

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH ĐỘ TRÔI CON QUAY 3 BẬC TỰ DO TRÊN THIẾT BỊ BAY

RESEARCH OF DRIFT DETERMINATION OF GYROSCOPE WITH 3 DEGREES OF FREEDOM FOR FLYING DEVICES

ThS. **Đỗ Tiến Cần**, TS. **Nguyễn Phú Thắng**, TS. **Nguyễn Hanh Hoàn**
Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

TÓM TẮT

Con quay là bộ phận quan trọng trong hệ thống điều khiển của thiết bị bay. Độ trôi của con quay ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của thiết bị bay khi bay. Bài báo đề cập đến mô hình toán phương trình chuyển động con quay 3 bậc tự do trên thiết bị bay và các phương pháp xác định độ trôi của con quay bằng phương pháp mô phỏng số và phương pháp thử nghiệm. Bằng phương pháp mô phỏng số đã áp dụng tính toán cho con quay S-125. Một số nguyên nhân cơ bản ảnh hưởng đến độ trôi con quay đã được chỉ ra phục vụ cho việc thiết kế và các phương án công nghệ khi khảo sát, thử nghiệm.

Từ khóa: Con quay 3 bậc tự do; Con quay S-125; Độ trôi.

ABSTRACT

The gyroscope is an important part of the flying devices control system. The drift of the gyroscope directly affects the accuracy of the flying devices in flight. The article refers to the mathematical model of the gyro equation of 3 degrees of freedom on the flying devices and methods to determine the drift of the gyroscope, numerical simulation and experimental methods. By numerical simulation method, calculations have been applied to the gyroscope S-125. Some basic causes affecting the accuracy of flying devices gyro have been pointed out for the design and technological options when surveying and testing.

Keywords: Gyroscope with 3 degrees of freedom; S-125 gyroscope; Drift.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Con quay là bộ phận quan trọng trong hệ thống điều khiển dùng để xác định các vị trí góc của thiết bị bay (TBB) trong không gian. Trong

quá trình tính toán thiết kế và thử nghiệm con quay, việc xác định độ trôi con quay và khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố kết cấu và động lực học đến độ trôi con quay là một nội dung nghiên cứu quan trọng. 

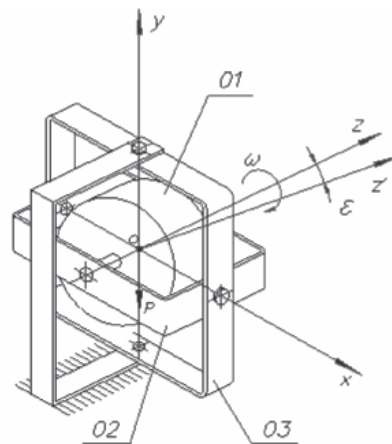
Vấn đề liên quan tới độ trôi của con quay tuy đã được nhiều tác giả trên thế giới quan tâm nghiên cứu giải quyết, song các bài toán về giải hệ phương trình chuyển động con quay thường giải theo phương pháp giải tích với các giả thiết thường được đơn giản hóa. Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, càng ngày càng có nhiều các phần mềm mô phỏng số cho phép xây dựng các bài toán có độ phức tạp cao, sát với điều kiện thực tế hơn. Trong bối cảnh điều kiện làm thực nghiệm còn hạn chế và tốn kém, thì việc xây dựng chương trình mô phỏng phương trình chuyển động con quay 3 bậc tự do trên thiết bị bay để khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố kết cấu và động lực học tới độ trôi của con quay có ý nghĩa thiết thực, góp phần phân tích đánh giá đưa ra các phương án hợp lý khi kiểm tra và hiệu chỉnh con quay.

Trong khuôn khổ bài báo sẽ tập trung đề cập đến các phương pháp xác định độ trôi con quay 3 bậc tự do trên thiết bị bay với đối tượng khảo sát là con quay trên tên lửa S-125. Con quay trên tên lửa S-125 là con quay 3 bậc tự do có nhiệm vụ xác định vị trí góc cren (góc quay quanh trục dọc) của TBB. Độ trôi con quay S-125 chính là độ trôi của khung các-đăng ngoài và khung các-đăng trong. Độ trôi con quay phụ thuộc vào các yếu tố động lực học như: dao động của hệ rô-to khung các-đăng do mô-men mất cân bằng, mô-men ma sát, độ cứng vững các khung các-đăng, độ dơ các mối ghép, các sai số khác do chế tạo và lắp ráp,...

2. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ XÁC ĐỊNH ĐỘ TRÔI CON QUAY

2.1. Phương trình chuyển động của con quay

Sơ đồ động học con quay 3 bậc tự do có thể được biểu diễn như hình 1:



Hình 1. Sơ đồ động học con quay 3 bậc tự do

Con quay 3 bậc tự do có cấu tạo gồm: Rô-to, khung trong và khung ngoài (hình 1). Rô-to gá lên khung trong, khung trong gá lên khung ngoài, khung ngoài gá lên thân thiết bị bay. Rô-to được khởi động và duy trì tốc độ quay bằng động cơ điện.

Hệ phương trình vi phân phi tuyến tổng quát của hệ con quay dưới tác động của mô-men ngoại lực có dạng sau [3]:

$$\begin{cases} (J_x^R + J_y^R)\ddot{\beta} - J_z^R\dot{\alpha}\dot{\beta}\cos\beta + (J_y^T + J_x^R - J_z^R - J_z^T)\dot{\alpha}^2\sin\beta\cos\beta = -M_x \\ [J_y^N + (J_x^R + J_y^R)\cos^2\beta + J_z^T\sin^2\beta]\ddot{\alpha} - 2(J_x^R + J_y^T - J_z^R - J_z^T)\dot{\alpha}\dot{\beta}\sin\beta\cos\beta - \\ - J_z^R\dot{\phi}\dot{\beta}\cos\beta + J_z^R\dot{\phi}\sin\beta = M_y \\ J_z^R(\ddot{\phi} + \ddot{\alpha}\sin\beta + \dot{\alpha}\dot{\beta}\cos\beta) = M_z \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: α, β – Góc trôi của trục rô-to theo các mặt phẳng xoz và yoz; ϕ – Góc quay của rô-to; $J_x, J_y, J_z; M_x, M_y, M_z$ – Mô-men quán tính và mô-men ngoại lực theo các trục Ox, Oy, Oz; R, T, N – Các chỉ số ký hiệu tương ứng với rô-to (R), khung trong (T), khung ngoài (N).

Tiến hành giải hệ phương trình trên, ta sẽ tìm được mối liên hệ giữa độ trôi của con quay với các yếu tố động lực học. Tuy nhiên, trong từng điều kiện của bài toán cụ thể, việc giải hệ phương trình trên không hề đơn giản, nhất là

việc xác định giá trị các thành phần của mô-men ngoại lực phát sinh trong quá trình hoạt động của con quay.

Có thể tính gần đúng độ trôi của con quay theo công thức (3):

$$\dot{\epsilon} = A(t) + \frac{M}{H} \quad (2)$$

Trong đó:

$A(t)$ – Hàm biến thiên thay đổi theo thời gian, phụ thuộc vào kết cấu động lực học của con quay và một số tác động khác.

M – Mô-men tác động lên hệ thống như: Mô-men ma sát, mô-men xung lực, mô-men mất cân bằng, mô-men điều khiển,...

H – Mô-men động lượng của rô-to con quay.

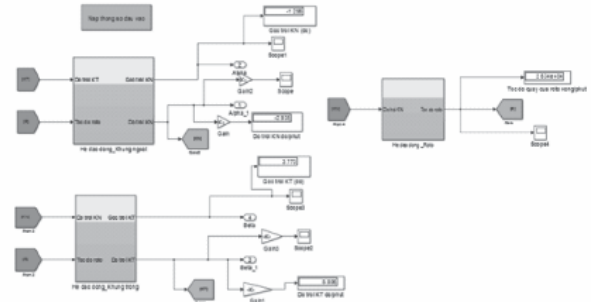
Trong biểu thức (3), thành phần thứ nhất $A(t)$ thường có giá trị nhỏ, nhất là khi con quay đã đạt tốc độ ổn định, cho nên tốc độ trôi của con quay phụ thuộc chủ yếu vào thành phần thứ hai, tức là giá trị của nó tỉ lệ thuận với mô-men ngoại lực và tỉ lệ nghịch với mô-men động lượng của rô to con quay.

2.2. Phương pháp mô phỏng số xác định độ trôi con quay

Trên cơ sở hệ phương trình chuyển động của con quay 3 bậc tự do (1) trên thiết bị bay, có thể xây dựng chương trình mô phỏng trong Matlab-Simulink như trên hình 2.

Chương trình mô phỏng được xây dựng gồm 3 khối chính: Khối khung các-đăng ngoài, khối khung các-đăng trong và khối rô-to con quay. Mỗi khối mô tả động lực học của đối tượng tương ứng dưới tác động của các yếu tố ngoại lực. Chương trình mô phỏng cho phép tự

động hoá quá trình tính toán, đánh giá các tham số thiết kế, khảo sát ảnh hưởng của các tham số kết cấu và động lực học tới độ trôi con quay 3 bậc tự do trên thiết bị bay.



Hình 2. Chương trình mô phỏng phương trình chuyển động con quay 3 bậc tự do

Trong các kết cấu thực tế của các thiết bị con quay, quanh các trục khung trong và khung ngoài có các mô-men ngoại lực tác động. Các mô-men này là không mong muốn gây ra độ trôi con quay nên chúng được gọi là các mô-men có hại [4]. Đối với con quay thiết bị bay, các mô-men có hại bao gồm: Mô-men ma sát vòng bi, mô-men do mất cân bằng, mô-men cản khí động rô-to, mô-men ma sát chổi quét, mô-men do độ cứng vững không đều của hệ khung các-đăng.

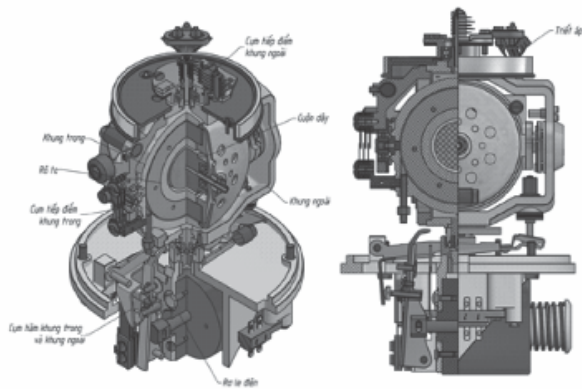
Việc đánh giá ảnh hưởng của các mô-men có hại này đến độ trôi của con quay thiết bị bay có thể được thực hiện nhờ chương trình mô phỏng số.

2.3. Một số kết quả mô phỏng số xác định độ trôi con quay trên tên lửa S-125

2.3.1. Cấu tạo con quay S-125

Con quay S-125 là con quay cơ điện 3 bậc tự do có cấu tạo gồm: Rô-to, khung trong và khung ngoài (hình 3). Rô-to gá lên khung trong, khung trong gá lên khung ngoài, khung

ngoài gá lên thân thiết bị bay. Rô-to được khởi động và duy trì tốc độ quay bằng động cơ điện.



Hình 3. Kết cấu con quay thiết bị bay S-125

2.3.2. Thông số đầu vào phục vụ mô phỏng

Các thông số đầu vào phục vụ mô phỏng con quay trên tên lửa S-125:

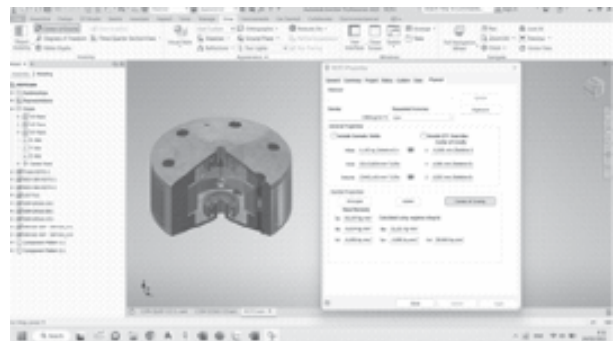
- Mô-men ngoại lực khung trong:
 $M_x = 4.10^{-5} \text{ N.m}$;

- Mô-men ngoại lực khung ngoài:
 $M_y = 12.10^{-5} \text{ N.m}$;

- Mô-men ngoại lực rô-to:
 $M_z = 4.10^{-5} \text{ N.m}$.

- Tốc độ quay ban đầu của rô-to:
 $\Omega_z = 30.000 \text{ vòng/phút}$.

Các thông số khối lượng, quán tính được cân đo thực tế và chuẩn hóa bằng mô hình 3D trong phần mềm Inventor.



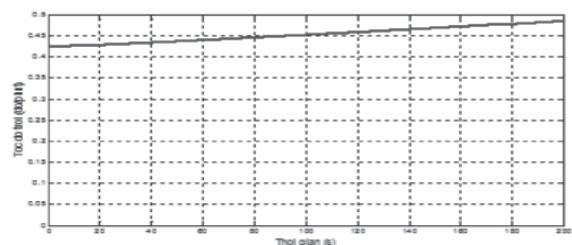
Hình 4. Xác định mô-men quán tính bằng phần mềm Inventor

Bảng 1. Các thông số khối lượng, quán tính các cụm khối con quay

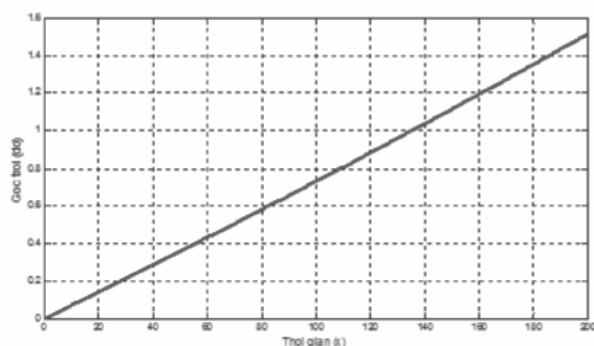
Cụm rô-to	$m_1 \text{ (g)}$	$J_{xR} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{yR} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{zR} \text{ (g.mm}^2\text{)}$
	185	50.006	32.244	32.213
Cụm khung trong	$m_2 \text{ (g)}$	$J_{xT} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{yT} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{zT} \text{ (g.mm}^2\text{)}$
	42,509	15.240,367	20.301,649	10.588,632
Cụm khung ngoài	$m_3 \text{ (g)}$	$J_{xN} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{yT} \text{ (g.mm}^2\text{)}$	$J_{zT} \text{ (g.mm}^2\text{)}$
	165	104.458	153.733	124.633

2.3.3. Một số kết quả khảo sát mô phỏng

Với bộ thông số đầu vào trên, ta tiến hành mô phỏng xác định tốc độ trôi và góc trôi con quay theo thời gian. Sau đây là một số kết quả mô phỏng:

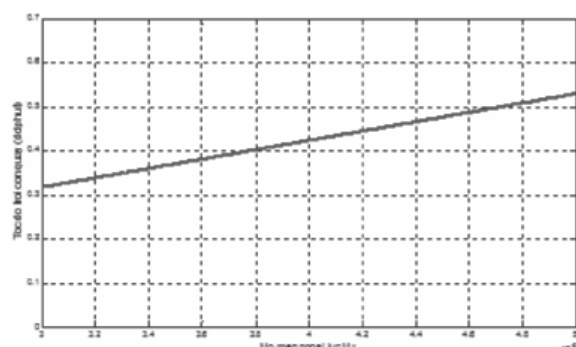


Hình 5. Kết quả mô phỏng độ trôi con quay theo thời gian



Hình 6. Kết quả mô phỏng góc trôi con quay theo thời gian

Bằng việc thay đổi các tham số đầu vào, mô hình mô phỏng cho phép đánh giá ảnh hưởng của các tham số đến độ trôi của con quay. Hình 7 thể hiện kết quả khảo sát ảnh hưởng của ma sát khung ngoài tới tốc độ trôi con quay. Nhận thấy, khi ma sát khung ngoài tăng thì độ trôi của con quay cũng tăng lên.



Hình 7. Khảo sát ảnh hưởng của mô-men ma sát tới tốc độ trôi của khung ngoài

3. PHƯƠNG PHÁP THỬ NGHIỆM XÁC ĐỊNH ĐỘ TRÔI CON QUAY

3.1. Đo độ trôi con quay bằng phương pháp quang học

Thiết bị thử nghiệm xác định độ trôi con quay bằng phương pháp quang học (hình 3) bao gồm: Bàn xoay, nguồn chiếu chùm tia laze

và màn hứng thu nhận tia phản xạ. Con quay thử nghiệm được lắp trên bàn xoay, trục con quay đồng trục với trục của bàn xoay. Khi thử nghiệm, bàn xoay được quay với vận tốc mô phỏng theo chuyển động quay của TBB. Chùm tia laze được chiếu tới gương phản xạ cố định trên khung trong của con quay. Tia phản xạ từ gương đánh dấu vị trí tương ứng trên màn chắn có tọa độ tương ứng theo các trục là Δx , Δy . Độ trôi của khung các-đăng được đo bởi độ lệch của tia laze phản chiếu từ gương lắp trên khung trong con quay lên màn hứng. Trên màn hứng, ở vị trí ban đầu khi mà con quay đang ở trạng thái khóa, chùm sáng ở vị trí 0. Sau khi tăng tốc rô-to con quay, con quay được mở khóa, vị trí chùm sáng trên màn hứng bắt đầu dịch chuyển do gương phản xạ bị lệch các góc tương ứng theo hai phương.

Các tọa độ Δx , Δy của chùm sáng trên màn chắn tỉ lệ với góc trôi của khung trong và khung ngoài con quay theo công thức lượng giác:

$$\begin{cases} \Delta x = L \sin \Delta \alpha \\ \Delta y = L \sin \Delta \beta \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, L là khoảng cách từ gương tới màn chắn.

Khi góc trôi nhỏ thì có thể lấy gần đúng:

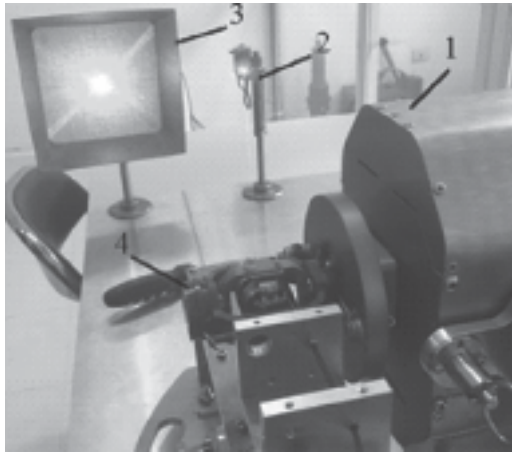
$$\begin{cases} \sin \Delta \alpha \approx \Delta \alpha; \\ \sin \Delta \beta \approx \Delta \beta; \end{cases} \quad (4)$$

Tốc độ trôi của con quay được tính bằng công thức (5):

$$\dot{\alpha} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{L \Delta t}; \quad \dot{\beta} = \frac{\Delta \beta}{\Delta t} = \frac{\Delta y}{L \Delta t} \quad (5)$$

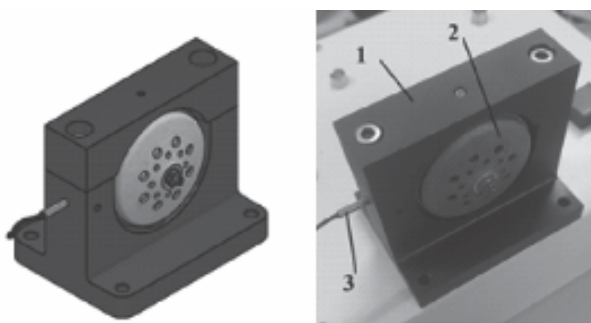
Khoảng thời gian Δt được đo bằng đồng hồ đo thời gian. Các khoảng cách Δx , Δy được xác định bằng vạch chia trên màn chắn.

Ví dụ, khi khoảng cách giữa màn chiếu và gương $L = 57,3$ mm thì một vạch chia 10 mm trên màn hứng tương ứng với góc trôi 1° .



Hình 8. Thiết bị đo độ trôi con quay bằng phương pháp quang học
1 – Bàn xoay; 2 – Đèn laze; 3 – Màn hứng;
4 – Con quay.

Việc đo tốc độ quay của rô-to con quay được tiến hành bằng cảm biến quang không tiếp xúc. Bề mặt rô-to con quay được bôi đen một phần. Khi rô-to quay, phần bề mặt đen hấp thụ ánh sáng, còn phần sáng phản chiếu ánh sáng từ cảm biến ánh sáng, đi-ốt ảnh tạo ra các xung vuông tỉ lệ với tốc độ quay của rô-to. Tần số tín hiệu từ đi-ốt được đo bằng thiết bị đo tần số. Để đo chính xác tần số, chùm sáng từ cảm biến ánh sáng phải vuông góc với mặt đầu rô-to và không có các ánh sáng khác.

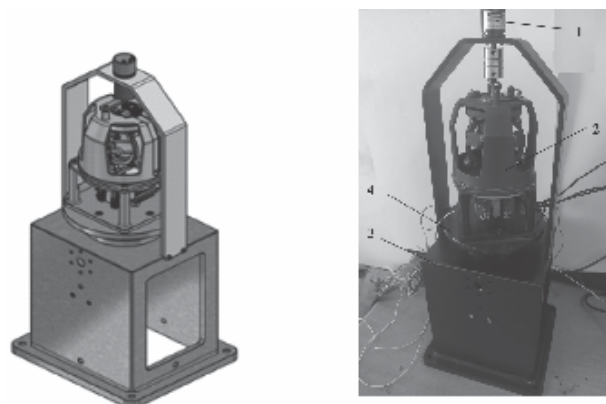


Hình 9. Thiết bị đo tốc độ rô-to
1 – Giá; 2 – Rô to; 3 – Cảm biến quang

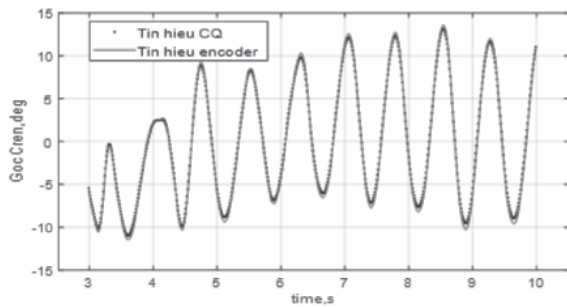
3.2. Đo độ trôi con quay bằng phương pháp đo tín hiệu điện

Thành phần thiết bị thử nghiệm xác định độ trôi con quay bằng phương pháp đo tín hiệu điện sử dụng cảm biến vị trí góc (hình 5) cho đối tượng con quay S-125 bao gồm: Giá, bộ quay, con quay, cảm biến vị trí góc (sử dụng Encoder tuyệt đối) và bộ nguồn cung cấp cho động cơ điện con quay. Con quay được gắn đồng trục trên bộ quay. Encoder được gá cố định trên giá. Trục quay Encoder gắn cố định và đồng trục với bộ quay. Bàn xoay được quay với vận tốc mô phỏng theo chuyển động quay của thiết bị bay. Khi đó, tín hiệu vị trí góc nhận được từ Encoder là vị trí góc của bộ xoay (để con quay). Độ trôi của con quay được thể hiện bằng độ lệch tín hiệu vị trí góc giữa nhận được từ cảm biến vị trí góc và tín hiệu nhận được từ cổ góp của con quay (hình 11).

Như vậy, bằng thiết bị đo độ trôi con quay, ta có thể đánh giá được độ trôi của con quay theo chỉ tiêu thiết kế.



Hình 10. Thiết bị đo độ trôi con quay bằng cảm biến vị trí góc
1 – Encoder; 2 – Con quay; 3 – Giá; 4 – Bộ quay



Hình 11. Đồ thị so sánh tín hiệu vị trí góc của con quay Encoder theo thời gian

Kết quả thử nghiệm (sau 200s có góc trôi $1,6^\circ$, độ trôi trung bình $0,5^\circ/\text{phút}$) so với kết quả tính toán áp dụng cho con quay trên tên lửa S-125 tương đối tương đồng cho thấy độ tin cậy của các phương pháp nghiên cứu.

4. KẾT LUẬN

Con quay là bộ phận quan trọng trong hệ thống điều khiển của TBB. Độ trôi của con quay ảnh hưởng trực tiếp đến độ trôi của TBB khi bay. Bài báo đã đề cập đến mô hình toán phương trình chuyển động con quay 3 bậc tự do trên TBB và phương pháp xác định độ trôi của con quay bằng phương pháp tính gần đúng, phương pháp mô phỏng số và các phương pháp thử nghiệm. Phương pháp mô phỏng số và phương pháp thử nghiệm đã áp dụng cho con quay trên tên lửa S-125 với các kết quả tương đồng cho thấy độ tin cậy của các phương pháp nghiên cứu.

Qua nghiên cứu, khảo sát, có thể chỉ ra một số nguyên nhân cơ bản ảnh hưởng đến độ trôi của con quay:

- Mô-men ma sát trong các ổ trục của khung các-đăng: Đây là nguyên nhân chính ảnh hưởng đến độ trôi con quay.

- Mô-men do mất cân bằng tĩnh và động rô-to con quay (trọng tâm rô-to không nằm trên trục quay tĩnh và động).

- Tính không đối xứng tuyệt đối của hệ con quay: Tính đối xứng tuyệt đối của hệ con quay được hiểu là điểm giao nhau của các trục quay khung các-đăng với trục quay rô-to phải trùng nhau tại một điểm và điểm đó chính là trọng tâm rô-to con quay. Đây là vấn đề rất quan trọng vì nếu trọng tâm rô-to không trùng với vị trí trên thì khi thiết bị bay chuyển động có gia tốc sẽ phát sinh mô-men ngoại lực tác động lên rô-to con quay và làm thay đổi hướng trục của nó. ❖

Ngày nhận bài: 16/9/2023

Ngày phản biện: 26/10/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Phú Thắng; “Xây dựng chương trình mô phỏng phương trình chuyển động của con quay thiết bị bay chống tăng B-72”; Tuyển tập các công trình khoa học tại Hội nghị “Cơ học và điều khiển thiết bị bay 2016”; Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự. Đặc san 09-2016, tr 191-198.
- [2]. Брозгудъ Г.Д., “Теория и конструкция гироскопических приборов и систем”, Изд. “Высшая Школа”, Москва, 1981.
- [3]. Пельпор Д.С., “Гироскопические Системы, Теория гироскопов и гиросtabilизаторов”, Изд. “Высшая Школа”, Москва, 1986.
- [4]. Лысов А.Н, Виниченко Н.Т, Лысова А.А., “Прикладная теория гироскопов”. Изд. “Машиностроение”, Москва, 2009.