

## Nghiên cứu dao động của xe bộ phóng trên nền đàn hồi

Trần Xuân Diệu\*, Nguyễn Xuân Thành

Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

\*Email: xuandieuvtl@gmail.com

Nhận bài: 17/11/2023; Hoàn thiện: 09/01/2024; Chấp nhận đăng: 15/01/2024; Xuất bản: 25/02/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.93.2024.146-154>

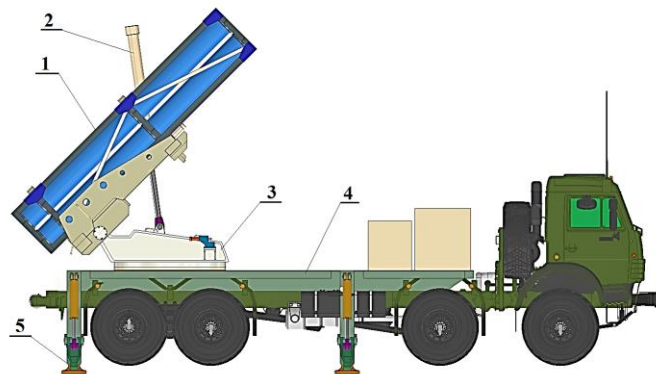
### TÓM TẮT

Trong bài báo, mô hình động lực học của xe bộ phóng trên nền đàn hồi được thiết lập sử dụng phương trình Lagrange II. Sử dụng mô hình này cho một cấu hình xe bộ phóng nhất định, các quy luật dao động của các chuyển động của xe và của bộ phóng được xác định. Qua đó, bước đầu đánh giá được tính khả thi của mô hình kết cấu của xe và bộ phóng được nghiên cứu. Mô hình động lực học được xây dựng có thể sử dụng cho việc thiết kế kết cấu và tối ưu phát bắn cho một lớp các bộ phóng cùng nguyên lý kết cấu.

**Từ khoá:** Xe bộ phóng; Lắc ngang; Lắc dọc; Dịch chuyển đứng; Góc tâm; Góc hướng.

### 1. MỞ ĐẦU

Bộ phóng được bố trí trên xe như được thể hiện ở hình 1, trong quá trình thực hiện phát bắn dưới tác động của lực hãm để tăng sơ tốc đạn cùng với sự thay đổi trọng tâm của cơ hệ sẽ làm cho xe và bộ phóng dao động dẫn đến giảm độ chính xác phát bắn. Để tăng độ cứng vững và ổn định cho bộ phóng, xe thường bố trí thêm các hệ thống tăng ổn định gồm bốn chân chống thủy lực. Tuy nhiên, vì nền cũng có tính đàn hồi tương tác với phần tử đàn hồi của bộ phóng làm cho xe bộ phóng ít nhiều vẫn dao động ảnh hưởng đến chất lượng phát bắn. Hệ thống thủy lực của kênh tầm thường bố trí thêm bình tích áp thủy lực để bù áp dẫn đến xi lanh thủy lực có tính đàn hồi.



**Hình 1.** Mô hình xe bộ phóng trên nền đàn hồi:

1. Khối ống phóng; 2. Xi lanh thủy lực kênh tầm; 3. Đé bệ; 4. Xe; 5. Chân chống.

Xây dựng mô hình toán của cơ hệ xe bộ phóng trên nền đàn hồi là cần thiết để thấy được tác động của nền cũng như phần tử đàn hồi lên các chuyển động của bộ phóng, qua đó bước đầu đánh giá được sự hợp lý trong kết cấu của xe bộ phóng ở giai đoạn thiết kế sơ bộ.

Mô hình động lực học xe bộ phóng được quan tâm khá nhiều hiện nay. Các công trình theo hướng nghiên cứu này tập trung vào xây dựng mô hình toán của bộ phóng trên các phương tiện khác nhau. Các công trình [1-3] đã đi xây dựng mô hình động lực học của dàn phóng đặt trên xe bánh lốp sử dụng phương trình Lagrange II để xây dựng mô hình toán. Qua đó, dao động của các chuyển động của xe và bộ phóng được đánh giá cùng với những đo đạc thực nghiệm để đánh giá tính chính xác của mô hình toán. Tuy nhiên, do trong quá trình bắn xe không sử dụng chân chống nên tác động của nền lên dao động của hệ không được kể đến.

Các công trình [4-6] nghiên cứu dao động của các bộ phóng tên lửa được đặt trên các phương tiện mang cỡ nhỏ có tính cơ động cao. Các chuyển động của xe và bộ phóng trong mặt phẳng bán được tập trung nghiên cứu. Phương trình Lagrange II được sử dụng để xây dựng cho mô hình toán phẳng. Ở mức độ dao động nhỏ, kết quả của các mô hình này cho thấy sự tin cậy khi nghiên cứu các dao động trong mặt phẳng bán.

Công trình [7] nghiên cứu dao động của xe bộ phóng có kết cấu chân chống tương đồng với đối tượng mà trong bài báo nghiên cứu. Mô hình toán được xây dựng có kể đến tác động của nền lên các chuyển động của bộ. Biểu dạng đàn hồi của ray phóng được kể đến. Đây là công trình công phu với việc khảo sát với một loạt các thông số đầu vào để đánh giá tác động của chúng đến các chuyển động của bộ phóng, qua đó đánh giá tính ổn định động của bộ phóng. Tuy nhiên, mô hình chưa bổ sung các phần tử giảm chấn và không kể đến đặc tính đàn hồi và giảm chấn của hệ thống thủy lực kênh tầm.

Nghiên cứu tổng quan các công trình đã được đưa ra ở trên cho thấy các mô hình động lực học được thiết lập cho các mô hình xe bộ phóng chưa thực sự phù hợp khi chỉ nghiên cứu chuyển động phẳng hoặc không kể đến tính đàn hồi và giảm chấn của hệ thống thủy lực. Mô hình toán cho mô hình xe bộ phóng của bài báo sẽ được thiết lập sử dụng phương trình Lagrange II khi kể đến tính chất đàn hồi của nền, của hệ thống thủy lực và các chuyển động không gian phức tạp. Các nội dung được thực hiện tuần tự như sau: ở mục 2 dưới đây sẽ đi xây dựng ràng buộc động học và thiết lập mô hình động lực học của mô hình xe bộ phóng và ở mục 3, các kết quả nghiên cứu ở mục 2 sẽ được áp dụng cho một mô hình xe bộ phóng đã thiết kế sơ bộ để thấy được các dao động của các chuyển động của bộ. Qua đó, tính khả thi của thiết kế này được xác định và có thể sử dụng mô hình động lực học này để thiết kế kết cấu và tối ưu phát bắn cho một lớp các bộ phóng cùng nguyên lý kết cấu.

## **2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC XE BỘ PHÓNG**

### **2.1. Mô hình động học của xe bộ phóng**

*Các giả thiết thiết lập mô hình toán*

Chỉ xét đến ba dao động chính của xe là lắc ngang (lắc theo trục dọc xe), lắc dọc (lắc theo trục vuông góc mặt phẳng đối xứng xe) và dịch chuyển đứng (dịch chuyển theo phương vuông góc với mặt đất) vì thực tế cho thấy các phương khác thường rất nhỏ; sàn xe, đế bộ, khối phóng và đạn được coi là khối tuyệt đối cứng; trước khi phóng, đạn được giữ trên khối ống phóng bằng bu lông hãm; bỏ qua lực ma sát giữa đạn và ống phóng; Khi đã lấy được phần tử bắn coi đế bộ và xe là một vật; không tính đến sự phân bố của các ống phóng.

*Mô hình cơ hệ*

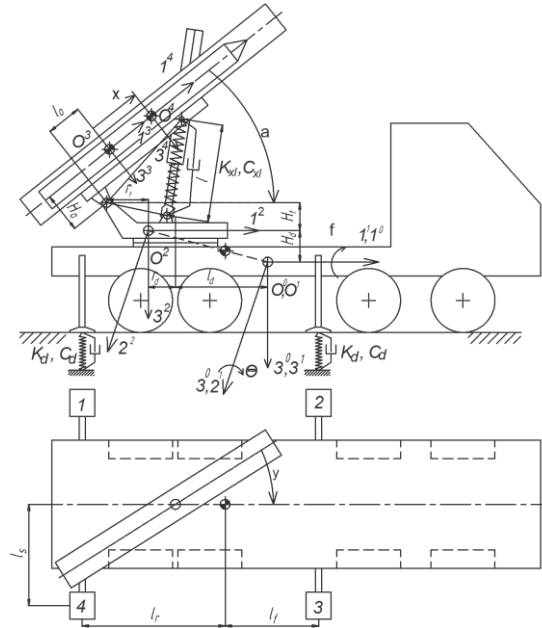
Xe bộ phóng được coi là một cơ hệ gồm 5 toạ độ suy rộng với mô hình hình học được thể hiện ở hình 2, bao gồm 3 vật rắn: vật 1 là đế bộ (khi đã ở góc hướng xác định) và xe cùng các chi tiết gắn cứng với chúng; vật 2 là khối ống phóng và các chi tiết gắn cứng với nó; vật 3 là đạn và các chi tiết gắn cứng với nó.

*Các hệ toạ độ*

Các hệ toạ độ được thể hiện ở hình 2 bao gồm: Hệ toạ độ cố định  $R^0 = \{O^01^02^03^0\}$ ; hệ toạ độ liên kết gắn liền với xe  $R^1 = \{O^11^12^13^1\}$ ; hệ toạ độ liên kết gắn liền với đế bộ  $R^2 = \{O^21^22^23^2\}$ ; hệ toạ độ liên kết gắn liền với khối ống phóng  $R^3 = \{O^31^32^33^3\}$ ; hệ toạ độ liên kết gắn liền với đạn  $R^4 = \{O^41^42^43^4\}$  với gốc toạ độ của hệ toạ độ liên kết gắn với khối tâm các vật.

*Toạ độ suy rộng của cơ hệ*

Cơ hệ có 5 toạ độ suy rộng:  $\mathbf{q} = [z_c \varphi \theta \alpha \xi]^T$ . Trong đó:  $z_c$  – Dịch chuyển đứng của xe;  $\varphi$  – Lắc ngang của xe;  $\theta$  – Lắc dọc của xe;  $\alpha$  – Góc giữa trục khối ống phóng với mặt phẳng  $O^21^22^2$  của hệ toạ độ  $R^2$ ;  $\xi$  – Lượng dịch chuyển của đạn trong ống phóng.



**Hình 2.** Mô hình cơ hệ của xe bệ phóng và hệ tọa độ.

Xác định ma trận cosin chỉ hướng

$$\mathbf{R}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \sin \theta \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta \\ 0 & 1 & -\varphi \\ -\theta & \varphi & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{20} = \mathbf{R}_{10} \mathbf{R}_{21}; \mathbf{R}_{30} = \mathbf{R}_{20} \mathbf{R}_{32}; \mathbf{R}_{40} = \mathbf{R}_{30}$$

$$\mathbf{R}_{21} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_{32} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$
(1)

Xác định tọa độ khối tâm của các vật trong hệ quy chiếu cố định

- Tọa độ khối tâm của xe trong hệ tọa độ cố định:  $\mathbf{r}_{10} = [0, 0, z_c]^T$
- Tọa độ của khối tâm đế bệ trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^1$ :  $\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_{2p} + \mathbf{R}_{21} \mathbf{u}_2$ . Trong đó,  $\mathbf{r}_{2p} = [-l_d, 0, -H_d]^T$  và  $\mathbf{u}_2 = [-r_d, 0, 0]^T$ .
- Tọa độ của khối tâm đế bệ trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^0$ :  $\mathbf{r}_{20} = \mathbf{r}_{10} + \mathbf{R}_{10} \mathbf{r}_{21}$ .
- Tọa độ khối tâm của xe và đế bệ là:  $\mathbf{r}_{xd} = (m_x \mathbf{r}_{10} + m_d \mathbf{r}_{21}) / m_{xd}$ . Trong đó,  $m_x$  là khối lượng của xe,  $m_d$  là khối lượng của đế bệ.
- Tọa độ của khối tâm khối ống phóng trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^2$ :  $\mathbf{r}_{32} = \mathbf{r}_{3p} + \mathbf{R}_{32} \mathbf{u}_3$ . Trong đó,  $\mathbf{r}_{3p} = [-r_t, 0, -H_t]^T$  và  $\mathbf{u}_3 = [l_0, 0, -H_0]^T$ .
- Tọa độ khối tâm khối ống phóng trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^0$ :  $\mathbf{r}_{30} = \mathbf{r}_{20} + \mathbf{R}_{20} \mathbf{r}_{32}$ .
- Tọa độ khối tâm đạn trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^0$ :  $\mathbf{r}_{40} = \mathbf{r}_{30} + \mathbf{R}_{30} \mathbf{r}_{43}$ . Trong đó,  $\mathbf{r}_{43} = [\xi, 0, 0]^T$ .

Xác định vận tốc dài của tâm khối các vật

Vận tốc của các vật là:  $\mathbf{v}_{xd} = \dot{\mathbf{r}}_{xd}$ ;  $\mathbf{v}_{op} = \dot{\mathbf{r}}_{30}$  và  $\mathbf{v}_{tl} = \dot{\mathbf{r}}_{40}$

*Xác định vận tốc góc của các vật*

- Toán tử sóng của véc tơ vận tốc góc của xe và đế bệ; của khối ống phóng trong  $\mathbf{R}^0$ :

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{xd} = \dot{\mathbf{R}}_{10} \mathbf{R}_{10}^T; \quad \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{op} = \dot{\mathbf{R}}_{30} \mathbf{R}_{30}^T \quad (2)$$

- Khi đó, vận tốc góc của xe và đế bệ; của khối ống phóng trong  $\mathbf{R}^0$ :

$$\boldsymbol{\omega}_{xd} = [-\tilde{\omega}_{xd}(2,3), \tilde{\omega}_{xd}(1,3), \tilde{\omega}_{xd}(1,2)]^T; \quad \boldsymbol{\omega}_{op} = [-\tilde{\omega}_{op}(2,3), \tilde{\omega}_{op}(1,3), \tilde{\omega}_{op}(1,2)]^T \quad (3)$$

- Vận tốc góc của đạn trong trong hệ tọa độ  $\mathbf{R}^0$  như sau:  $\boldsymbol{\omega}_{tl} = \boldsymbol{\omega}_{op}$ .

## 2.2. Mô hình động lực học của xe bệ phóng

Sử dụng phương trình Lagrange II để thiết lập hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cơ hệ, theo [8] phương trình Lagrange II đối với một cơ hệ được viết dưới dạng:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T - \left( \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} \right)^T = \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{Q}_d(\mathbf{q}) + \mathbf{Q}_n(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{Q}_{xl}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{Q}_f \quad (4)$$

Trong đó:  $T$  - Động năng của cơ hệ;  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$  - Lực suy rộng của trọng lực;  $\mathbf{Q}_d(\mathbf{q})$  - Lực suy rộng của lực đàn hồi nền;  $\mathbf{Q}_n(\dot{\mathbf{q}})$  - Lực suy rộng của lực cản nhớt nền;  $\mathbf{Q}_{xl}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  - Lực suy rộng của lực đàn hồi và lực cản nhớt xi lanh kênh tâm;  $\mathbf{Q}_f$  - Lực suy rộng của lực đẩy động cơ.

Theo [9], với dạng ma trận mới của phương trình Lagrange II, về trái (4) đưa về dạng sau:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T - \left( \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} \right)^T = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \quad (5)$$

Trong đó,  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  là ma trận khối lượng suy rộng được xác định theo công thức sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^3 \left( m_i \mathbf{J}_{Ti}^T \mathbf{J}_{Ti} + \mathbf{J}_{Ri}^T \mathbf{I}_i^{(0)} \mathbf{J}_{Ri} \right) \quad (6)$$

$\mathbf{J}_{Ti}$  - Ma trận Jacobian tịnh tiến các vật;  $\mathbf{J}_{Ri}$  - Ma trận Jacobian quay của các vật;  $m_i$  - Khối lượng của các vật;  $\mathbf{I}_i^{(0)}$  - Ma trận quán tính khối lượng trong  $\mathbf{R}^0$  được xác định theo công thức:

$$\mathbf{I}_i^{(0)} = \mathbf{R}_{i0} \mathbf{I}_i \mathbf{R}_{i0}^T \quad (7)$$

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  là ma trận ly tâm và Coriolis được xác định theo công thức:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\mathbf{E}_3 \otimes \dot{\mathbf{q}}) - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{E}_3) \right)^T \quad (8)$$

*Xác định lực suy rộng là các thành phần bên vế phải của phương trình (6)*

Xác định lực suy rộng dựa trên cơ sở công ảo của các ngoại lực bao gồm: trọng lực các vật, lực đàn hồi, lực cản nhớt, lực đẩy của động cơ.

- Lực suy rộng của trọng lực được xác định theo biểu thức:  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = - \left( \frac{\partial \Pi_g}{\partial \mathbf{q}} \right)^T$ . Trong đó, thế

năng của cơ hệ là:  $\Pi_g = - \sum_{i=1}^3 m_i \mathbf{g}^T \mathbf{r}_i$  với  $\mathbf{g}$  là gia tốc trọng trường,  $\mathbf{g} = [0, 0, g]^T$ .

- Lực suy rộng của lực đàn hồi nèn:  $\mathbf{Q}_d(\mathbf{q}) = -\left(\frac{\partial \Pi_d}{\partial \mathbf{q}}\right)^T$ . Trong đó, thế năng của đàn hồi của nèn là  $\Pi_d = \sum_{j=1}^4 \frac{1}{2} K_d (\lambda_{0j} + \lambda_j)^2$  với  $K_d$  - Độ cứng của nèn;  $\lambda_{0j}$  - Lượng biến dạng của nèn khi hệ ở trạng thái cân bằng tại vị trí thứ  $j$ ;  $\lambda_j$  - Lượng biến dạng tương đối của nèn tại vị trí thứ  $j$   
 $\lambda_1 = z_c + l_s \varphi + l_f \theta; \lambda_2 = z_c + l_s \varphi - l_f \theta; \lambda_3 = z_c - l_s \varphi - l_f \theta; \lambda_4 = z_c - l_s \varphi + l_f \theta$ .

- Lực suy rộng của lực cản nhớt nèn:  $\mathbf{Q}_n(\mathbf{q}) = -\left(\frac{\partial R_d}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right)^T$ . Trong đó, hàm hao tán  $R_d$  của giảm chấn nèn là  $R_d = \sum_{j=1}^4 \frac{1}{2} C_d \dot{\lambda}_j^2$  với  $C_d$  là hệ số giảm chấn của nèn.

- Lực suy rộng của lực đàn hồi và lực cản nhớt xi lanh kênh tâm.

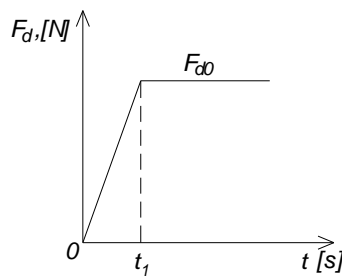
Theo [8], công ảo của lực đàn hồi và lực cản nhớt xi lanh kênh tâm là:

$$\delta W_{xl} = -f_s \delta l \tag{9}$$

Trong đó:  $f_s$  - Lực đàn hồi và lực cản nhớt xi lanh kênh tâm,  $f_s = K_{xl}(l_0 - l) - C_{xl}\dot{l}$ ;  $l_0$  - Chiều dài xi lanh kênh tâm ở trạng thái không chịu tải;  $l$  - Chiều dài xi lanh kênh tâm ở thời điểm chịu tải  $t$ ,  $l = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 - 2s_1s_2 \cos \alpha}$ ;  $s_1, s_2$  - Các kích thước hình học được thể hiện ở hình 2;  $K_{xl}$  - Độ cứng của xi lanh kênh tâm;  $C_{xl}$  - Hệ số giảm chấn của xi lanh kênh tâm.

Biến đổi (9), ta được:  $\delta W_{xl} = -f_s \left(\frac{\partial l}{\partial \mathbf{q}}\right)^T \delta \mathbf{q}$ , hay  $\mathbf{Q}_{xl}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -f_s \frac{\partial l}{\partial \mathbf{q}}$ .

- Lực suy rộng của lực đẩy động cơ là  $\mathbf{Q}_f = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{40}}{\partial \mathbf{q}}\right)^T \mathbf{F}_{tl}$ . Trong đó:  $\mathbf{F}_{tl}$  - Lực đẩy động cơ trong  $\mathbf{R}^0$ ,  $\mathbf{F}_{tl} = \mathbf{R}_{40} [F_d \ 0 \ 0]^T$ .



Hình 3. Mô hình lực đẩy động cơ.

Mô hình lực đẩy động cơ ở giai đoạn thiết kế sơ bộ được mô tả đơn giản dưới dạng hình thang như ở hình 3. Lực đẩy động cơ tăng tuyến tính đến giá trị  $F_{d0}$  thì giữ ổn định. Do thời gian đoạn di chuyển trên bệ là nhỏ hơn nhiều so với thời gian cháy của động cơ nên ở đây không mô tả hết đặc tuyến lực đẩy động cơ trong cả thời gian cháy.

$$F_d = \begin{cases} \frac{F_{d0}}{t_1} t & \text{khi } 0 < t \leq t_1 \\ F_{d0} & \text{khi } t > t_1 \end{cases} \tag{10}$$

Thay tất cả các thành lực suy rộng được xác định ở trên vào phương trình (6) ta được hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cơ hệ xe bộ phóng gồm 5 phương trình vi phân với 5 biến độc lập  $z_C, \varphi, \theta, \alpha$  và  $\xi$ .

### 3. ÁP DỤNG MÔ HÌNH VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Thông số đầu vào

*Bảng 1. Các thông số cho mô phỏng chuyển động của xe bộ phóng.*

TT	Tên thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng của xe	$m_x$	17500	kg
2	Khối lượng của đế bộ	$m_d$	2700	kg
3	Khối lượng của khối ống phóng	$m_{op}$	5160	kg
4	Khối lượng của mỗi đạn	$m_{tl}$	425	kg
5	Các thành phần mô men quán tính chính	$I_{xdx}, I_{xdy}, I_{xdz}$	11,71.10 <sup>3</sup> ; 4,71.10 <sup>4</sup> ; 5,30.10 <sup>4</sup>	kgm <sup>2</sup>
		$I_{opx}, I_{opy}, I_{opz}$	4,01.10 <sup>3</sup> ; 1,11.10 <sup>4</sup> ; 1,37.10 <sup>4</sup>	kgm <sup>2</sup>
		$I_{tlx}, I_{tly}, I_{tlz}$	4258,02; 406,12; 406,12	kgm <sup>2</sup>
6	Lực đẩy động cơ lớn nhất	$F_{d0}$	52038	N
7	Thời gian tăng $F_d$	$t_1$	0,2	s
8	Lực cắt của bu lông hãm	$F_C$	5000	N
9	Các kích thước hình học	$r_d; l_d; H_d;$ $H_t; r; H_0;$ $l_0; l_s; l_r; l_f;$ $s_1; s_2; \xi_0$	0; 2,67; 0,70; 0,30; 1,01; 0,59; 1,16; 2,05; 2,81; 1,59; 1,70; 0,96; 0	m
10	Chiều dài ống phóng	$L_{op}$	4,5	m
11	Độ cứng xi lanh	$K_{xl}$	4.10 <sup>6</sup>	N/m
12	Hệ số giảm chấn xi lanh	$C_{xl}$	5.10 <sup>4</sup>	Ns/m
13	Độ cứng nền	$K_d$	4.10 <sup>5</sup>	N/m

Mô hình động lực học được xây dựng ở mục 2 được áp dụng để khảo sát dao động của một cấu hình bộ phóng đang được nghiên cứu ở giai đoạn thiết kế sơ bộ là một bộ phóng gồm 8 ống phóng được gá trên xe KAMAZ 6560, các thông số cho mô phỏng này được đưa ra ở bảng 1. Các thông số kết cấu ở bảng này được dựa trên cơ sở thiết kế 3D mô hình xe bộ phóng bằng phần mềm Inventor 2020. Quá trình mô phỏng dao động của xe bộ phóng được thực hiện từ khi động cơ bắt đầu cháy sinh lực đẩy đến khi các chuyển động của xe bộ phóng không còn dao động. Quá trình được chia thành 3 giai đoạn liên tiếp nhau gồm:

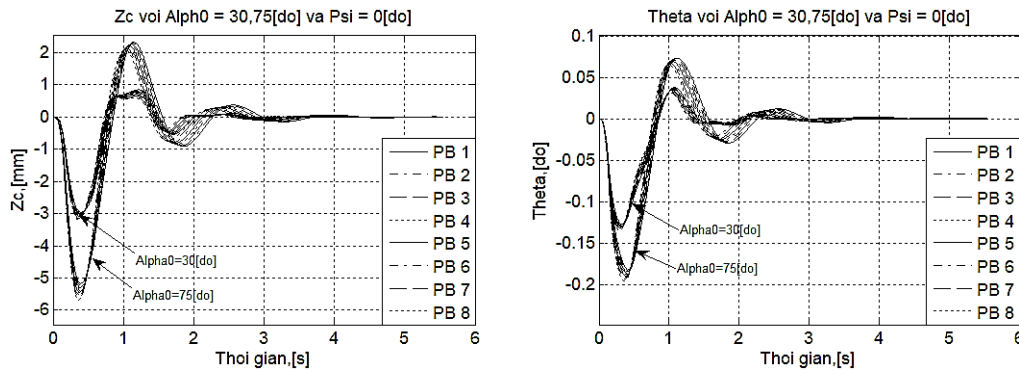
- Giai đoạn 1: Động cơ bắt đầu hoạt động lực đẩy tăng dần đến khi bu lông hãm bị cắt  $F_d \leq F_C + m_{tl}g \sin \alpha_0$  với  $0 \leq t \leq t_C$ . Ở giai đoạn này đạn không chuyển động dọc theo ống phóng ( $\xi = 0$ ). Điều kiện đầu cho giai đoạn này là:  $t = 0, z_C = 0, \dot{z}_C = 0, \varphi = 0, \dot{\varphi} = 0, \theta = 0, \dot{\theta} = 0, \alpha = \alpha_0, \dot{\alpha} = 0$ , thời điểm kết thúc giai đoạn này là  $t_C = t_1 F_C / F_{d0}$ .

- Giai đoạn 2: Từ khi đạn bắt đầu di chuyển trong ống phóng đến khi di chuyển hết chiều dài ống phóng. Điều kiện đầu cho giai đoạn này là  $z_C, \dot{z}_C, \varphi, \dot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, \alpha, \dot{\alpha} \Big|_{t=t_C}, \xi = 0$ , thời điểm kết thúc cho giai đoạn này là  $t = t_h$  (thời điểm đạn di chuyển hết chiều dài ống phóng).

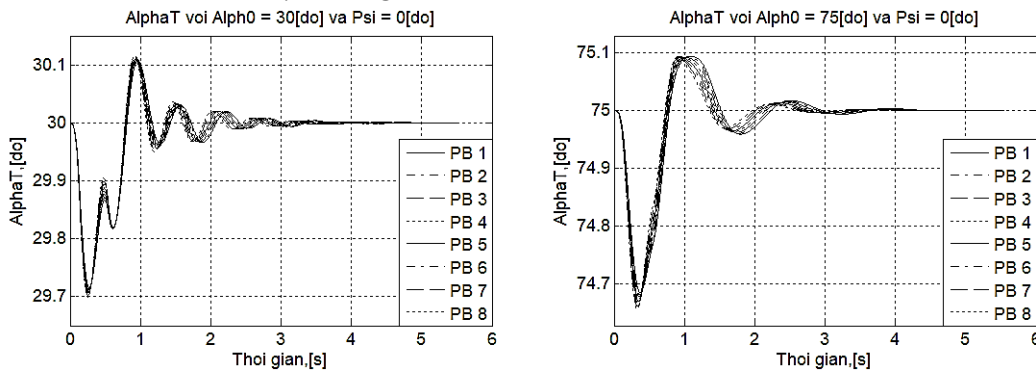
- Giai đoạn 3: Từ khi đạn rời bệ đến khi các chuyển động của xe bệ phóng không còn dao động. Điều kiện đầu cho giai đoạn này là  $z_c, \dot{z}_c, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \alpha, \dot{\alpha}|_{t=t_h}$ , giai đoạn này không xét đến chuyển động của đạn nữa.

### 3.2. Kết quả tính toán

Phương pháp số Runge-Kutta được sử dụng để giải hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cơ hệ. Với thời gian mô phỏng là 6 s, các kết quả được phân tích và đánh giá cho 8 phát bắn (từ PB1 đến PB8) với 2 trường hợp của góc  $\alpha_0$  (cũng tương đương là góc tầm lớn nhất và nhỏ nhất được thiết kế cho bệ phóng này) là  $\alpha_0 = 30^\circ$  và  $75^\circ$  và góc hướng cho trường hợp bắn dọc xe với  $\psi = 0^\circ$ , ngang xe với  $\psi = 0^\circ$ .



Hình 4. Dịch chuyển đứng  $Z_c$  và Lắc dọc  $\theta$  của xe với  $\alpha_0 = 30^\circ, 75^\circ$  và  $\psi = 0^\circ$ .

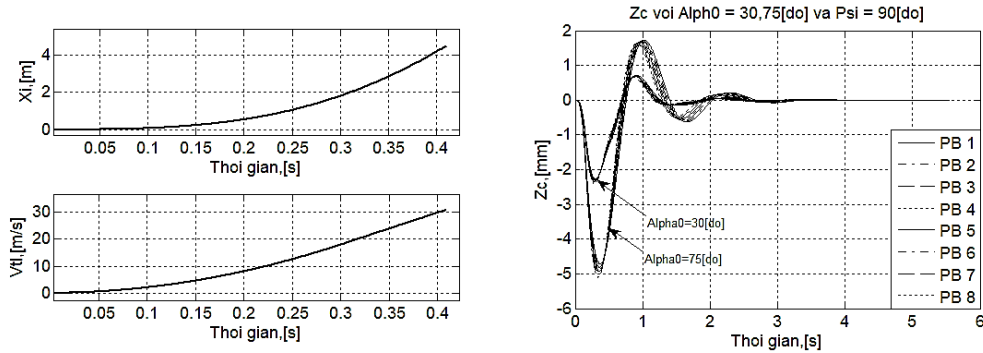


Hình 5. Góc tầm  $\alpha_T$  của bệ phóng với  $\alpha_0 = 30^\circ, 75^\circ$  và  $\psi = 0^\circ$ .

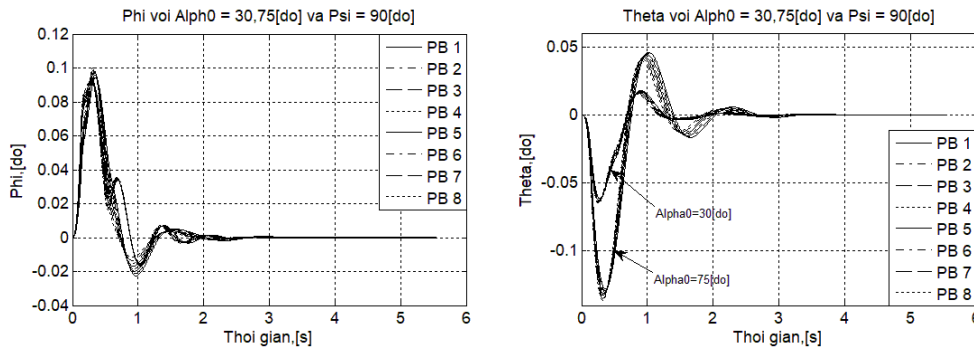
- Trường hợp 1: Với  $\alpha_0 = 30^\circ; 75^\circ$  và  $\psi = 0^\circ$  thì các chuyển động của xe và bệ phóng được đưa ra ở hình 4 và hình 5, ở đây không đưa ra lắc ngang  $\phi$  vì với  $\psi = 0^\circ$  thì  $\phi = 0$ . Kết quả cho thấy dao động của xe hầu như tắt hoàn toàn sau 3 s, sự khác biệt giữa các phát bắn ở cùng góc  $\alpha_0$  là không nhiều, khoảng dao động càng lớn khi  $\alpha_0$  càng lớn, đối với góc  $\alpha_0 = 30^\circ$  thì khoảng dịch chuyển đứng là 3,82 mm, lắc dọc là  $0,16^\circ$  và với góc  $\alpha_0 = 75^\circ$  thì khoảng dịch chuyển đứng là 7,84 mm, lắc dọc là  $0,26^\circ$ . Dao động của góc tầm của bệ phóng cũng tắt sau khoảng 3 s; ở  $\alpha_0$  nhỏ, lực cản bu lông hãm ảnh hưởng đến tần số dao động của góc tầm nhiều hơn ở  $\alpha_0$  lớn và khoảng dao động góc tầm lớn nhất ở  $\alpha_0 = 75^\circ$  là  $0,37^\circ$ .

- Trường hợp 2: Với  $\alpha_0 = 30^\circ; 75^\circ$  và  $\psi = 90^\circ$  thì các chuyển động của xe và bệ phóng được đưa ra ở hình 6, 7 và 8. Chuyển động của đạn trong ống phóng cho các trường hợp hầu như không khác nhau, sơ tốc đạt được khoảng 32 m/s, theo [10] thì sơ tốc này phù hợp với sơ tốc của đạn phản lực. Các khoảng dao động của sàn xe và bệ phóng nhìn chung trong trường hợp này nhỏ hơn so với ở trường hợp 1. Dao động của xe trong trường hợp này có đủ cả 3 thành phần dịch chuyển

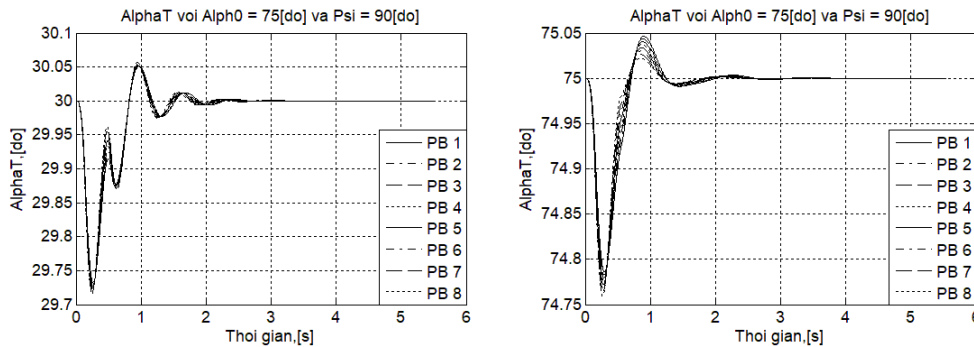
đứng, lắc dọc và lắc ngang. Với góc  $\alpha_0 = 75^\circ$  có các khoảng dao động là lớn nhất với dịch chuyển đứng là 6,63 mm, lắc dọc là  $0,22^\circ$  và lắc ngang  $0,12^\circ$ . Dao động của góc tầm của bệ phóng có xu hướng tắt sớm hơn (khoảng 2,5 s); ở  $\alpha_0$  nhỏ, lực cắt bu lông hãm ảnh hưởng đến tần số dao động của góc tầm nhiều hơn ở  $\alpha_0$  lớn và khoảng dao động góc tầm lớn nhất ở  $\alpha_0 = 75^\circ$  là  $0,28^\circ$ .



Hình 6. Dịch chuyển, vận tốc đạn và Dịch chuyển đứng  $Z_C$  của xe với  $\alpha_0 = 30^\circ, 75^\circ$  và  $\psi = 90^\circ$ .



Hình 7. Lắc ngang  $\varphi$  và Lắc dọc  $\theta$  của xe với  $\alpha_0 = 30^\circ, 75^\circ$  và  $\psi = 90^\circ$ .



Hình 8. Góc tầm  $\alpha_T$  của bệ phóng với  $\alpha_0 = 30^\circ, 75^\circ$  và  $\psi = 0^\circ$ .

Với giới hạn của một bài báo, 2 trường hợp đưa ra mô phỏng và phân tích ở trên là các trường hợp giới hạn được thiết kế xe và bệ phóng này. Các kết quả mô phỏng về biên độ và tần số của dịch chuyển đứng ở các trường hợp là phù hợp với kết quả đo được trên một kết cấu xe bệ phóng điển hình được công bố ở tài liệu [3], qua đó cho thấy mô hình toán và kết quả mô phỏng là tin cậy.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mô hình động lực học của xe bệ phóng đạn phản lực trên nền đàn hồi, kết quả là một hệ phương trình vi phân cấp 2 với 5 biến là 5 tọa độ suy rộng của cơ hệ. Sử dụng mô hình động lực học này để nghiên cứu dao động của một cấu hình xe bệ phóng được thiết kế sơ bộ đã cho thấy các dao động của bệ phóng này phù hợp với kết quả đo được của một kết cấu

xe bộ phóng điển hình ở [3], qua đó bước đầu đánh giá các kết cấu xe bộ phóng là phù hợp. Trong quá trình thiết kế hoàn thiện và thử nghiệm kết cấu xe và bộ phóng này, mô hình động lực học sẽ được sử dụng thường xuyên để phân tích, đánh giá lại các kết quả, tính toán tối ưu các kích thước, tối ưu hoá phân bố phát bắn,...

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Hồng Sinh, “Nghiên cứu động lực học dàn phóng đặt trên xe bánh lốp”, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, (2011).
- [2]. Nguyễn Duy Phồn, “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố nhiễu động ban đầu khi đạn tên lửa không điều khiển rời bộ phóng đến độ chính xác phát bắn”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, (2017).
- [3]. Vo B. V. et al., “Dynamic Simulation Analysis and Optimization of Firing Rate of Rocket Launchers on Wheeled Vehicles”, Advances in Military Technology, vol.16, no.1, pp. 159-175, (2021).
- [4]. Fedaravicius Al. et al., “Dynamics of the Missile Launch from the Very Short-Range Mobile Firing Unit”, Hindawi Shock and Vibration, (2023).
- [5]. Dziopa Z. et al., “Dynamics of an unguided missiles launcher”, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol.53, no.1, pp. 69-80, (2015).
- [6]. Dziopa Z. et al., “Modal Analysis of a Discrete System in the Form of a Rocket Launcher Installed on a Motor Vehicle”, Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering, vol.7, no.3, pp. 47-58, (2016).
- [7]. Selmic R. et al., “Analysis of Parameters Affecting the Dynamic Stability of a Rocket Launcher”, Scientific-Technical Review, vol. LIV, no.1, (2004).
- [8]. Ahmed A. Shabana, “Computational Dynamics”, John Wiley & Sons, Inc, pp.95-150, (2001).
- [9]. Nguyễn Văn Khang, “Động lực học hệ nhiều vật”, Nhà xuất bản KHKT, Hà Nội, (2017).
- [10]. Nguyễn Lạc Hồng, Nguyễn Xuân Anh, “Giáo trình tính toán bộ phóng và động lực học khi phóng”, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, (1998).

### ABSTRACT

#### **Investigating the oscillation of the launching vehicle on the elastic background**

*In this paper, the dynamics model of a launching vehicle on an elastic background is established using the Lagrange II approach. Using this model for a given launcher vehicle configuration, the vibrational laws of the vehicle and launcher motions are determined. Thereby, the feasibility of the structural model of the vehicle and launch pad was initially evaluated. The developed dynamic model can be used for structural design and shot optimization for a class of rocket-launching vehicles with the same structural principles.*

**Keywords:** Launching vehicle; Pitch angle; Roll angle; Heave translation; Elevation angle; Azimuth angle.