NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC BỘ ĐỊNH PHƯƠNG THẲNG ĐỨNG NHỜ THIẾT BỊ HẤP THU RUNG CÓ TÍNH CHẤT MA SÁT NHỚT

Lê Tuấn Anh[1*], Phan Tương Lai[1], Hoàng Mạnh Tưởng[2], Nguyễn Văn Hùng[3]

Tóm tắt: *Bài báo nghiên cứu phương án nâng cao độ chính xác cho bộ định phương thẳng đứng nhờ sử dụng bộ hấp thu rung. Bộ định phương thẳng đứng sử dụng hai con quay có trục tiến động vuông góc với trục ổn định tương ứng và có vector mô men động lượng hướng ngược chiều nhau. Các con quay hai bậc tự do có tác dụng làm tăng mạnh độ cứng của hệ thống ổn định. Chính điều này cũng làm cho hệ thống ổn định xuất hiện tính chất cộng hưởng và nó là nguyên nhân làm cho sai số của hệ thống ổn định tăng. Để giải quyết vấn đề này, trong bài báo nghiên cứu phương án sử dụng bộ hấp thu rung có tính chất nhớt. Ngoài ra, trong bài báo cũng đưa ra cách tính toán các tham số thiết kế bộ hấp thu rung và thực hiện mô phỏng, khảo sát đánh giá phương án đưa ra.*

Từ khóa: Đế ổn định; Định phương thẳng đứng; Hấp thu rung; Tính chất nhớt.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thiết bị định phương thẳng đứng được sử dụng để xác định hướng so với mặt phẳng ngang trên các vật mang khác nhau như tàu biển, máy bay, tên lửa, bộ đo lực hút trái đất, … Với các thiết bị định phương thẳng đứng dạng đế thường sử dụng hiệu ứng con quay để tăng độ chính xác ổn định trong thời gian hoạt động [1, 4, 5, 8,9].

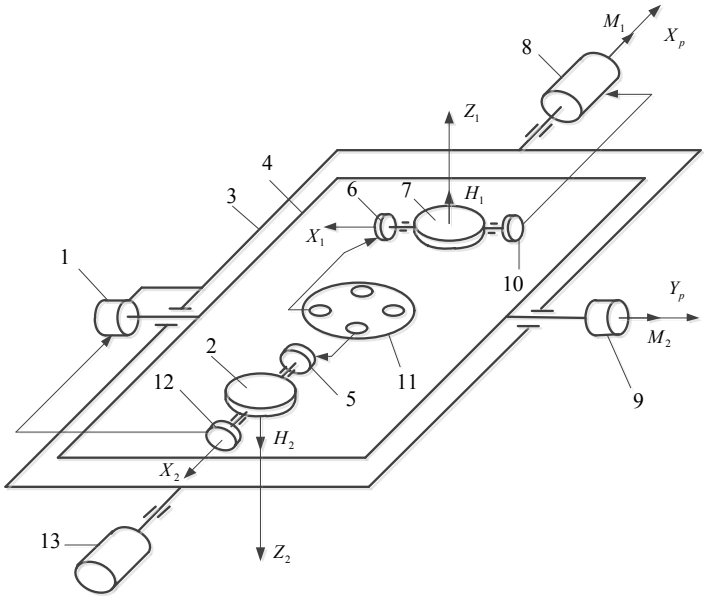
Trong bài báo nghiên cứu bộ định phương thẳng đứng trong đó đế ổn định được treo bởi hai trục cardan 3 và trên đó đặt hai con quay hai bậc tự do 2, 7 như trên *hình 1*. Hai con quay hai bậc này được bố trí sao cho hướng mô men động lượng của chúng vuông góc với đế và có chiều ngược nhau. Để tạo ra mô men ổn định tín hiệu tỷ lệ với góc quay của con quay đối với đế lấy từ chiết áp 10, 12 được đưa đến động cơ ổn định 1, 8 để sinh ra mô men cân bằng với mô men ngoại lực tác động lên các trục ổn định.

Để điều khiển đế sao cho hướng vuông góc với đế trùng với phương thẳng đứng ta sử dụng bọt nước 11 và các động cơ hiệu chỉnh 5, 6. Khi đế lệch so với phương ngang OX_p tín hiệu từ bộ đo 11 được đưa đến bộ phát mô men 8. Do đó, tạo ra mô men so với trục giá treo con quay 7 làm cho đế tiến động theo hướng làm giảm độ lệch so với mặt phẳng ngang. Tương tự, khi đế lệch so với phương ngang so với trục $OY_в$ tín hiệu từ bọt nước tỷ lệ với độ lệch này được đưa đến bộ phát mô men 5 tạo ra mô men điều khiển con quay 2 sẽ làm cho đế tiến động theo hướng làm giảm độ lệch của đế so với phương ngang [1, 8].

Như vậy, hoạt động của hệ thống định phương thẳng đứng gồm vòng bám để khử góc lệch và vòng ổn định. Sai số vòng ổn định đế sẽ ảnh hưởng trực tiếp đế độ chính xác định phương thẳng đứng.

Khi bộ định phương thẳng đứng hoạt động các tác động như ma sát các ổ trục, mất cân bằng động, liên hệ chéo đế giữa các kênh ổn định sẽ làm giảm độ chính xác các thiết bị này. Để đảm bảo độ chính xác cao trên bộ định phương sử dụng hai con quay hai bậc. Khi có tác động của mô men nhiễu loạn các con quay này sẽ sinh ra mô men cân bằng với mô men này nhờ hiệu ứng con quay. Đặc tính của mô men con quay sinh ra có tác dụng tăng độ cứng của hệ thống ổn định [6-8].

Tuy nhiên, đặc tính này của con quay làm cho hệ thống ổn định sẽ xuất hiện tần số cộng hưởng làm tăng sai số ổn định đế. Thông thường để loại bỏ ảnh hưởng của tính chất cộng hưởng trong các hệ thống động lực học thường sử dụng tính chất ma sát nhớt của chất lỏng [3]. Trong nghiên cứu này sẽ thực hiện nghiên cứu ứng dụng tính chất nhớt trong bộ hấp thụ rung thụ động nhằm loại bỏ đặc tính cộng hưởng của hệ thống ổn định đế dạng này.



Hình 1. *Sơ đồ động học bộ định phương thẳng đứng:*
1,8 – Động cơ ổn định; 2,7 – Con quay hai bậc tự do; 3 – Khung cardan; 4 – Đế ổn định; 5,6 – Bộ phát mô men; 9,13 – Thiết bị đo góc;10, 12 – Cảm biến góc; 11 – Thiết bị đo độ nghiêng.

2. ĐẶC TÍNH BIÊN ĐỘ TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH ĐẾ

Để nghiên cứu phương án ứng dụng bộ hấp thu rung ban đầu ta phải nghiên cứu đặc tính biên độ tần số của hệ thống ổn định.

Hoạt động của bộ định phương thẳng đứng diễn ra hai quá trình: quá trình ổn định đế và quá trình hiệu chỉnh. Hệ phương trình mô tả chuyển động của đế bộ định phương thẳng đứng theo hai trục ổn định có dạng [1]:

$$\begin{aligned}
&A_1\ddot{\alpha}_1 + f_1\dot{\alpha}_1 + H_1\dot{\beta}_1 + \mu_2\dot{\varepsilon}_2 + K_1(D)\varepsilon_1 = M_1^{nl}\\
&B_1\ddot{\beta}_1 + \mu_1\dot{\varepsilon}_1 - H_1\dot{\alpha}_1 = M_1^{đk}\\
&A_2\ddot{\alpha}_2 + f_2\dot{\alpha}_2 + H_2\dot{\beta}_2 + \mu_1\dot{\varepsilon}_1 + K_2(D)\varepsilon_2 = M_2\\
&B_2\ddot{\beta}_2 + \mu_2\dot{\varepsilon}_2 - H_2\dot{\alpha}_2 = M_2^{đk}\\
&\varepsilon_2 = \beta_2 + \alpha_1\\
&\varepsilon_1 = \beta_1 + \alpha_2
\end{aligned} \qquad (1)$$

trong đó, α_i, β_i – Các góc quay trục ổn định và góc tiến động trong không gian quán tính tương ứng; A_i, f_i – Mô men quán tính và hệ số nhớt đối với trục ổn định tương ứng; B_i, μ_i – Mô men quán tính và hệ số nhớt đối với trục tiến động con quay; H_i – Mô men động lượng con quay; $K_i(D)$ – Hàm truyền hiệu chỉnh hệ thống ổn định theo trục tương ứng; ε_i – Góc tiến động con quay so với đế ổn định tương ứng; M_1^{nl}, M_2^{nl} - Các mô men nhiễu loạn tác động lên trục X_p và Y_p tương ứng; $M_1^{đk}$, $M_2^{đk}$ - Các mô men điều khiển tác động lên các trục tiến động do các bộ phát mô men tạo ra.

Để thuận tiện cho việc khảo sát mà không ảnh hưởng đến bản chất ta cho các tham số

của hai kênh như nhau (A_i = A, f_i = f, B_i = B, μ_i = μ, H_i = H, $K_i(D)$ = K(D), i = 1,2). Với các con quay hai bậc tự do được treo nhờ khung cardan sử dụng ổ trục khô thì hằng số μ rất nhỏ. Ngoài ra, trong bài toán này ta chỉ quan tâm đến độ chính xác ổn định đế của bộ định phương nên ta có thể giả sử các mô men điều khiển tác động lên các trục tiến động của con quay ổn định $M_1^{đk}$, $M_2^{đk}$ bằng không.

Trong bài báo [1] đã đưa ra giải pháp loại bỏ ảnh hưởng liên hệ chéo giữa các kênh ổn định nên tiếp theo ta có thể giả sử rằng, hệ thống ổn định cho bộ định phương thẳng đứng bao gồm hai kênh ổn định độc lập. Do đó, tiếp theo, ta sẽ nghiên cứu đặc tính biên độ tần số hệ thống ổn định một kênh.

Phương trình của hệ thống ổn định cho mỗi kênh có dạng:

$$\begin{aligned} A\ddot{\alpha} + f\dot{\alpha} + H\dot{\beta} + K\beta &= M^{nl} \\ B\ddot{\beta} + \mu\dot{\beta} - H\dot{\alpha} &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Viết hệ phương trình (2) dưới dạng toán tử Laplace ta có:

$$\begin{pmatrix} As^2 + f_1 s & Hs + K(s) \\ -Hs & Bs^2 + \mu s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M^{nl} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3a}$$

Biểu thức (3a) có thể biến đổi về dạng:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} As^2 + fs & Hs + K(s) \\ -Hs & Bs^2 + \mu s \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} M^{nl} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3b}$$

Và từ đây, ta có:

$$\alpha = \frac{Bs + \mu}{\begin{vmatrix} As^2 + fs & Hs + K(s) \\ -Hs & Bs^2 + \mu s \end{vmatrix}} M^{nl} \tag{3c}$$

Từ hệ phương trình (3c) ta tính được hàm truyền đối với góc quay đế ổn định theo công thức:

$$W_{\alpha}^{M^{nl}}(s) = \frac{Bs + \mu}{ABs^3 + (A\mu + fB)s^2 + (\mu f + H^2)s + HK(s)} \tag{4}$$

Trong trường hợp ta sử dụng con quay có ổ trục khô và đế hoạt động trong môi trường không khí thì các hằng số độ nhớt μ và f rất nhỏ có thể bỏ qua. Từ đây, hàm truyền ở biểu thức trên hàm truyền hệ thống ổn định đế một kênh có thể viết:

$$W_{\alpha}^{M^{nl}}(s) = \frac{Bs}{ABs^3 + H^2 s + HK(s)} \tag{5}$$

Hàm truyền hiệu chỉnh $K(s)$ có thể biểu diễn dưới dạng tích của hệ số khuếch đại K và hàm hiệu chỉnh $W_{HC}(s)$. Trong đó, hàm hiệu chỉnh $W_{HC}(s)$ có tác dụng thay đổi đặc tính biên độ - pha tần số ở dải tần số cắt ω_c của hệ thống ổn định còn hệ số khuếch đại K sử dụng để làm sai số tĩnh của hệ thống ổn định bằng không. Khi hệ số K bằng không hàm

truyền hệ thống ổn định lúc này sẽ có dạng:

$$W_{\alpha}^{M^{nl}}(s) = \frac{B}{ABs^2 + H^2} \tag{6}$$

Sai số tĩnh của hệ thống ổn định lúc này có thể được tính bằng công thức:

$$\alpha_T = \frac{B}{H^2} M_{Max} \tag{7}$$

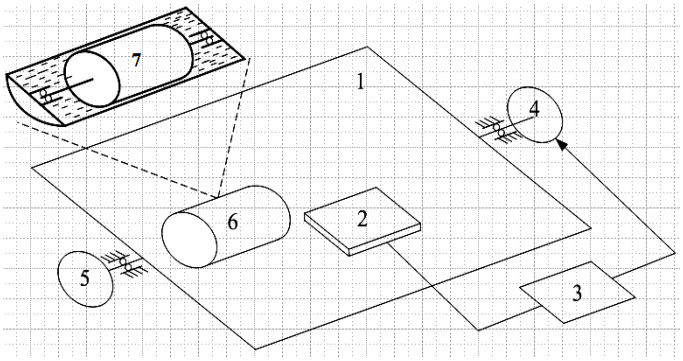
Trong đó, M_{Max} là mô men cực đại tác động lên trục ổn định.

Khi giá trị $\frac{B}{H^2}$ nhỏ sai số tĩnh α_T được tính ở công thức (7) nhỏ hơn sai số cho phép của hệ thống định phương thẳng đứng ta có thể xây dựng hệ thống ổn định không cần liên hệ ngược theo góc tiến động β của con quay hai bậc. Dựa vào công thức (6) ta thấy, khi hệ số khuếch đại K bằng không thì hệ thống xẩy ra cộng hưởng ở tần số $\omega_0 = \frac{H}{\sqrt{AB}}$. Hiện tượng này có thể là nguyên nhân gây sai số của hệ thống ổn định tăng lên đáng kể.

Thông thường để loại bỏ ảnh hưởng do hiện tượng cộng hưởng trong các bài toán chống rung trong kỹ thuật thường sử dụng đặc tính nhớt của bộ hấp thu rung [3]. Tiếp theo ta sẽ nghiên cứu việc ứng dụng của thiết bị này trong việc loại bỏ ảnh hưởng đặc tính cộng hưởng trong hệ thống ổn định đế và xác định các tham số của nó.

3. ỨNG DỤNG THIẾT BỊ HẤP THU RUNG CÓ TÍNH CHẤT NHỚT TRONG BỘ ĐỊNH PHƯƠNG THẲNG ĐỨNG

Trên *hình 2* đưa ra sơ đồ động học hệ thống đế ổn định sử dụng bộ hấp thu rung. Trong đó, vỏ của thiết bị hấp thụ rung gắn với đế sao cho trục của nó song song với trục ổn định.



Hình 2. *Sơ đồ động học hệ thống ổn định một trục sử dụng bộ hấp thu rung.*

1 - Đế ổn định; 2 – Con quay hai bậc tự do; 3 – Bộ điều khiển với hệ số khuếch đại K; 4 – Động cơ ổn định; 5 – Cảm biến xác định góc; 6 – Bộ giảm chấn; 7 – Vật nặng bộ giảm chấn.

Phương trình động lực học mô tả hệ thống ổn định đế một kênh khi sử dụng bộ hấp thụ rung có dạng:

$$\begin{aligned} &A\ddot{\alpha} + \mu_H(\dot{\alpha} - \dot{\alpha}_1) + H\dot{\beta} + K\beta = M^{nl} \\ &J_H\ddot{\alpha}_H + \mu_H(\dot{\alpha}_H - \dot{\alpha}) = 0 \\ &B\ddot{\beta} - H\dot{\alpha} = 0 \end{aligned} \tag{8}$$

Ở đây, J_H – Mô men quán tính vật nặng của bộ hấp thu rung; μ_H - Hằng số nhớt bộ hấp thụ rung.

Trong trường hợp này, hệ số khuếch đại K bằng không thì hệ thống ổn định lúc này tương đương với một hệ dao động bao gồm vật nặng có mô men quán tính bằng A được gắn với lò xo có độ cứng bằng $C = \frac{H^2}{B}$. Dựa vào hệ phương trình (8) ta có hàm truyền góc quay đế ổn định với tác động đầu vào lên trục ổn định mô men ngoại lực M^{nl} được tính theo công thức:

$$W_\alpha^{M^{nl}}(s) = \frac{J_H s + \mu_H}{AJ_H s^3 + \mu_H(A + J_H)s^2 + \frac{J_H H^2}{B} s + \frac{\mu_H H^2}{B}} \tag{9a}$$

Viết phương trình (9a) dưới dạng tần số ta được:

$$W_\alpha^{M^{nl}}(j\omega) = \frac{J_H(j\omega) + \mu_H}{AJ_H(j\omega)^3 + \mu_H(A + J_H)(j\omega)^2 + \frac{J_H H^2}{B}(j\omega) + \frac{\mu_H H^2}{B}} \tag{9b}$$

Từ phương trình (9b) ta có thể xác định được đặc tính biên độ tần số của hệ thống ổn định:

$$\left|W_\alpha^{M^{nl}}(\omega)\right| = \left\{ \frac{\left(J_H\omega\right)^2 + \mu^2{}_H}{\left(-AJ_H\omega^3 + \frac{J_H H^2}{B}\omega\right)^2 + \left[-\mu_H(A + J_H)\omega^2 + \frac{\mu_H H^2}{B}\right]^2} \right\}^{1/2} \tag{10a}$$

Tiếp theo ta thay $C = \frac{H^2}{B}$ và chia cả tử và mẫu của biểu thức (10a) cho $\left(J_H\sqrt{\frac{C}{A}}\right)^2$ thu được:

$$\left|W_{\ \alpha}^{M^{nl}}(\omega)\right| = \frac{1}{C}\left\{ \frac{\left(\frac{J_H\omega}{J_H\sqrt{\frac{C}{A}}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_H}{J_H\sqrt{\frac{C}{A}}}\right)^2}{\left(-\frac{AJ_H}{CJ_H}\omega^2 + \frac{J_H C}{CJ_H}\right)^2\left(\frac{\omega}{\sqrt{\frac{C}{A}}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_H}{J_H\sqrt{\frac{C}{A}}}\right)^2\left[-(\frac{A}{C} + \frac{J_H}{A}\frac{A}{C})\omega^2 + \frac{C}{C}\right]^2} \right\}^{1/2} \tag{10b}$$

Ta có thể xác định các giá tri biên độ trên theo công thức:

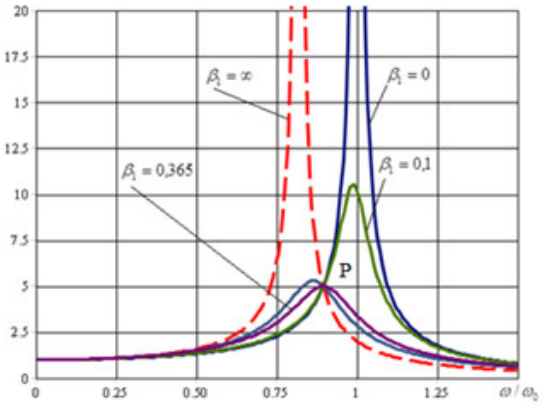
$$\left|W_{\ \alpha}^{M^{nl}}(\omega)\right| = \frac{1}{C}\left\{ \frac{\varsigma^2 + 4\beta_1^2}{\varsigma^2(1-\varsigma^2)^2 + 4\beta_1^2[1-\varsigma^2(1+h)]^2} \right\}^{1/2} \tag{10c}$$

Với. $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{A}}$, $\beta_1 = \frac{\mu_H}{2J_H\omega_0}$, $h = \frac{J_H}{A}$, $\varsigma = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Với, $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{A}}$, $\beta_1 = \frac{\mu_H}{2J_H\omega_0}$, $h = \frac{J_H}{A}$, $\varsigma = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Dựa vào phương trình (10c) ta thấy, biên độ dao động của vật cần chống rung ở một tần số nhất định sẽ phụ thuộc và các tham số của bộ hấp thụ rung. Do đó, để thiết kế bộ hấp thu rung ta cần xác định các tham số của nó để sao cho hiệu quả hấp thụ rung là cực đại. Ở mỗi tần số tác động lên đối tượng hấp thụ rung ta sẽ cần xác định độ nhớt μ_H sao cho biên độ dao động của vật cần ổn định có biên độ nhỏ nhất.

Xét đường đặc tính biên độ tần số của hệ thống ổn định khi sử dụng thiết bị hấp thụ rung với hệ số nhớt thay đổi từ không đến vô cùng. Đường đặc tính biên độ tần số khi hệ số độ nhớt $\mu_H = \infty$ sẽ cắt đường đặc tính này với $\mu_H = 0$ ở điểm P có tọa độ là P($\sqrt{\frac{2}{2+h}}$,$1+\frac{2}{h}$). Rõ ràng rằng, tọa độ điểm P không phụ thuộc vào hằng số nhớt μ_H nên P là điểm bất biến trên đồ thị đặc tính biên độ tần số của hệ thống ổn định hình 3. Do đó, ta có thể xác định giá trị độ nhớt của bộ hấp thu rung μ_H để thỏa mãn giá trị tung độ của đặc tính biên độ tần số hệ thống ổn định đạt cực đại.



Hình 3. *Đặc tính biên độ tần số của bộ hấp thu rung* ω/ω_0.

Để đặc tính biên độ tần số của góc lệch đế đạt cực trị tại điểm ω_P thì nó phải thỏa mãn điều kiện:

$$\left.\frac{d\left|W_\alpha^{M^{nl}}(\omega)\right|}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_P} = 0 \qquad (11)$$

Sử dụng điều kiện ở phương trình (11) ta suy ra hệ số cản:

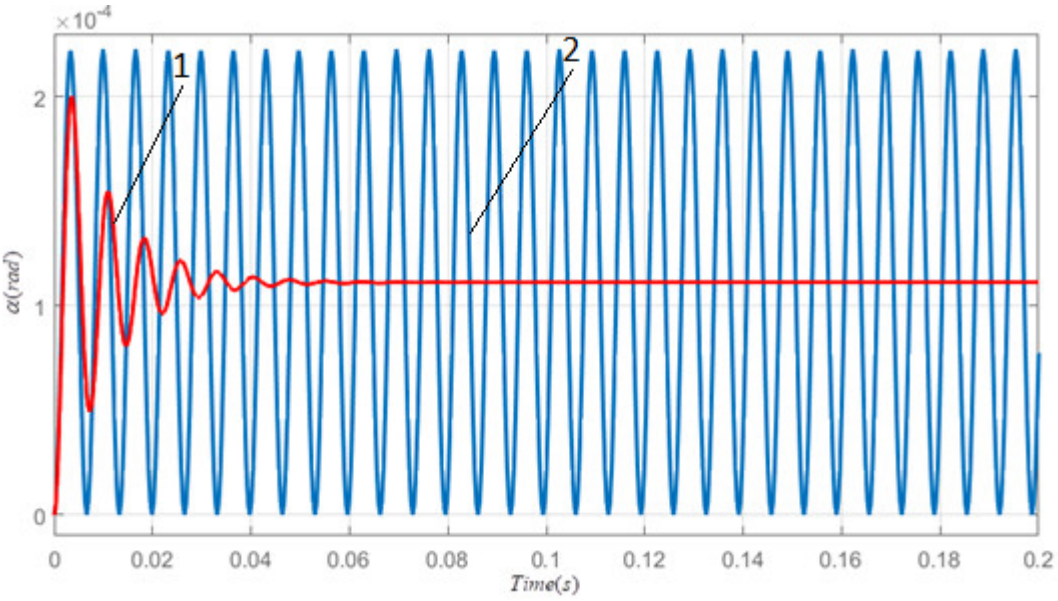
$$\beta_1 = \sqrt{\frac{1}{2(2+h)(1+h)}} \qquad (12)$$

Từ công thức (8) ta có thể xác định được hệ số nhớt của bộ hấp thu theo biểu thức:

$$\mu_H = 2J_H \frac{H}{\sqrt{AB}} \beta_1 \qquad (13)$$

Dựa vào tung độ của điểm P ta thấy, hệ số $h = \frac{J_H}{A}$ càng lớn thì khả năng hấp thụ rung càng lớn. Tuy nhiên, do đặc trưng về kích thước nên mô men quán tính của bộ hấp thu được lựa chọn trong dải bằng $(0{,}1 \div 0{,}5)A$.

Để kiểm tra hiệu quả của bộ hấp thụ rung ta thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink. Trên hình 4 đưa ra kết quả mô phỏng quá trình quá độ của hệ thống ổn định đế một trục khi có tác dụng hàm step ở đầu vào.



Hình 4. *Đặc tính quá độ góc lệch để ổn định.*

1 - Khi sử dụng thiết bị hấp thu rung;

2- Khi không sử dụng thiết bị hấp thu rung.

Kết quả mô phỏng hình 4 cho thấy, khi sử dụng bộ hấp thu rung đặc tính quá độ của hệ thống ổn định khi sử dụng thiết bị hấp thụ rung suy giảm về trạng thái thiết lập rất nhanh còn trong trường hợp không sử dụng thiết bị này hệ thống có tính dao động rất cao.

4. KẾT LUẬN

Bài báo phân tích nguyên nhân của sự xuất hiện đặc tính cộng hưởng của hệ thống ổn định của bộ định phương thẳng đứng trong trường hợp hệ số khuếch liên hệ ngược góc tiến động con quay hai bậc tự do nhỏ. Đưa ra phương án sử dụng bộ hấp thu rung có tính chất nhớt để loại bỏ đặc tính cộng hưởng này. Ngoài ra, trong bài báo cũng đưa ra cách tính các tham số nhớt tối ưu phục vụ cho việc tính toán thiết kế bộ hấp thụ rung cho lớp đế ổn định thiết kế theo phương án sử dụng hiệu ứng con quay để đảm bảo độ ổn định cao. Kết quả mô phỏng trên Matlab-Simulink thể hiện được hiệu quả của bộ hấp thu rung có tính chất nhớt trong việc hấp thu các dao động ở dải tần số cộng hưởng đưa ra.

Phương án xây dựng đế ổn định không sử dụng liên hệ ngược theo góc tiến động con quay hai bậc tự do có thể giúp ta đơn giản hóa kết cấu và giảm kích thước của hệ thống ổn định đế cho bộ định phương thẳng đứng.

Kết quả nghiên cứu trong bài báo có thể làm cơ sở cho việc thiết kế chế tạo, cải tiến các bộ định phương thẳng đứng trên tàu hoặc trên máy bay ở nước ta hiện nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. А. В. Соколов, А.А. Краснов, Л.К., *"Железняк методы повышения точности морских гравиметров. Гироскопия и навигация"*, Том 27, № 2 (105), 2019.

[2]. В.В. Карамышкин, "*Динамическое гашение колебаний",* Под. Ред. К.М. Рагульскиса.-Л. Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988.-108с.

[3]. Hoàng Mạnh Tưởng, Doãn Văn Minh, Nguyễn Vỹ Thuận, Trần Ngọc Hưởng, Trịnh Lê Hoài Phương**,** *"Ảnh hưởng liên hệ chéo đến độ dự trữ ổn định đế bộ định phương thẳng đứng và giải pháp khắc phục"*, Journal of Science and Technique - N.201 (8-2019) - Le Quy Don Technical University.

[4]. Дзюба А.Н, Лопарев А.В, "*Нестационарный алгоритм коррекции гировертикали авиационного гравиметра",* Гироскопия и навигация. № 3, 2015 С.52-60.

ABSTRACT

IMPROVING THE PRECISION OF THE VERTICAL GYROSCOPE BY USING VIBRATION ABSORPTION DEVICE

Nowadays, optimum power allocation in multi- user environment is considered widely due to the limitation of power resource. Make powerless when to keep SINR constant at mobile is the purpose of this paper. The paper is to give optimum beam pattern when taking accounting interference from other users. This article also uses simulation to prove this proposal to reduce total power comparing with traditional beam patterns.

Keywords: Large interesting field; The particular field; Interesting subject.

Nhận bài ngày 23 tháng 3 năm 2020
Hoàn thiện ngày 21 tháng 4 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 12 tháng 6 năm 2020

Địa chỉ: [1]Viện KH-CN quân sự;
[2]Học viện Kỹ thuật quân sự;
[3]Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng.
[*]Email: tuananhlemta@gmail.com.