

CON QUAY HAI BẬC TỰ DO ĐO TỐC ĐỘ GÓC VỚI KẾT CẤU Lò XO ĐIỆN

THE 2-DOF GYROSCOPE USED TO MEASURE ANGULAR SPEED WITH ELECTRIC SPRING STRUCTURE

TS. Nguyễn Văn Tuyền, TS. Nguyễn Việt Trung
Học viện Kỹ thuật Quân sự

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình kết cấu con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo cơ khí; cấu tạo, nguyên lý hoạt động và phương trình chuyển động của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện cùng ứng dụng của nó trong kỹ thuật để đạt được độ chính xác trong điều khiển quá trình bay của các loại vũ khí.

Từ khóa: Con quay hai bậc tự do; Con quay hai bậc tự do với kết cấu lò xo điện.

ABSTRACT

This article presents a two-speed gyrotory speed profile structure with mechanical spring structure; The principle of operation and equation of motion of the two-degree gyroscope is to measure angular velocity with the electric spring structure together with its application in engineering to achieve the accuracy in control the flight process of the weapons.

Keywords: The 2-dof gyroscope; The 2-dof gyroscope with electric spring structure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hệ thống tự động điều khiển tên lửa, máy bay, xe tăng, tàu chiến, vệ tinh và tàu vũ trụ,... con quay hai bậc tự do được dùng để đo tốc độ góc, gia tốc góc, góc lệch, tích phân tốc độ của hệ thống dẫn đường quán tính, hệ thống ổn định quỹ đạo và điều khiển tầm hướng bay [1]. Với độ chính xác cao, con quay hai bậc tự do tốc độ góc kết cấu lò xo cơ khí được sử dụng rộng rãi, tuy nhiên việc thiết kế, chế tạo cơ cấu lò xo cơ khí có dải đo rộng và ngưỡng nhạy cao là nhiệm vụ rất khó trong kỹ thuật; điều này được khắc phục khi sử dụng con quay

hai bậc tự do có kết cấu lò xo điện thay cho lò xo cơ khí. Để làm rõ kết cấu; ưu, nhược điểm và xây dựng phương trình chuyển động của con quay hai bậc tự do có kết cấu lò xo điện, đó là nội dung nghiên cứu của bài báo.

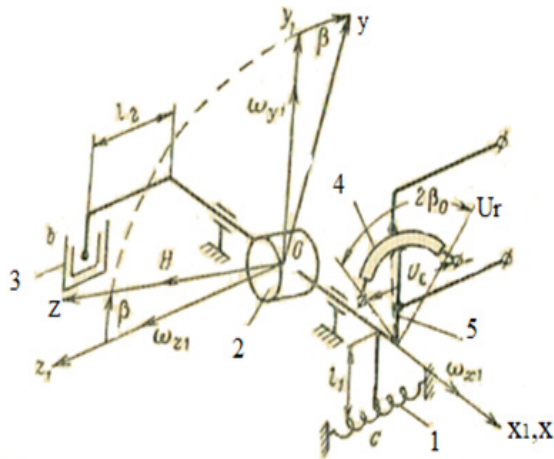
1.1. Mô hình kết cấu con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với lò xo cơ khí

Các hệ tọa độ trong hình 1:

- Oxyz: Hệ trục tọa độ gắn với thiết bị mang con quay, điểm O gắn cố định trên thiết bị; trục Ox trùng với trục dọc, trục Oz trùng với

trục ngang của thiết bị mang; trục Oy vuông góc với mặt phẳng Oxz, tạo thành tam diện thuận Oxyz;

- $Ox_1y_1z_1$: Hệ trục tọa độ gắn với con quay; điểm O là tâm của con quay trùng với điểm gốc O của hệ tọa độ Oxyz.



Hình 1. Mô hình kết cấu con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với lò xo cơ khí:

- 1 - Lò xo cân bằng; 2 - Rotor; 3 - Bộ giảm chấn;
4 - Biến trở chiết áp; 5 - Thanh quét.

Nhược điểm cơ bản của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với cơ cấu lò xo cơ khí là thiết bị đo dạng không khép kín, bởi vậy sự thay đổi các thông số của các chi tiết thành phần ảnh hưởng trực tiếp tới độ chính xác đo. Theo [1, 2, 3, 4], điện áp ra lấy từ cảm biến tốc độ góc được xác định bằng biểu thức:

$$U_r = U_c \frac{\beta_r}{2\beta_0} = \frac{U_c}{2\beta_0} \cdot \frac{H}{cl_2^2} \omega_y \quad (1)$$

Trong đó:

- Điện áp ra U_r được lấy từ thanh quét biến trở và điểm giữa của biến trở;
- $2\beta_0$: Góc quán của biến trở (chiết áp) - dải đo của chiết áp;
- U_c : Hiệu điện thế nguồn nuôi cấp cho biến trở (đặt vào hai đầu mạch chiết áp).

Nếu như tín hiệu ra của con quay là điện áp U_r được lấy (ghi nhận) từ chiết áp thì từ biểu thức (1), độ nhạy của con quay được tính bằng tỷ số:

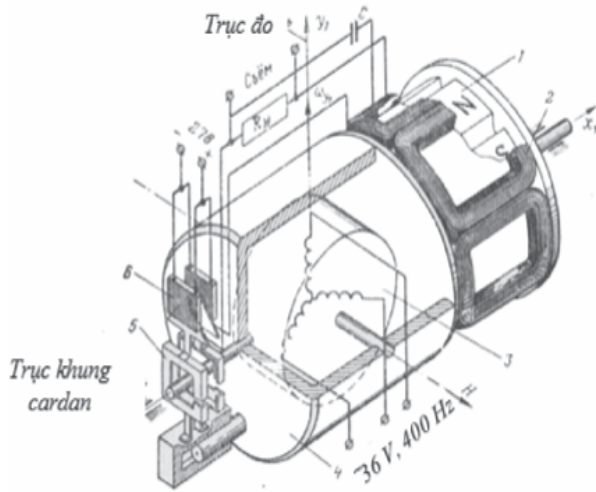
$$h_1 = \frac{U_r}{\omega_y} = \frac{U_c}{2\beta_0} \frac{H}{cl_2^2} \quad (2)$$

Từ biểu thức (2) thấy rõ là sự thay đổi điện áp U_c cấp cho biến trở ảnh hưởng trực tiếp tới độ nhạy (h_1) của con quay đo tốc độ góc; sai số đối với dao động điện áp U_c của mạch nguồn bên ngoài đạt tới vài phần trăm, nên có thể coi độ nhạy đo tốc độ góc của thiết bị với cơ cấu lò xo cơ khí có sai số đo nằm giới hạn đó, hoặc thậm chí còn cao hơn. Bởi vậy việc thiết kế, chế tạo cảm biến tốc độ góc với cơ cấu lò xo cơ khí có dải đo rộng và ngưỡng nhạy cao là nhiệm vụ rất khó trong kỹ thuật. Để khắc phục nhược điểm trên, ta đi nghiên cứu mô hình kết cấu con quay hai bậc tự do có lò xo điện thay cho lò xo cơ khí.

1.2. Mô hình kết cấu và nguyên lý làm việc của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với lò xo điện

Con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện là thiết bị đo vòng thuận nghịch khép kín. Tín hiệu điện áp ra U_r không phụ thuộc vào dao động điện áp U_c , còn ngưỡng nhạy của thiết bị được xác định chỉ bởi mô men M_Σ quanh trục khung các đẳng Ox.

Trên hình 2 là sơ đồ con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện. Trong đó, ở vị trí lò xo cơ khí hạn chế chuyển động tự do của khung các đẳng quanh trục Ox được thay bằng cơ cấu điện từ gồm các cuộn dây (2) đặt trong từ trường nam châm vĩnh cửu (1).



Hình 2. Con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với lò xo điện

Khi thiết bị mang con quay quay quanh trục Oy với tốc độ góc ω_y , quanh trục con quay Ox xuất hiện mô men con quay, dưới tác động của nó trục rotor sẽ quay quanh trục Ox để cho véc tơ mô men động lượng $\vec{H}$ trùng với véc tơ tốc độ góc ω_y bằng con đường ngắn nhất. Thanh quét (5) của chiết áp (6) liên kết với con quay (3) trượt từ vị trí không (0) làm xuất hiện hiệu điện thế tỷ lệ với góc lệch của con quay β . Trong khi đó, qua cuộn dây của lò xo điện sẽ có dòng điện i_1 . Các cuộn dây nằm trong từ trường của nam châm (1) và được gắn chặt với thiết bị con quay. Nhờ tương tác dòng điện i_1 với từ trường nam châm vĩnh cửu, cuộn dây của lò xo điện tạo ra mô men quanh trục Ox cản lại sự quay của con quay quanh trục Ox. Nếu như bỏ qua mô men quán tính $J_x \ddot{\beta}$ và coi $\cos \beta = 1$ (do góc lệch của con quay nhỏ), ta có mô men con quay $H\omega_y$ cân bằng với mô men lò xo điện: $k_1 i_1 = H\omega_y$, từ đó ta tính được:

$$i_1 = \frac{H}{k_1} \omega_y \quad (3)$$

Tương ứng, điện áp ra U_r lấy từ điện trở R_H bằng:

$$U_r = R_H i_1 = \frac{HR_H}{k_1} \omega_y \quad (4)$$

Từ biểu thức (4), ta thấy rõ là điện áp ra U_r không phụ thuộc vào dao động của điện áp nguồn nuôi U_c .

Bản chất vật lý được lý giải như sau: Giả sử điện áp nuôi U_c giảm, khi đó dòng điện trong cuộn dây i_1 giảm. Khi dòng điện i_1 giảm, mô men con quay $H\omega_y$ sẽ lớn hơn mô men lò xo điện $k_1 i_1$. Dưới tác động của hiệu các mô men $(H\omega_y - k_1 i_1)$, con quay sẽ bắt đầu quay cho đến khi góc lệch β đạt tới giá trị mà ở đó một lần nữa đạt được sự cân bằng của nó, có nghĩa là dòng điện i_1 đạt được giá trị trước đó của nó.

Bởi vậy, khi điện áp nuôi U_c dao động sẽ thay đổi góc lệch của con quay β , còn điện áp ra U_r sẽ được duy trì ổn định đối với tốc độ góc ω_y xác định. Đây là ưu điểm quan trọng của cảm biến tốc độ góc với kết cấu lò xo điện.

2. PHƯƠNG TRÌNH CHUYỂN ĐỘNG CỦA CON QUAY HAI BẬC TỰ DO ĐO TỐC ĐỘ GÓC VỚI KẾT CẤU LÒ XO ĐIỆN

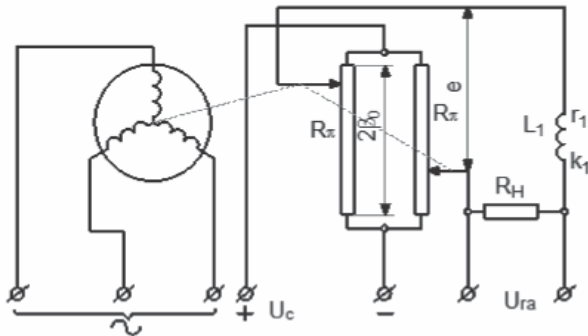
Phương trình chuyển động của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện (hình 2) viết gần đúng có dạng như sau:

$$J_x \ddot{\beta} + k_1 i_1 = H\omega_y - M_z \quad (5)$$

Trong đó, $k_1 i_1$ là mô men do lò xo điện tạo ra.

Để xác định dòng điện i_1 trong cuộn dây nam châm điện, chúng ta xem xét sơ đồ điện của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc (hình 3).





Hình 3. Sơ đồ điện của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc

Nếu như đường chéo chiết áp không đạt tải ($R_H + r_1 = \infty$) thì điện áp lấy từ mạch chiết áp bằng:

$$e = \frac{U_c}{\beta_0} \beta \quad (6)$$

Nếu như đường chéo chiết áp có trở hữu hạn ($R_H + r_1 \neq \infty$), thì khi tính dòng điện trong cuộn dây cần phải tính đến nội điện trở R_{BH} của nguồn. Trong trường hợp đó, dòng điện trong cuộn dây nam châm điện được xác định từ phương trình:

$$e = (r_1 + R_{BH} + R_H) i_1 + L \frac{di_1}{dt}$$

Chuyển sang biểu thức toán tử viết từ phương trình đã cho với các điều kiện ban đầu bằng 0, chúng ta nhận được:

$$i_1 = \frac{1}{(r_1 + R_H + R_{BH})(1 + T_s)} e \quad (7)$$

$$\text{Trong đó: } T_s = \frac{L}{r_1 + R_H + R_{BH}} \text{ [giây]}$$

R_H - Điện trở tải; r_1 - Điện trở cuộn dây lò xo điện;

R_{BH} - Nội điện trở nguồn; L - Điện cảm cuộn dây lò xo điện.

Theo [6], ta có:

$$R_{BH} \approx \frac{R_\pi}{2} \quad (8)$$

Thay (8) vào (7), ta có:

$$i_1 = \frac{1}{\left(r_1 + R_H + \frac{R_\pi}{2}\right)(1 + T_s)} e \quad (9)$$

Khi cuộn dây chuyển động trong từ trường nam châm vĩnh cửu, trong mạch của cảm biến tốc độ góc phát sinh thêm dòng điện i_{1M} và điện áp e_1 . Trong trường hợp đó, phương trình chuyển động của con quay là:

$$J_x \ddot{\beta} + k_1(i_1 + i_{1M}) = H\omega_y - M_\Sigma \quad (10)$$

Theo [6], ta có:

$$i_{1M} = \frac{1}{\left(r_1 + R_H + \frac{R_\pi}{2}\right)(1 + T_s)} e_1 \quad (11)$$

$$\text{và: } e_1 = B_0 U W_1 l_p \cdot 10^{-8} \text{ [vôn]} \quad (12)$$

$$\text{hay: } e_1 = B_0 l_p W_1 a \cdot 10^{-8} \dot{\beta} = 10^{-4} k_1 \dot{\beta} \text{ [vôn]} \quad (13)$$

Trong đó:

U - Tốc độ chuyển động của dây dẫn

trong từ trường: $U = a\dot{\beta}$;

B_0 - Từ thông trong khe hở; W_1 - Số lượng vòng dây;

l_p - Chiều dài làm việc của vòng dây (cm);

a - Đường kính cuộn dây (cm).

Từ (9) và (11), ta có dòng điện i trong

cuộn dây của nam châm điện là:

$$i = i_1 + i_{1M} = \frac{1}{\left(r_1 + R_H + \frac{R_\pi}{2}\right)(1 + T_s)}(e + e_1) \quad (14)$$

Kết hợp (10) và (14), ta có phương trình chuyển động của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện là:

$$J_x \ddot{\beta} + k_1 i = H\omega_y - M_\Sigma \quad (15)$$

Theo [5, 6], ở trạng thái bình ổn, giá trị dòng điện i trong cuộn dây lò xo điện bằng:

$$i = \frac{U_C}{\beta_0} \cdot \frac{1}{R_{BH} + r_1 + R_H} \beta = \frac{U_C}{\beta_0} \cdot \frac{1}{\frac{R_\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^2 \right] + r_1 + R_H} \beta \quad (16)$$

Giá trị lớn nhất của dòng $i_{\max}$ có được khi thay $\omega_y^{\max}$, khi đó $\beta = \beta_0$; bởi vậy, phương trình (16) có dạng:

$$i_{\max} = \frac{U_C}{r_1 + R_H} \quad (17)$$

Khi đó, độ nhạy của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với lò xo điện:

$$\frac{i_{\max}}{\omega_y^{\max}} = \frac{U_C}{(r_1 + R_H)\omega_y^{\max}} = h_2 \quad (18)$$

Từ (18), ta có:

$$\omega_y^{\max} = \frac{U_C}{(r_1 + R_H)h_2} \quad (19)$$

Phương trình (19) cho phép chúng ta nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố và tham số kết cấu và động lực tới độ chính xác đo tốc độ góc của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện ở trạng thái bình ổn.

3. KẾT LUẬN

Con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện là thiết bị đo vòng thuận nghịch khép kín. Từ phương trình (4), tín hiệu điện áp xuất ra cho mạch điều khiển (U_r) không bị ảnh hưởng bởi dao động điện áp cấp cho nguồn nuôi (U_c), do đó làm tăng độ nhạy, ngưỡng nhạy và dải đo của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện.

Dòng điện trong quá trình làm việc (phương trình 15) là một trong những nguyên nhân chính gây ra sai số và làm giảm độ chính xác điều khiển của con quay hai bậc tự do với kết cấu lò xo điện.

Để tăng độ chính xác của con quay hai bậc tự do đo tốc độ góc với kết cấu lò xo điện, cần hạn chế ảnh hưởng tác động của sự không ổn định cường độ dòng điện do công nghệ chế tạo con quay gây ra. ♦

Ngày nhận bài: 15/6/2022

Ngày phản biện: 28/6/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Văn Tuyên; “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu và động lực học tới độ chính xác của con quay hai bậc tự do trong hệ thống điều khiển”. Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Hà Nội, 2016.
- [2]. Блюмин Г.Д. и др; “Теория и конструкция гироскопических приборов и систем”. М. Высшая школа, 1981.
- [3]. Виниченко Н.Т., Кацай Д.А., Лысова А.А; “Теория гироскопических приборов”. Учебное пособие. – Челябинск: ЮурГУ, 2010. - 141 с.
- [4]. Кошляков В.Н; “Теория гироскопических компасов”. М, 1972.
- [5]. Пельпор Д.С; “Гироскопические приборы систем ориентации и стабилизации”. М, 1977.
- [6]. Пельпор Д.С, Михалев И.А, Бауман В.А; “Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы”. Учебник для вузов. М. Высшая школа, 1988, 424 с.

