung ngoài với hệ trục tọa độ Ox₁y₁z₁, với giả thiết rằng các momen li tâm quán tính của phần tử cảm ứng và khung bằng 0.

Biểu thức động năng của hệ:

$$T = \frac{1}{2} J_x (\dot{\alpha} \cos b - W \cos a \sin b)^2 + J_y (W \sin a + \dot{\beta})^2 + J_z (W \cos a \cos b + \dot{\alpha} \sin b)^2 + I_x \dot{\alpha}^2 + I_y W^2 \sin^2 a + I_z W^2 \cos^2 a \quad (1)$$

Hàm thế năng biến dạng đàn hồi:

$$\Pi = \frac{1}{2} c_a a^2 + \frac{1}{2} c_b b^2 - Ma \quad (2)$$

trong đó: c_a, c_b - hệ số độ cứng xoắn theo các góc quay khi quay khung ngoài và khung trong tương ứng quanh Ox và Oy*, M - mô men cưỡng bức.

Hàm hao tán năng lượng:

$$\Phi = \frac{1}{2} k_a \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} k_b \dot{\beta}^2 \quad (3)$$

trong đó: k_a, k_b - hệ số hãm rung theo các góc quay khi quay khung ngoài và khung trong tương ứng quanh Ox và Oy*.

Ứng dụng phương trình Lagrange dạng II và loại bỏ những thành phần vô cùng bé bậc cao ta được hệ phương trình:

$$\begin{aligned} & (I_x + J_x) \ddot{\alpha} - (J_z - J_x) \dot{\alpha}^2 + 2(J_z - J_x) b \dot{\alpha} \dot{\beta} \\ & - (J_x + J_y - J_z) \dot{\beta}^2 + (J_z - J_x) b \ddot{\beta} \\ & + (I_z - I_y + J_z - J_y) a \dot{W}^2 + k_a \dot{\alpha} + c_a a + M = 0 \quad (4) \\ & J_y \ddot{\beta} + (J_x - J_z) b \dot{\alpha}^2 + (J_x + J_y - J_z) a \dot{W}^2 \\ & + (J_z - J_x) b \dot{W}^2 + J_y \dot{W} a + c_b \dot{\beta} + k_b \beta = 0. \end{aligned}$$

Hệ phương trình (4) chính là mô hình vật lý mô tả chuyển động của phần tử cảm ứng con quay vi cơ. Để thuận lợi cho việc khảo sát mà không làm ảnh hưởng tới tính chất của hệ, ta đưa vào các biến không thứ nguyên, nó giảm được các thông số của hệ phương trình và giảm các hiệu ứng phi tuyến liên quan đến biên độ dao động của bộ phận cảm ứng, các sai số do sản xuất. Ta đưa vào thời gian chậm không thứ nguyên t và thay thế các biến góc theo x, y , vận tốc góc theo n bằng các biểu thức sau:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{e} \sqrt{j_1} x, b = \sqrt{e} \sqrt{j_2} y \\ t &= \omega t, \omega = \sqrt{\frac{c_b}{J_y}} = \sqrt{\frac{c_a}{J_x + I_x}}, \\ en &= \sqrt{j_1} \sqrt{j_2} \frac{W}{\omega}, eg = \frac{k_a}{\sqrt{c_a (J_x + I_x)}} = \frac{k_b}{\sqrt{c_b J_y}} \quad (5) \\ j_1 &= \frac{J_x + J_y - J_z}{J_x + I_x}, j_2 = \frac{J_x + J_y - J_z}{J_y} \\ me^{3/2} &= \frac{M}{c_a} \sqrt{\frac{J_x + I_x}{J_x + J_y - J_z}}, x = \frac{1}{j_2} \end{aligned}$$

trong đó: ω - tần số dao động riêng của phần tử cảm ứng; g - hệ số hãm rung tương ứng của giá đỡ trong và ngoài; j_1, j_2, x - những tham số không thứ nguyên đặc trưng cho khối lượng và dạng hình học của phần tử cảm ứng con quay hồi chuyển vi cơ, m - mô men cưỡng bức.

Thay biểu thức (5) vào hệ phương trình (4) ta được:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + x &= e(-g \dot{x} + n \dot{y} - (1-x)\dot{y} - m), \\ \ddot{y} + y &= e(-g \dot{y} + n \dot{x} + x \dot{x}). \end{aligned} \quad (6)$$

Hệ phương trình (6) là mô hình toán học mô tả chuyển động của phần tử cảm ứng con quay vi cơ.

2.2. Bài toán rung góc chân đế

Nghiên cứu bài toán động lực học dao động cưỡng bức của phần tử cảm ứng đặt trên chân đế dao động rung góc với giả thiết vận tốc góc của chân đế có dạng:

$$W = W_0 + W_1 \sin 2\omega_0 t \quad (7)$$

trong đó: W_0 - vận tốc góc của chân đế, W_1 - biên độ dao động rung góc của chân đế, $2\omega_0$ - tần số dao động rung góc của chân đế.

Từ (5) và (7) thay thế vận tốc về dạng không thứ nguyên ta được:

$$n = n_0 + n_1 \sin 2mt \quad (8)$$

trong đó: n_0 - vận tốc góc không thứ nguyên của chân đế, n_1 - biên độ dao động rung góc không thứ nguyên của chân đế, $2m$ - tần số dao động rung góc không thứ nguyên của chân đế,

$$en_0 = \sqrt{j_1} \sqrt{j_2} \frac{\Omega_0}{\omega}, \quad en_1 = \sqrt{j_1} \sqrt{j_2} \frac{\Omega_1}{\omega}, \quad m = \frac{w_0}{w}$$

Thay biểu thức (8) vào hệ phương trình (6) ta được:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2m(1-x)n_1 y \cos 2mt - m_0 \sin mt = \ddot{\theta} \\ \ddot{y} + 2mxn_1 x \cos 2mt = \ddot{\theta} \end{cases} \quad (9)$$

Hệ phương trình (9) có dạng hệ phương trình vi phân *Mathew-Hill*. Nghiên cứu hệ phương trình động lực học của hệ trong trường hợp cộng hưởng khi giá trị tần số dao động rung góc tiến gần đến hai lần giá trị tần số dao động riêng của phần tử cảm ứng:

$$m - 1 = \epsilon l \quad (10)$$

trong đó: l - pha phân tách tần số ($l \sim 1$).

Để nghiên cứu sự thay đổi chậm pha phân tách dao động của hệ ta chuyển đổi các biến x, y, θ sang các biến chậm p_1, q_1, p_2, q_2 bằng công thức *Van de Pol* [2]:

$$\begin{cases} x = q_1 \cos mt + p_1 \sin mt, \\ \dot{x} = -q_1 m \sin mt + p_1 m \cos mt, \\ y = q_2 \cos mt + p_2 \sin mt, \\ \dot{y} = -q_2 m \sin mt + p_2 m \cos mt. \end{cases} \quad (11)$$

Ở lân cận tham số chính cộng hưởng (10), hệ phương trình (9) sau khi biến đổi sang các biến chậm p_1, q_1, p_2, q_2 theo các công thức (11) được hệ phương trình động lực học con quay theo biến chậm. Áp dụng phương pháp trung bình *Krylov-Bogoliubov* nghiên cứu hệ phương trình động lực học con quay theo biến chậm với dao động rung góc chân đế xảy ra ở lân cận tần số cộng hưởng [3]. Để thuận lợi trong việc giải hệ phương trình vi phân ta đưa vào đại lượng biên độ dao động chân đế mới:

$$n_{1*} = \frac{1}{2}(2x - 1)n_1, \quad 2x - 1 = \frac{J_y + J_z - J_x}{J_x + J_y - J_z} > 0 \quad (12)$$

Nhận được hệ phương trình mới với biến chậm:

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = \epsilon(-gq_1 - 2lp_1 + n_0q_2 - n_{1*}p_2 - m_0)/2, \\ \dot{q}_1 = \epsilon(-gp_1 + 2lq_1 + n_0p_2 - n_{1*}q_2)/2, \\ \dot{p}_2 = \epsilon(-gq_2 - 2lp_2 - n_0q_1 - n_{1*}p_1)/2, \\ \dot{q}_2 = \epsilon(-gp_2 + 2lq_2 - n_0p_1 - n_{1*}q_1)/2. \end{cases} \quad (13)$$

Trong phần tiếp theo ta bỏ qua dấu (*) để trình bày công thức đơn giản. Giải hệ phương trình vi phân thuận (13) ta được bộ nghiệm như sau:

$$\begin{cases} q_1(t) = ((p_{20} + q_{10})l_4 + (p_{10} - q_{20})l_5)e_1 + ((q_{10} - p_{20})l_3 + (p_{10} + q_{20})l_6)e_2 + \\ + ((q_{10} - p_{20})l_2 - (p_{10} + q_{20})l_6)e_3 + ((p_{20} + q_{10})l_1 + (q_{20} - p_{10})l_5)e_4 + \\ + \frac{l_4 e_1}{l_7} + \frac{l_3 e_2}{l_8} + \frac{l_2 e_3}{l_9} + \frac{l_1 e_4}{l_{10}} - \frac{l_{11}}{l_7 l_8 l_9 l_{10}} \frac{\ddot{\theta}}{\omega} m_0, \\ p_1(t) = ((p_{10} - q_{20})l_1 - (p_{20} + q_{10})l_5)e_1 + ((p_{10} + q_{20})l_2 + (p_{20} - q_{10})l_6)e_2 + \\ + ((p_{10} + q_{20})l_3 + (q_{10} - p_{20})l_6)e_3 + ((p_{10} - q_{20})l_4 + (p_{20} + q_{10})l_5)e_4 + \\ + \frac{l_5 e_1}{l_7} - \frac{l_6 e_2}{l_8} + \frac{l_6 e_3}{l_9} + \frac{l_5 e_4}{l_{10}} - \frac{l_{12}}{l_7 l_8 l_9 l_{10}} \frac{\ddot{\theta}}{\omega} m_0, \\ q_2(t) = ((q_{20} - p_{10})l_1 + (p_{20} + q_{10})l_5)e_1 + ((p_{10} + q_{20})l_2 + (p_{20} - q_{10})l_6)e_2 + \\ + ((p_{10} + q_{20})l_3 + (q_{10} - p_{20})l_6)e_3 + ((q_{20} - p_{10})l_4 - (p_{20} + q_{10})l_5)e_4 + \\ + \frac{l_5 e_1}{l_7} - \frac{l_6 e_2}{l_8} + \frac{l_6 e_3}{l_9} - \frac{l_5 e_4}{l_{10}} + \frac{l_{12}}{l_7 l_8 l_9 l_{10}} \frac{\ddot{\theta}}{\omega} m_0, \\ p_2(t) = ((p_{20} + q_{10})l_4 + (p_{10} - q_{20})l_5)e_1 + ((p_{20} - q_{10})l_3 - (p_{10} + q_{20})l_6)e_2 + \\ + ((p_{20} - q_{10})l_2 + (p_{10} + q_{20})l_6)e_3 + ((p_{20} + q_{10})l_1 + (q_{20} - p_{10})l_5)e_4 + \\ + \frac{l_4 e_1}{l_7} - \frac{l_3 e_2}{l_8} - \frac{l_2 e_3}{l_9} + \frac{l_1 e_4}{l_{10}} + \frac{l_{14}}{l_7 l_8 l_9 l_{10}} \frac{\ddot{\theta}}{\omega} m_0. \end{cases} \quad (14)$$

trong đó:

$$e_{1,4} = \frac{e^{-e(g \pm \sqrt{n_1^2 - (2l + n_0)^2})t/2}}{4\sqrt{n_1^2 - (2l + n_0)^2}}, e_{2,3} = \frac{e^{-e(g \pm \sqrt{n_1^2 - (2l - n_0)^2})t/2}}{4\sqrt{n_1^2 - (2l - n_0)^2}},$$

$$l_{1,4} = \sqrt{n_1^2 - (2l + n_0)^2} \operatorname{mn} n_1, l_{2,3} = \sqrt{n_1^2 - (2l - n_0)^2} \pm n_1, l_{5,6} = 2l \pm n_0,$$

$$l_{7,10} = g \pm \sqrt{n_1^2 - (2l + n_0)^2}, l_{8,9} = g \pm \sqrt{n_1^2 - (2l - n_0)^2},$$

$$l_{11} = 4n_1 l n_0 + g(g^2 - n_1^2 + 4l^2 + n_0^2), l_{12} = 2l(g^2 - n_1^2 + 4l^2 - n_0^2),$$

$$l_{13} = 2n_0(g^2 - n_1^2 - 4l^2 + n_0^2), l_{14} = 4g n_0 l + n_1(g^2 - n_1^2 + 4l^2 + n_0^2).$$

2.3. Ảnh hưởng của thông số giá đỡ

Xét với bộ giá trị số cho con quay vi cơ [5]: độ cứng giá đỡ $c_1/3 = c_2 = 8.48' 10^{-5} (Nm)$; mô men quán tính của phần tử cảm ứng và khung ngoài $J_x = J_y = 2J_z = 2I_x = 2.4' 10^{-13} (kgm^2)$; những tham số không thứ nguyên đặc trưng cho khối lượng và dạng hình học của phần tử cảm ứng con quay vi cơ tương ứng có giá trị $j_1 = 1, j_2 = 3/2, j = 1/2, x = 2/3$; tần số dao động riêng của phần tử cảm ứng con quay vi cơ $w = 1.88' 10^4 (s^{-1})$; biên độ vận tốc góc rung chân đế $W_1 = 2.10^{-6} (s^{-1})$.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của thông số giá đỡ lên nghiệm hệ phương trình vi phân của dao động cưỡng bức của phần tử cảm ứng con quay vi cơ (14) cho về phải hệ phương trình bằng 0 và giải hệ phương trình này đối với giá trị biên chậm q_1, p_1, q_2, p_2 . Nhận được kết quả sau:

$$q_1 = -m_0 l_7, p_1 = -m_0 l_8, q_2 = m_0 l_9, p_2 = m_0 l_{10}. (15)$$

Xem xét một số trường hợp ảnh hưởng tới dao động của phần tử cảm ứng con quay vi cơ theo các đặc trưng biên độ và tần số:

Trường hợp 1: Khi tham số hãm rung đồng nhất và chân đế đứng yên ($g = 0, n_0 = 0$), ta có giá trị của những biên chậm như sau:

$$q_1 = 0, p_1 = -\frac{2m_0 l}{4l^2 - n_1^2}, q_2 = 0, p_2 = \frac{m_0 n_1}{4l^2 - n_1^2} (16)$$

Biểu thị trên hình H.3a, khi tham số hãm rung đồng nhất và chân đế đứng yên, đặc trưng biên độ và tần số có đỉnh cộng hưởng tách dần ra khi biên độ dao động rung chân đế v_1 tăng.

Trường hợp 2: Khi tham số hãm rung không đồng nhất và chân đế đứng yên ($g^1 0, n_0 = 0$) nhận được giá trị của những biên chậm như sau:

$$q_1 = -\frac{m_0 g}{4l^2 + g^2 - n_1^2}, p_1 = -\frac{2m_0 l}{4l^2 + g^2 - n_1^2}, (17)$$

$$q_2 = 0, p_2 = \frac{m_0 n_1}{4l^2 + g^2 - n_1^2}.$$

Phân tích đặc trưng biên độ và tần số được biểu thị trên hình H.3b thấy rằng giá trị biên độ dao động

giảm khi giá trị tham số hãm rung tăng, như vậy nó phù hợp với quy luật vật lý đã biết.

Trường hợp 3: Trong trường hợp tham số hãm rung đồng nhất và chân đế quay đồng thời có dao động rung góc chân đế thu được kết quả đối với những biên chậm có dạng sau:

$$q_1 = \frac{-4m_0 l n_0 n_1}{((2l + n_0)^2 - n_1^2)((2l - n_0)^2 - n_1^2)},$$

$$p_1 = \frac{-2m_0 l (4l^2 - n_0^2 - n_1^2)}{((2l + n_0)^2 - n_1^2)((2l - n_0)^2 - n_1^2)}, (18)$$

$$q_2 = \frac{-m_0 n_0 (4l^2 - n_0^2 + n_1^2)}{((2l + n_0)^2 - n_1^2)((2l - n_0)^2 - n_1^2)},$$

$$p_2 = \frac{m_0 n_1 (4l^2 + n_0^2 - n_1^2)}{((2l + n_0)^2 - n_1^2)((2l - n_0)^2 - n_1^2)}.$$

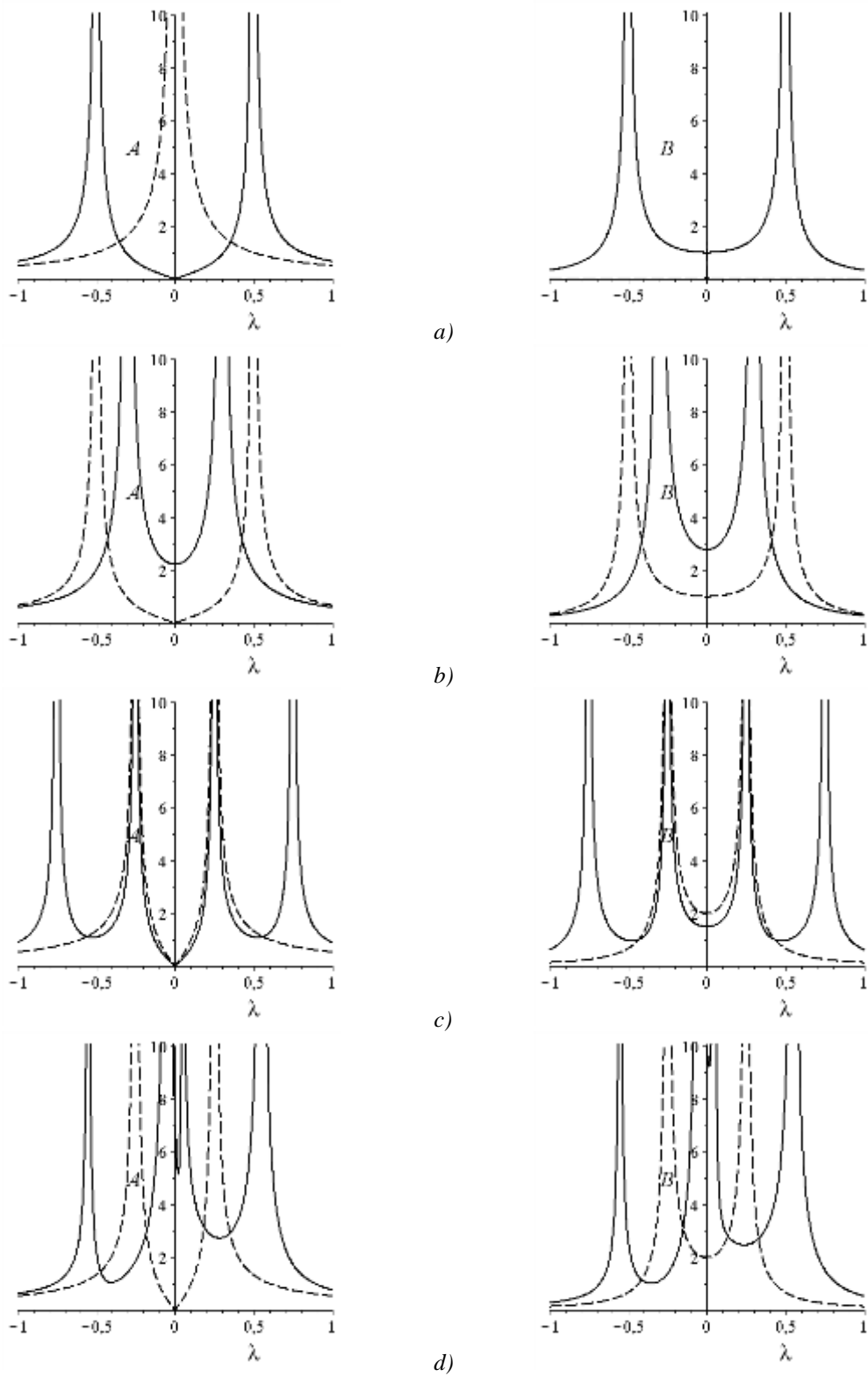
Như trên hình H.3c nhận thấy có bốn đỉnh cộng hưởng của đặc trưng biên độ và tần số và chúng dịch chuyển tách nhau ra khi tăng biên độ dao động góc v_1 .

Trường hợp chung: Khi tham số hãm rung không đồng nhất và chân đế quay đồng thời có dao động rung góc chân đế ($g^1 0, n_0^1 0$) có kết quả cụ thể:

$$q_1 = -m_0 l_7, p_1 = -m_0 l_8, q_2 = m_0 l_9, p_2 = m_0 l_{10}.$$

Phân tích đặc trưng biên độ và tần số biểu thị trên hình H.3d thấy rằng khi chân đế quay đồng thời có dao động rung và tham số hãm rung không đồng nhất sẽ dẫn tới tính đối xứng của đặc trưng biên độ và tần số bị phá vỡ. Khi tăng sự chênh lệch của tham số hãm rung thì tính mất đối xứng tăng lên.

Qua các trường hợp xét trên cho thấy rằng khi giá đỡ không đồng nhất tham số hãm rung trong điều kiện chân đế dao động thì độ chính xác của con quay hồi chuyển giảm. Do đó trong thiết kế và chế tạo con quay vi cơ phải kiểm soát được tham số hãm rung của giá đỡ phần tử cảm ứng trong giới hạn cho phép đảm bảo tính đối xứng và sự hội tụ của đỉnh cộng hưởng trong đặc trưng biên độ và tần số. Đồng thời với nghiệm của hệ phương trình (14) và các kết quả xét trong các công thức (15), (16), (17) và (18) có thể dùng để đánh giá sai số con quay vi cơ đặt trên chân đế dao động rung góc tương ứng theo từng thông số giá đỡ khác nhau.



H. 3 Đặc trưng biên độ - tần số dao động của phần tử cảm ứng con quay vi cơ
 a) $g = 0, n_0 = 0, n_1 = 1$ (nét liền) và $g = 0, n_0 = 0, n_1 = 0$ (nét đứt),
 b) $g = 0.8, n_0 = 0, n_1 = 1$ (nét liền) và $g = 0, n_0 = 0, n_1 = 1$ (nét đứt),
 c) $g = 0, n_0 = 0.5, n_1 = 1$ (nét liền) và $g = 0, n_0 = 0.5, n_1 = 0$ (nét đứt),
 d) $g = 0.8, n_0 = 0.5, n_1 = 1$ (nét liền) và $g = 0, n_0 = 0.5, n_1 = 0$ (nét đứt).

3. Kết luận

Việc nghiên cứu động lực học con quay vi cơ nhằm phục vụ cho việc thiết kế, chế tạo, mở rộng các ứng dụng cải thiện độ chính xác của con quay khi làm việc là hết sức cần thiết. Trong bài viết này đã khảo sát ảnh hưởng của thông số giá đỡ đến động lực học con quay vi cơ loại RR dưới tác động của rung góc chân đế và đưa ra kết luận trong trường hợp cộng hưởng khi tần số dao động rung góc chân đế lân cận chẵn lần tần số dao động riêng của phần tử cảm ứng sẽ xuất hiện hiện tượng kích thích dao động. Phát triển tiếp kết quả ở [6], đã khảo sát khi giá đỡ không đồng nhất tham số hãm rung sẽ làm tăng sai số của con quay vi cơ. Công thức (15), (16), (17) và (18) đưa ra trong bài viết này có thể dùng để đánh giá sai số con quay vi cơ đặt trên chân đế dao động rung góc tương ứng theo từng thông số giá đỡ khác nhau. Kết quả này có thể ứng dụng trong thiết kế, chế tạo và thử nghiệm con quay vi cơ.

Tài liệu tham khảo

- [1] Boxenhorn B.: *Planar inertial sensor*. United States Patent N 4,598,585. July 8, 1986. International Class: G01P 015/02.
- [2] Vũ Thế Trung Giáp; Merkurjev I.V.; Podalkov V.V.: *Ảnh hưởng rung chấn góc của chân đế lên động lực học con quay hồi chuyển vi cơ*. Vestnik MEI, Mát-xcơ-va, ISSN 1993-6982, N3 – 2010, tr 9-15. (bằng tiếng Nga).
- [3] Vũ Thế Trung Giáp; Merkurjev I.V.: *Tính ổn định chuyển động của con quay hồi chuyển vi cơ trong điều kiện rung góc chân đế*. Dụng cụ và hệ thống: điều khiển, giám sát và chẩn đoán, Mát-xcơ-va, ISSN 2073-0004, N3 – 2011, tr 35-40 (bằng tiếng Nga).
- [4] Vũ Thế Trung Giáp: *Động lực học dao động nhỏ của con quay hồi chuyển vi cơ học*. TC. Nghiên cứu KHCNQS, Đặc san T9-2011, tr 281-285.
- [5] Vũ Thế Trung Giáp; Merkurjev I.V.; Podalkov V.V.: *Hiệu ứng phi tuyến trong động lực học con quay hồi chuyển vi cơ học trong điều kiện rung chân đế*. Vestnik MEI, Mát-xcơ-va, ISSN 1993-6982, N5 - 2011. Trang 75-82. (bằng tiếng Nga).
- [6] Vũ Thế Trung Giáp: *Sai số con quay vi cơ do rung góc chân đế*. TC Nghiên cứu KHCNQS. Số 29 (2014), tr. 139-146.



TS. Tăng Quốc Nam tốt nghiệp đại học ngành *Cơ khí động lực* năm 1995 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, nhận bằng thạc sĩ về *Cơ điện tử* tại Viện Công nghệ châu Á (AIT) - Thái Lan năm 2002 và bằng tiến sĩ về *Cơ học kỹ thuật (Cơ điện tử)* tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2011. Từ năm 1995 đến nay là giảng viên bộ

môn Robot đặc biệt và Cơ điện tử, khoa Hàng không vũ trụ, Học viện Kỹ thuật Quân sự. Các hướng nghiên cứu chính bao gồm: Mô hình hóa và mô phỏng các hệ động lực, Động lực học và điều khiển robot, Định vị và xây dựng bản đồ cho robot di động, Robot đặc biệt trong quân sự và thám hiểm, Thiết bị cơ điện tử trong quân sự.



TS. Vũ Thế Trung Giáp tốt nghiệp đại học ngành *Cơ học ứng dụng* năm 2005, nhận bằng Thạc sĩ kỹ thuật *Cơ điện tử* năm 2007 và nhận bằng Tiến sĩ kỹ thuật *Động lực học và độ bền máy, dụng cụ và thiết bị (Cơ điện tử)* tại Trường Đại học Năng lượng Mát-xcơ-va, Liên bang Nga năm 2010.

Từ năm 2011 đến nay là Giảng viên thuộc Bộ môn Robot đặc biệt và Cơ điện tử, Khoa Hàng không Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật Quân sự. Các hướng nghiên cứu chính bao gồm: Cơ điện tử trong khí tài quân sự, Động lực học và điều khiển robot, Mô hình hóa và mô phỏng các hệ động lực, Con quay vi cơ.



ThS. Vũ Minh Đức sinh năm 1981, tốt nghiệp Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004 ngành *Cơ điện tử*, nhận bằng thạc sĩ về *Cơ điện tử* tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2013. Từ năm 2004 đến nay là giảng viên của Bộ môn

Robot đặc biệt và Cơ điện tử, Khoa Hàng không Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật Quân sự. Hướng nghiên cứu chính là các hệ thống đo lường, điều khiển, các hệ thống nhúng và tự động hóa công nghiệp.