

Phân tích động học ngược mô hình bộ phóng trên tàu biển

Trần Xuân Diệu*

Viện Tên lửa/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

*Email: xuandieuvtl@gmail.com

Nhận bài: 17/3/2022; Hoàn thiện: 25/4/2022; Chấp nhận đăng: 29/4/2022; Xuất bản: 28/6/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.80.2022.149-155>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu động học ngược của mô hình bộ phóng trên tàu biển (BPT) được ổn định góc tầm và góc hướng. Sử dụng mô hình này ta sẽ xác định được quy luật của các góc trục tầm và góc trục hướng của bộ phóng. Các quy luật này làm cơ sở cho việc thiết kế bộ điều khiển và thiết kế cơ khí loại bộ phóng này.

Từ khoá: Góc lắc ngang; Góc lắc dọc; Lắc đứng; Góc trục tầm; Góc trục hướng.

1. MỞ ĐẦU

Do BPT được lắp trên tàu biển nên luôn chịu sự tác động của dao động từ sóng biển, để vật được phóng đáp ứng được các yêu cầu về tầm và hướng thì phải được ổn định góc tầm và góc hướng dưới tác động của 3 chuyển động của tàu bao gồm chuyển động lắc ngang, lắc dọc và lắc đứng [1]. Để đánh giá tính khả thi của việc thiết kế bộ điều khiển và cơ khí cho BPT, cần đi giải mô hình động học ngược của bộ phóng với điều kiện là góc phóng và hướng phóng luôn không đổi dưới các tác động lắc của sóng biển. Khi đó, có thể xác định được các quy luật của góc trục tầm và góc trục hướng mà cơ cấu chấp hành phải thỏa mãn.

Các công trình [2, 3] đã đi xây dựng mô hình động học thuận của bộ phóng 6 bậc tự do có thể ứng dụng cho rất nhiều bộ phóng khác nhau, tuy nhiên, mô hình động lực học ngược ổn định góc tầm và góc hướng cho bộ phóng chưa được đề cập. Dựa trên kết quả của các công trình này, mô hình động học ngược tiếp tục được nghiên cứu ở đây. Mô hình động học cũng là cơ sở cho việc xây dựng mô hình động lực học của BPT ở các công trình tiếp theo. Mục 2 dưới đây sẽ đi xây dựng ràng buộc động học của bộ phóng, dưới các giả thiết khác nhau các quy luật của góc trục tầm và góc trục hướng được xác định. Ở mục 3, các kết quả nghiên cứu ở mục 2 sẽ được áp dụng cho một mô hình BPT đã thiết kế được đặt trên một loại tàu nhất định trên mô hình sóng cấp 3 và các kết quả cũng được đánh giá và thảo luận chi tiết ở mục này.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC VÀ ĐỘNG HỌC NGƯỢC CỦA BỘ PHÓNG

2.1. Mô hình động học của bộ phóng

Các giả thiết thiết lập mô hình toán

Khi xây dựng mô hình động học của bộ phóng sử dụng các giả thiết sau:

- Chỉ xét đến ba dao động chính của tàu là lắc ngang, lắc dọc và lắc đứng;
- Sàn tàu, đế bệ, ray dẫn hướng và vật phóng được coi là khối tuyệt đối cứng. Khớp liên kết giữa các vật chuyển động tương đối với nhau là không biến dạng. Do ray dẫn hướng và vật phóng được gắn cứng với nhau trong quá trình điều khiển nên coi ray dẫn hướng và vật phóng là một;
- Do bộ phóng có khối lượng nhỏ hơn nhiều so với tàu nên coi chuyển động của các thành phần bộ phóng không ảnh hưởng đến tàu. Như vậy, bộ phóng chịu quá tải cưỡng bức do tàu tác động;
- Ở trạng thái ban đầu mặt nước tĩnh, ray dẫn hướng đã nghiêng so với mặt nước biển α_0 , góc này tương ứng là góc phóng đối với bộ phóng trên mặt đất.

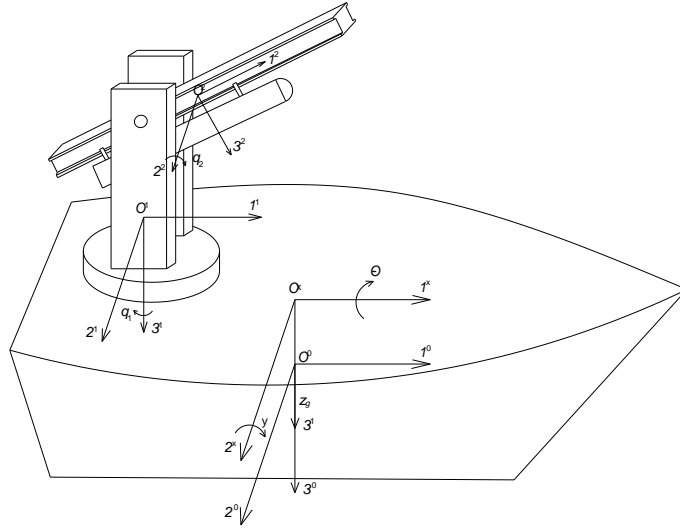
Trên cơ sở các giả thiết trên, đề tài đi xây dựng mô hình động học cho mô hình cơ hệ tàu – bộ phóng – tên lửa.

Mô hình cơ hệ

BPT được bố trí trên tàu được coi là một cơ hệ 2 bậc tự do có mô hình hình học được thể hiện ở hình 1, bao gồm:

Vật 1: Thân bệ và các chi tiết gắn cứng với thân bệ.

Vật 2: Ray dẫn hướng và các chi tiết gắn cứng với ray dẫn hướng.



Hình 1. Mô hình cơ hệ của bệ phóng và hệ tọa độ.

Các hệ tọa độ

Các hệ tọa độ để xây dựng mô hình toán được thể hiện ở hình 1 bao gồm:

- Hệ tọa độ cố định $R^0 = \{O^01^02^03^0\}$, mặt phẳng $O^01^02^0$ trùng với mặt phẳng đường nước không bị kích động, trục O^03^0 hướng thẳng đứng từ trên xuống dưới. Khi tàu nằm ở vị trí cân bằng, trục O^03^0 đi qua khối tâm tàu, trục O^01^0 song song với trục dọc của tàu.

- Hệ tọa độ liên kết gắn với tàu $R^x = \{O^x1^x2^x3^x\}$, gốc tọa độ O^x đặt tại khối tâm của tàu, mặt phẳng $O^x1^x2^x$ song song với sàn tàu. Trục O^x1^x hướng dọc theo mũi tàu.

- Hệ tọa độ liên kết gắn với thân bệ $R^1 = \{O^11^12^13^1\}$, gốc tọa độ O^1 đặt tại khối tâm của thân bệ, trục O^13^1 trùng với trục quay của góc hướng và hướng xuống. Mặt phẳng $O^11^13^1$ trùng với mặt đối xứng của thân bệ.

- Hệ tọa độ liên kết gắn với ray dẫn hướng $R^2 = \{O^21^22^23^2\}$, gốc tọa độ O^2 đặt tại khối tâm của ray dẫn hướng, trục O^21^2 trùng với trục dọc của ray và hướng về trước. Mặt phẳng $O^21^23^2$ trùng với mặt đối xứng của ray.

Tọa độ suy rộng và số bậc tự do của cơ hệ

Cơ hệ có 2 bậc tự do gồm:

- Một bậc tự do là chuyển động quay quanh trục O^13^1 của thân bệ, là góc trục hướng q_1 ;
- Một bậc tự do là chuyển động quay quanh trục O^22^2 của ray dẫn hướng, là góc trục tầm tầm q_2 ;

Như vậy, véc tơ tọa độ suy rộng của hệ sẽ là: $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2]^T$.

Thiết lập các ràng buộc động học của cơ hệ

Theo tài liệu [4], các ma trận cosin chỉ hướng được xác định như sau:

- Ma trận cosin chỉ hướng R_{x0} chuyển từ R^x sang R^0 .

Ở đây, sử dụng 2 phép quay liên tiếp để đưa R^x thành R^0 với thứ tự quay như sau:

+ Quay quanh trục O^x1^x góc θ , ta có ma trận cosin chỉ hướng là:

$$R_{1x0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

+ Quay quanh trục O^x2^x góc ψ , ta có ma trận cosin chỉ hướng là:

$$R_{2x0} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Do đó, ta được:

$$R_{x0} = R_{2x0}R_{1x0} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

- Ma trận cosin chỉ hướng R_{1x} chuyển từ R^1 sang R^x .

Thực hiện phép quay quanh trục O^13^1 một góc q_1 ta có thể đưa hệ R^1 sang R^x , do đó, ta được ma trận cosin chỉ hướng:

$$R_{1x} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- Ma trận cosin chỉ hướng R_{10} chuyển từ R^1 sang R^0 sẽ là:

$$R_{10} = R_{x0}R_{1x} \quad (5)$$

- Ma trận cosin chỉ hướng R_{21} chuyển từ R^2 sang R^1 :

Thực hiện phép quay quanh trục O^22^2 một góc q_2 ta có thể đưa hệ R^2 sang R^1 , do đó, ta được ma trận cosin chỉ hướng:

$$R_{21} = \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \alpha_0) & 0 & \sin(q_2 + \alpha_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q_2 + \alpha_0) & 0 & \cos(q_2 + \alpha_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

- Ma trận cosin chỉ hướng R_{20} chuyển từ R^2 sang R^0 sẽ là:

$$R_{20} = R_{10}R_{21} \quad (7)$$

Như vậy, dựa vào các phép biến đổi liên tiếp từ (1) đến (7), tư thế của các vật 1 và vật 2 hoàn toàn được xác định trong không gian.

2.2. Phân tích động học ngược vị trí

Để xác định được các quy luật của q_1 và q_2 với yêu cầu là góc ray dẫn hướng (vật 2) luôn ổn định ở một tư thế nào đó trong không gian, thực chất là đi giải bài toán động học ngược của cơ hệ. Để ray dẫn hướng luôn ổn định một tư thế trong không gian thì điều kiện cần và đủ là một véc tơ gắn với ray dẫn hướng luôn có phương cố định trong hệ tọa độ cố định.

Không mất tính tổng quát, giả thiết rằng véc tơ đơn vị của trục O^21^2 của hệ tọa độ R^2 (hệ tọa độ gắn với ray dẫn hướng) luôn có phương song song với một véc tơ cố định nghiêng góc α_0 so với trục O^01^0 trong mặt phẳng $O^01^03^0$ của hệ tọa độ R^0 (hệ tọa độ cố định).

Véc tơ đơn vị của trục O^21^2 trong hệ quy chiếu R^2 là:

$$\mathbf{e}_1^{(2)} = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

Khi đó, véc tơ này trong hệ tọa độ cố định sẽ là:

$$\mathbf{u}_1^{(0)} = \mathbf{R}_{20}\mathbf{e}_1^{(2)} \quad (9)$$

Biến đổi ta được:

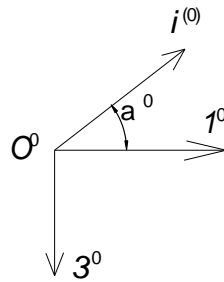
$$\mathbf{u}_1^{(0)} = \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \alpha_0) \sin q_1 \sin \psi \sin \theta - \sin \psi \cos \theta \sin(q_2 + \alpha_0) + \cos(q_2 + \alpha_0) \cos q_1 \cos \psi \\ \cos \theta \sin q_1 \cos(q_2 + \alpha_0) + \sin \theta \sin(q_2 + \alpha_0) \\ \cos(q_2 + \alpha_0) \sin q_1 \sin \theta \cos \psi - \cos \psi \cos \theta \sin(q_2 + \alpha_0) - \cos(q_2 + \alpha_0) \cos q_1 \sin \psi \end{bmatrix} \quad (10)$$

Giả sử $\mathbf{i}^{(0)}$ là một véc tơ xác định trong hệ tọa độ \mathbf{R}^0 , có độ lớn bằng 1, nghiêng so với trục O^01^0 một góc α_0 như thể hiện ở hình 2, khi đó véc tơ sẽ là:

$$\mathbf{i}^{(0)} = [\cos \alpha_0 \ 0 \ -\sin \alpha_0]^T \quad (11)$$

Điều kiện cần và đủ để tên lửa luôn đảm bảo một góc cố định trong không gian là véc tơ $\mathbf{u}_1^{(0)}$ phải cộng tuyến với véc tơ $\mathbf{i}^{(0)}$ do đó, thiết lập được hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1^{(0)}(3) = -\tan \alpha_0 \mathbf{u}_1^{(0)}(1) \\ \mathbf{u}_1^{(0)}(2) = 0 \end{cases} \quad (12)$$



Hình 2. Biểu diễn véc tơ $\mathbf{i}^{(0)}$ trong hệ tọa độ \mathbf{R}^0 .

Hệ phương trình (12) là hệ 2 phương trình đại số có 2 biến là q_1 và q_2 , khi cho trước các giá trị của các góc lắc ngang θ và lắc dọc ψ ta hoàn toàn có thể xác định được các giá trị của các góc của trục hướng q_1 và góc trục tầm q_2 .

Đối với các trường hợp sóng không lớn hơn cấp 3, các góc lắc ngang θ và góc lắc dọc ψ lớn cỡ khoảng 10^0 , do đó, các q_1 và q_2 cũng nằm trong giới hạn này, với giai đoạn nghiên cứu sơ bộ có thể đơn giản trong tính toán có thể sử dụng phép xấp xỉ:

$$\sin q_{1,2} \approx q_{1,2}; \cos q_{1,2} \approx 1; q_1 q_2 \approx 0; \sin \psi \approx \psi, \sin \theta \approx \theta, \cos \psi \approx 1, \cos \theta \approx 1 \quad (13)$$

Với cách tiếp cận này, giải hệ (12) và được kết quả như sau:

$$q_1 = \frac{\theta(\psi \cos \alpha_0 - \sin \alpha_0)}{(\psi \theta^2 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 + \theta^2 \cos^2 \alpha_0 + 1) \cos \alpha_0} \quad (14)$$

$$q_2 = \frac{\psi \theta^2 \cos^2 \alpha_0 - \theta^2 \cos \alpha_0 \sin \alpha_0 - \psi \theta^2 - \psi}{\psi \theta^2 \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 + \theta^2 \cos^2 \alpha_0 + 1} \quad (15)$$

Vận tốc góc trục hướng và trục tầm được xác định theo công thức:

$$\omega_{1,2} = \frac{dq_{1,2}}{dt} \quad (16)$$

Công thức (16) cho phép tính toán được vận tốc góc ở khâu cuối và thông qua hộp số có thể xác định được vận tốc quay đầu trục động cơ, làm cơ sở để lựa chọn động cơ phù hợp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thông số đầu vào

Mô hình động học ngược của bộ phóng đặt trên tàu được xây dựng ở mục 2.1 có thể sử dụng cho các các loại bộ phóng khác nhau. Trường hợp áp dụng ở mục này là bộ phóng đặt trên tàu CV-01 với góc phóng (góc tầm) luôn giữ ổn định là 50^0 và luôn hướng về phía mục tiêu, đây là trường hợp điển hình để các vật bay đạt được tầm bắn lớn nhất khi phóng. Tàu hoạt động trong điều kiện sóng biển cấp 3 đây là trường hợp được xác định phục vụ cho tính toán thiết kế sơ bộ của bộ phóng và với cấp độ sóng này có thể áp dụng được các công thức (13-15).

Bảng 1. Các thông số kết cấu và thủy động học tàu.

TT	Tên thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Lượng chiếm nước	D	85000	T
2	Trọng lượng riêng của nước biển	γ	10250	N/m ³
3	Thể tích chiếm nước	V	82,93	m ³
4	Chiều dài lớn nhất	L_{max}	12,16	m
5	Chiều dài đường nước thiết kế	L_{KW}	10,9	m
6	Chiều rộng tàu	B	3,13	m
7	Chiều cao tàu	H	1,5	m
8	Mớn nước	T	0,58	m
9	Diện tích mặt đường nước	A_W	28,9	m ²
10	Diện tích phần chìm của sườn giữa tàu	A_M	0,9	m ²
11	Hệ số béo thể tích	C_B	0,42	
12	Hệ số béo đường nước	C_W	0,85	
16	Chiều cao trọng tâm tàu	z_g	0,9	m

Theo tài liệu [6], các thông số kết cấu và thủy động của tàu được đưa ra ở bảng 1. Mô hình sóng biển cấp 3 có chiều cao sóng trung bình 1,25 m; bước sóng trung bình 15,24 m; chu kỳ sóng trung bình 4,25 s [5]. Dựa vào các mô hình toán mô tả các dao động của tàu trên sóng biển đã được trình bày ở các tài liệu [3, 6, 7], ta xác định được các chuyển động lắc của tàu CV-01 nổi trên sóng cấp 3 được đưa ra ở bảng 2.

3.2. Kết quả tính toán

Với bộ thông số đầu vào đã được xác định như ở 3.1, sử dụng phần mềm Matlab R2012b, hoàn toàn có thể tính toán được các quy luật của góc trục hướng và góc trục tầm cũng như vận tốc quay của nó dựa vào mô hình động học đã xây dựng ở mục 1.

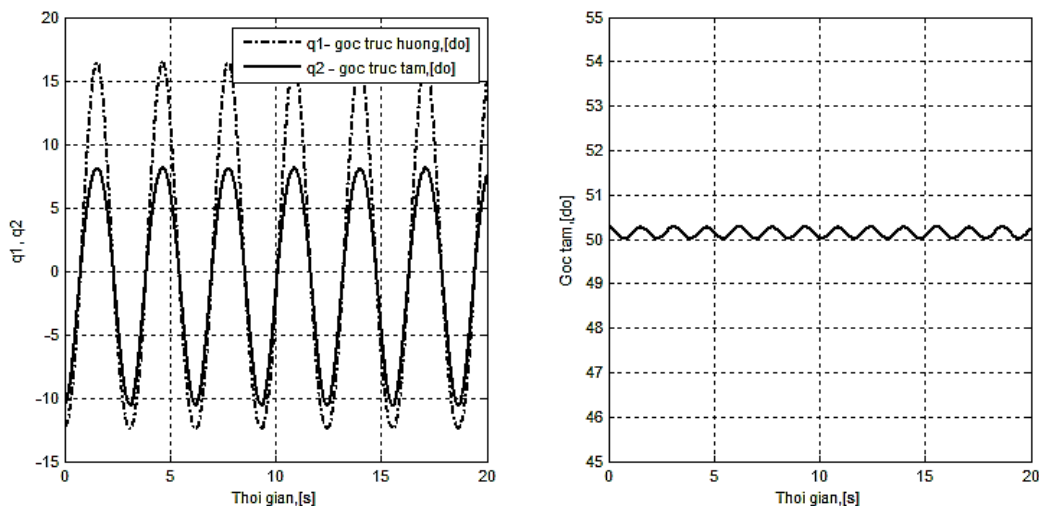
Với thời gian mô phỏng là 20 s, các góc trục hướng và trục tầm của bộ phóng thể hiện ở hình 3 cho thấy rằng để ổn định được góc tầm và góc hướng thì góc trục hướng phải dao động với biên độ $16,4^0$ với chu kỳ 3,1 s, trong khi đó, góc trục tầm phải dao động với biên độ lớn nhất là $8,1^0$ với chu kỳ 3,1 s. Kết quả này cho thấy rằng để bộ phóng có thể ổn định được trên sóng cấp 3 góc trục hướng và góc trục tầm phải được thiết kế lớn hơn các giá trị này. Mô phỏng cũng cho thấy góc tầm luôn ổn định trong thời gian mô phỏng, điều này cũng cho thấy tính toán là tin cậy.

Kết quả thể hiện ở hình 4 cho thấy rằng để đảm bảo bộ phóng có thể ổn định được trên sóng cấp 3 thì vận tốc góc trục hướng lớn nhất phải có giá trị tối thiểu lớn hơn $30,6^0/s$ và vận tốc góc trục tầm lớn nhất phải có giá trị tối thiểu lớn hơn $19,4^0/s$. Theo tài liệu [8], cơ cấu chấp hành của các bộ phóng có thể được thiết kế đáp ứng với góc trục hướng đến $90^0/s$ và góc trục tầm đến

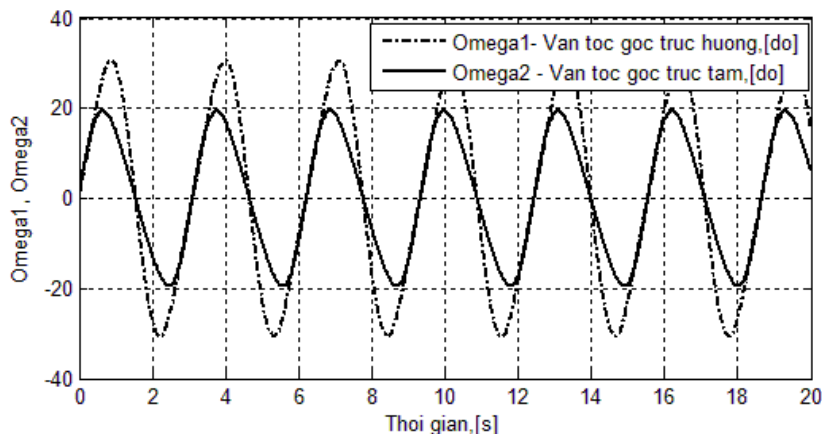
60°/s, do vậy, các kết quả này cho thấy là hoàn toàn có thể thiết kế được bộ điều khiển của bộ phóng và nó cũng là cơ sở cho các thiết kế sơ bộ phần cơ khí của bộ phóng.

Bảng 2. Bảng các thông số dao động của tàu trên sóng cấp 3.

	Lắc ngang	Lắc dọc	Lắc đứng
Chu kỳ lắc trung bình	3,1 s	3,1 s	2,2 s
Biên độ lắc lớn nhất	12,3°	9,3°	0,56 m



Hình 3. Quy luật của góc trục hướng, góc trục tâm và góc tâm.



Hình 4. Vận tốc góc trục hướng và trục tâm.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được cơ sở lý thuyết mô hình động học ngược của bộ phóng ổn định góc tâm và góc hướng trên tàu biển. Sử dụng mô hình này cho một bộ phóng ổn định góc tâm 50° và góc hướng luôn ổn định, được bố trí trên tàu trong điều kiện sóng cấp 3 cho thấy rằng góc trục hướng phải dao động với biên độ 16,4° với chu kỳ 3,1 s, trong khi đó góc trục tâm phải dao động với biên độ lớn nhất là 8,1° với chu kỳ 3,1 s; vận tốc góc trục hướng lớn nhất phải có giá trị tối thiểu lớn hơn 30,6°/s và vận tốc góc trục tâm lớn nhất phải có giá trị tối thiểu lớn hơn 19,4°/s. Các kết quả này cho thấy tính khả thi của việc bố trí bộ phóng trên tàu ở sóng không quá cấp 3, làm cơ sở cho việc thiết kế bộ điều khiển cũng như thiết kế cơ khí cho bộ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Yanpeng Dong, “*Dynamic simulation of shipborne vertical Launching System*”, International Conference on Education, Management and Computing Technology, pp. 422-426, (2018).
- [2]. Phan Văn Chương, “*Khảo sát ảnh hưởng của các bộ giảm chấn đa chiều đến quá tải tác dụng lên tên lửa đối hải lắp trên tàu hải quân*”, Tuyển tập công trình hội nghị cơ học kỹ thuật toàn quốc, tr. 15-20, (2014).
- [3]. Tăng Xuân Long, “*Xây dựng bài toán động lực học phóng tên lửa KH35-E trên tàu hải quân*”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số 21, tr. 37-48, (2012).
- [4]. Ahmed A. Shabana, “*Computational Dynamics*”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 95-150, (2001).
- [5]. <http://www.vncold.vn>
- [6]. Tăng Xuân Long, “*Về một giải pháp xác định nội lực liên kết các khâu của bộ phóng vũ khí phá vật cản FMV-T2-HQ đặt trên xuống CV-01*”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số Đặc san Cơ học và Điều khiển thiết bị bay, tr. 184-190, (2021).
- [7]. Nguyễn Lạc Hồng, “*Khảo sát dao động lắc của tàu hải quân khi bắn tên lửa rải nhiễu PK-16*”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số 52, tr. 247-255, (2014).
- [8]. Nguyễn Trung Kiên, Lê Trần Thắng, “*Pháo phòng không tầm thấp 37mm-2N đánh đêm bán tự động-Thuyết minh kỹ thuật và hướng dẫn sử dụng*”, NXB QĐND (2017).

ABSTRACT

Inverse kinematic analysis of the shipborne launcher

In this paper, the reverse kinematic model of the shipborne launcher with the stabilized elevation and azimuth angle is investigated. These results are motion laws of the elevation and azimuth shaft angle determined. These rules are the basis for the design of the controller and the mechanical design of this type of launcher.

Keywords: Roll angle; Pitch angle; Heave translation; Elevation shaft angle; Azimuth shaft angle.