

Nghiên cứu động lực học của bộ giá đỡ máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập do Việt Nam chế tạo

A Study on the Dynamics of Blast Drilling Feeds Rotary and Pursue Driller's holder manufactured in Vietnam

Bùi Văn Trâm^{1,*}, Chu Văn Đạt², Nguyễn Văn Quyền³, Nguyễn Lâm Khánh⁴

¹Trường Đại học Công nghệ GTVT

²Học viện Kỹ thuật Quân sự

³Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

⁴Trường Đại học GTVT

*Email: tramgtvt@gmail.com

Từ khóa:

Máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập, cơ hệ chịu liên kết, phương pháp khử nhân tử Lagrange, ổn định hóa, mô phỏng số.

Keywords:

Rotary and pursue driller, constrained dynamic systems, Lagrange multiplier method, stabilization method, Numerical simulation.

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp xây dựng mô hình và thiết lập hệ phương trình động lực học của bộ giá đỡ máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập do Việt Nam chế tạo dựa trên phương trình Lagrange dạng nhân tử. Nội dung nghiên cứu đã xác định được lực xi lanh và các lực suy rộng của xy lanh, lực suy rộng tác dụng lên giá khoan. Bên cạnh đó trình bày phương pháp giải hệ phương trình vi phân - đại số sử dụng các điều kiện ràng buộc gia tốc và phương pháp ổn định hóa theo nguyên lý điều khiển trượt, cuối cùng sử dụng các phần mềm chuyên dùng để giải. Kết quả nghiên cứu xác định được tọa độ suy rộng của các khâu trong chuỗi, từ đó xác định chuyển vị tại điểm cần khảo sát.

Abstract

This article presents the method of establishing the dynamic model and dynamic equations of the holder of the rotary and pursue driller, made in Vietnam based on the Lagrange multiplier. The article determined the cylinder force and the generalized force of the cylinder, the force applied to the drill in detail. In addition, we also presented the method of solving the differential algebraic equations using the acceleration constraints and a stabilization method according to the sliding mode control principle. The research results determined the generalized coordinates of the elements in the chain, from which determined the displacements at the surveyed points.

Ngày nhận bài: 04/8/2018

Ngày nhận bài sửa: 08/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Thông tin và số liệu trong quá trình khai thác sử dụng máy khoan của các đơn vị Công binh cho thấy bộ giá đỡ máy khoan nổ mìn do Việt Nam chế tạo hoạt động kém ổn định, gây

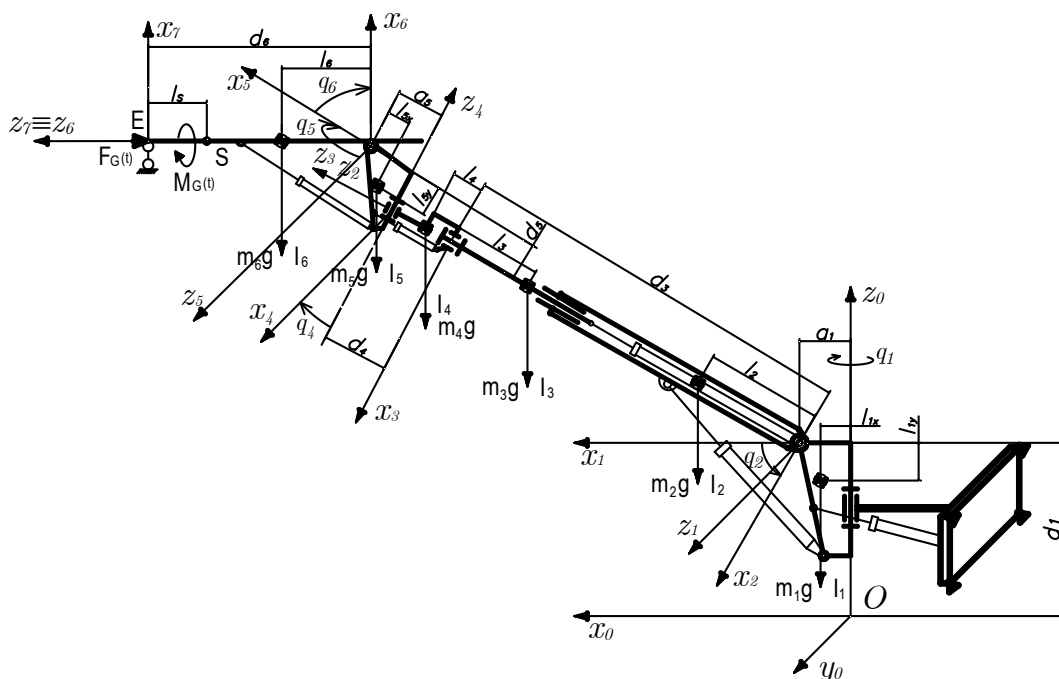
rung động lớn, ảnh hưởng đến chất lượng lỗ khoan và tuổi thọ của bộ công tác [4]. Để giải quyết được vấn đề này, trước tiên cần tập trung xây dựng mô hình và cách giải bài toán động lực học không gian của cơ hệ giá đỡ máy khoan, từ đó xác định được các tọa độ suy rộng và chuyển vị tại điểm khảo sát. Kết quả bài báo là thông số quan trọng cho các bài toán rung động giá khoan và chế độ làm việc hợp lý của máy khoan đảm bảo máy làm việc ổn định và hiệu quả.

2. MÔ HÌNH HÓA BỘ GIÁ ĐỠ MÁY KHOAN NỔ MÌN

2.1. Các giả thiết xây dựng mô hình [1]

Với đặc điểm kết cấu và nguyên lý làm việc của bộ giá đỡ máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập chế tạo trong nước, để xây dựng được mô hình động lực học, một số giả thiết được sử dụng: Nền máy đứng và máy cơ sở là cứng tuyệt đối; Bộ công tác là một chuỗi động kín bao gồm các khâu liên kết với nhau bởi các khớp và xi lanh thủy lực, liên kết tại các khớp không có khe hở, không có dao động, bỏ qua ma sát và không có biến dạng đàn hồi, các xi lanh thủy lực bị khóa tại mỗi vị trí khoan và xi lanh được coi là một phần tử đàn hồi do tính chịu nén của chất lỏng, các khâu là cứng tuyệt đối và có khối lượng tập trung; Khâu dẫn hướng khoan được ghim tỳ chặt vào vách gương khoan, kích thước được chia các đoạn ngắn, tải tác dụng theo phương thẳng đứng nhỏ nên coi là cứng tuyệt đối và không bị xoắn do ngẫu lực gây ra từ mô men cản cắt; Xem môi trường khoan là đồng nhất và có độ cứng ổn định; Không tính đến trường hợp mũi khoan bị bó kẹt trong lúc làm việc.

2.2. Mô hình động lực học



Hình 1. Mô hình động lực học máy khoan

Mô hình động lực học quá trình khoan thể hiện trên hình 1 được chia làm 6 khâu gồm: khâu 1 (khâu đế, lắc ngang); khâu 2 (đốt dưới cần, lắc lên xuống); khâu 3 (đốt trên cần, tịnh

tiên); khâu 4 (chục đỉnh cần, quay); khâu 5 (khâu tam giác, lắc ngang); khâu 6 (cụm giá và mũi khoan, lắc lên xuống). Mô hình động lực học được xây dựng cho trường hợp giá khoan ở trạng thái giữ và dừng tại mỗi vị trí khoan với 6 tọa độ suy rộng của 6 khâu, với hai phương bị ràng buộc tại điểm tỳ E và 5 tọa độ suy rộng là chiều dài của xi lanh. Số bậc tự do của bộ công tác máy khoan là bốn.

Các tọa độ suy rộng dùng để xác định vị trí của các khâu theo phương pháp Denavit - Hartenberg [3], trong đó: q_1 là góc quay của khâu đế quanh điểm liên kết O1; q_2 là góc quay của cần quanh điểm liên kết O2; $q_3 := d_3$ là hành trình tịnh tiến của khâu 3 dọc khâu 2; q_4 là góc quay của chục quanh điểm liên kết O4; q_5 là góc quay của khâu tam giác quanh điểm liên kết O5; q_6 là góc quay của giá dẫn hướng khoan quanh điểm liên kết O6.

Bảng 1. Bảng các tham số Denavit – Hartenberg

Khâu	θ_i	d_i	a_i	α_i	Biến khớp
1	q_1	d_1	a_1	-90^0	q_1
2	q_2	0	0	90^0	q_2
3	0	d_3	0	0^0	d_3
4	q_4	d_4	0	-90^0	q_4
5	q_5	d_5	a_5	-90^0	q_5
6	q_6	0	a_6	-90^0	q_6

Bảng 2. Các tham số của máy khoan nổ mìn

Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)
d_1	869	l_{1x}	58
d_4	310	l_{1y}	46
d_5	177	l_2	684
d_6	1929	l_3	530
a_1	155	l_{5x}	237
a_5	160	l_{6y}	47
a_6	0	l_6	561

Các ma trận truyền H_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) cỡ 4x4 biến đổi tọa độ từ một điểm trên hệ tọa độ khâu $(i - 1) \{x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$ tới khâu $i \{x_i, y_i, z_i\}$ có dạng:

$$H_i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\cos \alpha_i \sin q_i & \sin \alpha_i \sin q_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos \alpha_i \cos q_i & -\sin \alpha_i \cos q_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Thế các tham số DH từ bảng 1 vào công thức (1), ta thu được các ma trận truyền H_1, \dots, H_6 .

Ma trận truyền xác định vị trí điểm tỳ của khâu dẫn hướng trên gương khoan từ hệ tọa độ 6

$$\{x_6, y_6, z_6\} : H_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Các ma trận truyền D_i giữa hệ tọa độ gốc $\{x_0, y_0, z_0\}$ tới khâu i $\{x_i, y_i, z_i\}$:

$$D_i = \prod_{k=1}^i H_k \quad (2)$$

Các ma trận truyền có dạng: $D_i = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}_i & \mathbf{r}_{O_i}^{(0)} \\ \hline \mathbf{0}^T & 1 \end{array} \right]$ (3)

Tách ma trận cỡ 3x3 của ma trận truyền, ta thu được các ma trận quay của khâu thứ i và vectơ xác định gốc tọa độ khâu thứ i : $\mathbf{A}_i, \mathbf{r}_{O_i}^{(0)}$ (4)

Ta có thể tính trực tiếp vận tốc góc khâu thứ i của máy khoan dựa trên công thức tính vận tốc góc vật rắn thông qua ma trận quay của nó: $\tilde{\omega}_i^{(i)} = \mathbf{A}_i^T \dot{\mathbf{A}}_i$ (5)

Từ (5), suy ra biểu thức vận tốc góc khâu thứ i của máy khoan: $\omega_i^{(i)} = \begin{bmatrix} \omega_{i1}^{(i)} \\ \omega_{i2}^{(i)} \\ \omega_{i3}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{i23}^{(i)} \\ \tilde{\omega}_{i13}^{(i)} \\ \tilde{\omega}_{i21}^{(i)} \end{bmatrix}$ (6)

Ma trận D_7 cho biết vị trí của điểm tỳ E. Phương trình xác định vị trí điểm tỳ E của khâu dẫn hướng:

$$\begin{aligned} xE := & ((\cos(q_5) (a6 \cos(q_6) - \sin(q_6) d6 + a5) \cos(q_4) + \sin(q_4) (\cos(q_6) d6 \\ & + a6 \sin(q_6) - d5)) \cos(q_2) - \cos(q_6) \sin(q_2) \sin(q_5) a6 + (\sin(q_5) \sin(q_6) d6 \\ & - a5 \sin(q_5) + d4 + q_3) \sin(q_2) + a1) \cos(q_1) + \sin(q_1) ((\cos(q_6) d6 + a6 \sin(q_6) \\ & - d5) \cos(q_4) - \cos(q_5) \sin(q_4) (a6 \cos(q_6) - \sin(q_6) d6 + a5)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} yE := & ((\cos(q_5) (a6 \cos(q_6) - \sin(q_6) d6 + a5) \cos(q_4) + \sin(q_4) (\cos(q_6) d6 \\ & + a6 \sin(q_6) - d5)) \cos(q_2) - \cos(q_6) \sin(q_2) \sin(q_5) a6 + (\sin(q_5) \sin(q_6) d6 \\ & - a5 \sin(q_5) + d4 + q_3) \sin(q_2) + a1) \sin(q_1) - \cos(q_1) ((\cos(q_6) d6 + a6 \sin(q_6) \\ & - d5) \cos(q_4) - \cos(q_5) \sin(q_4) (a6 \cos(q_6) - \sin(q_6) d6 + a5)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} zE := & (-\cos(q_5) (a6 \cos(q_6) - \sin(q_6) d6 + a5) \cos(q_4) - \sin(q_4) (\cos(q_6) d6 \\ & + a6 \sin(q_6) - d5)) \sin(q_2) + (-\cos(q_6) \sin(q_5) a6 + (\sin(q_6) d6 - a5) \sin(q_5) \\ & + d4 + q_3) \cos(q_2) + d1 \end{aligned} \quad (9)$$

Gọi m_i là khối lượng của khâu thứ i , $\mathbf{r}_i = [x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i}]^T$ là vị trí khối tâm C_i trong hệ tọa độ gốc $\{x_0, y_0, z_0\}$, $\mathbf{r}_i^{(i)} = [x_{C_i}^{(i)}, y_{C_i}^{(i)}, z_{C_i}^{(i)}]^T$ vị trí khối tâm C_i trong hệ tọa độ $\{x_i, y_i, z_i\}$, $\mathbf{I}_i^{(i)}$ là ma trận quán tính của khâu i tại C_i trong $\{x_i, y_i, z_i\}$.

Vectơ xác định vị trí khối tâm \mathbf{r}_i được xác định bởi: $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{O_i} + \mathbf{A}_i \mathbf{r}_i^{(i)}$, ($i = 1, 2, \dots, 6$) (10)

Trong đó các vectơ $\mathbf{r}_i^{(i)}$ là các tham số thiết kế được cho trong bảng 3.

Bảng 3. Vị trí các khối tâm và các ma trận quán tính các khâu trong hệ tọa độ khâu

Khâu	Vị trí khối tâm			Khối lượng	Ma trận quán tính khối					
	$x_{C_i}^{(i)}$	$y_{C_i}^{(i)}$	$z_{C_i}^{(i)}$		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{yz}	I_{zx}
1	$-l_{1x}$	l_{1y}	0	m_1	I_{1x}	I_{1y}	I_{1z}	I_{1xy}	I_{1yz}	I_{1zx}
2	0	0	l_2	m_2	I_{2x}	I_{2y}	I_{2z}	I_{2xy}	I_{2yz}	I_{2zx}
3	0	0	$-l_3$	m_3	I_{3x}	I_{3y}	I_{3z}	I_{3xy}	I_{3yz}	I_{3zx}
4	0	d_4	0	m_4	I_{4x}	I_{4y}	I_{4z}	I_{4xy}	I_{4yz}	I_{4zx}
5	$-l_{5x}$	l_{5y}	0	m_5	I_{5x}	I_{5y}	I_{5z}	I_{5xy}	I_{5yz}	I_{5zx}
6	0	l_6	0	m_6	I_{6x}	I_{6y}	I_{6z}	I_{6xy}	I_{6yz}	I_{6zx}

Các ma trận Jacobi tịnh tiến và ma trận Jacobi quay của các khâu được xác định bởi:

$$\mathbf{J}_{T_i}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \mathbf{q}} : \text{ma trận Jacobi tịnh tiến của khâu } i \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_{R_i}^{(i)}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_i^{(i)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} : \text{ma trận Jacobi quay của khâu } i \quad (12)$$

$$\text{Trong đó các tọa độ suy rộng dư xác định vị trí cơ hệ là: } \mathbf{q} = \left[\mathbf{q}_a^T \quad \mathbf{q}_p^T \quad \mathbf{u}^T \right]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{q}_a = \left[q_1 \quad q_2 \quad d_3 \quad q_4 \right]^T : \text{Các tọa độ suy rộng độc lập} \quad (14)$$

$$\mathbf{q}_p = \left[q_5 \quad q_6 \right]^T : \text{Các tọa độ suy rộng phụ thuộc của máy khoan} \quad (15)$$

$$\mathbf{u} = \left[u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \right]^T : \text{Các chiều dài xi lanh} \quad (16)$$

Ma trận khối lượng suy rộng (ma trận quán tính) được xác định bởi [2,3,6]

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^6 \left[\mathbf{J}_{T_i}^T m_i \mathbf{J}_{T_i} + \mathbf{J}_{R_i}^{(i)T} \mathbf{I}_i^{(i)} \mathbf{J}_{R_i}^{(i)} \right] \quad (17)$$

Ma trận quán tính ly tâm và Coriolis được xác định nhờ sử dụng đạo hàm ma trận khối lượng suy rộng theo tọa độ suy rộng và tích Kronecker [8]:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\mathbf{I}_n \otimes \dot{\mathbf{q}}) + \left(\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{I}_n) \right) - \left(\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{I}_n) \right)^T \right] \quad (18)$$

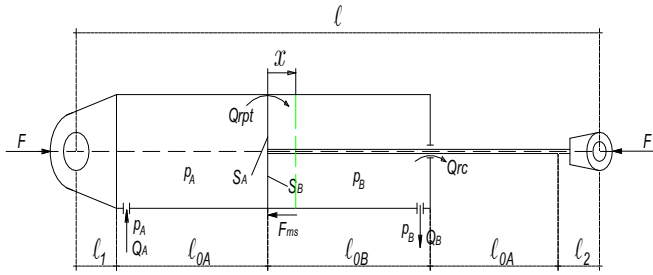
$$\text{Thế năng của hệ được viết dưới dạng: } \Pi = -\sum_{i=1}^6 m_i \bar{\mathbf{g}}^T \mathbf{r}_i \quad (19)$$

trong đó $\bar{g} = [0, 0, -g]^T$ với gia tốc trọng trường $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$. (20)

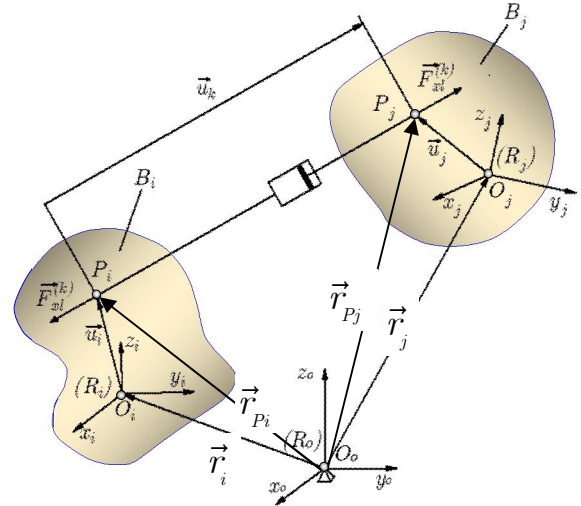
Véc tơ lực trọng trường được xác định bởi biểu thức: $\mathbf{h}(\mathbf{q}) = -\left(\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}}\right)^T = \left(\sum_{i=1}^6 m_i \mathbf{J}_{T_i}^T\right) \bar{g}$ (21)

2.3. Xác định lực suy rộng

2.3.1. Xác định lực suy rộng của xy lanh



Hình 2. Mô hình động lực học của xy lanh thủy lực



Hình 3. Mô hình tính toán lực suy rộng của xy lanh

Lực tác động vào xy lanh được xác định từ [11] theo công thức tổng quát sau:

$$F = \left[-E_0 \cdot \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0A}} \right| + p_A(0) \right] \cdot S_A - \left[E_0 \cdot \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0B}} \right| + p_B(0) \right] \cdot S_B - k \cdot \dot{x} \quad (22)$$

Khi xác định được lực xy lanh theo (22), ta có mô hình lực xy lanh tác dụng lên các khâu hình 3.

Công suất của lực xy lanh là:

$$P = \vec{F}_{xl}^{(k)} \cdot (\vec{v}_{P_j} - \vec{v}_{P_i}) \quad (23)$$

Mặt khác, từ hình 3, ta xác định được

$$\vec{u}_k = \vec{r}_{P_j} - \vec{r}_{P_i} \Rightarrow \dot{\vec{u}}_k = \dot{\vec{r}}_{P_j} - \dot{\vec{r}}_{P_i} = \vec{v}_{P_j} - \vec{v}_{P_i} \quad (24)$$

Thế (24) vào (23), ta có công suất $P = \vec{F}_{xl}^{(k)} \cdot \dot{\vec{u}}_k$. (25)

Chú ý rằng $\vec{F}_{xl}^{(k)}$, \vec{u}_k là cùng phương. Gọi φ, ψ, θ lần lượt là góc tạo bởi \vec{u}_k so với các trục tọa độ cố định của hệ $\{x_0, y_0, z_0\}$ tương ứng. Ta thu được các cosin chỉ hướng $\cos \varphi, \cos \psi, \cos \theta$.

Chú ý rằng:

$$\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta = 1 \quad (26)$$

Ta có:

$$\vec{F}_{xl}^{(k)} = F_{xl}^{(k)} \left(\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0} \right) \quad (27)$$

$$\vec{u}_k = u_k \left(\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0} \right) \quad (28)$$

Trong đó $\vec{e}_{x_0}, \vec{e}_{y_0}, \vec{e}_{z_0}$ là các véctơ đơn vị trên hệ quy chiếu cố định $\{x_0 y_0 z_0\}$, đó là các véctơ hằng.

Đạo hàm hai vế (28), ta thu được

$$\dot{\vec{u}}_k = \dot{u}_k \left(\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0} \right) + u_k \frac{d}{dt} \left(\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0} \right) \quad (29)$$

Thế (29) và (27) vào (25), ta thu được biểu thức công suất

$$P = F_{xl}^{(k)} \dot{u}_k \left(\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta \right) + F_{xl}^{(k)} u_k \left(\cos \varphi \frac{d \cos \varphi}{dt} + \cos \psi \frac{d \cos \psi}{dt} + \cos \theta \frac{d \cos \theta}{dt} \right) \quad (30)$$

Đạo hàm (26) và thế vào (30) với chú ý rằng

$$\frac{d}{dt} \left(\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta \right) = 0 = 2 \left(\cos \varphi \frac{d \cos \varphi}{dt} + \cos \psi \frac{d \cos \psi}{dt} + \cos \theta \frac{d \cos \theta}{dt} \right) \quad (31)$$

$$\text{Thế (26) và (31) vào (30), ta được biểu thức công suất: } P = F_{xl}^{(k)} \dot{u}_k = F_{xl}^{(k)} \frac{\partial u_k}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} \quad (32)$$

$$\text{Từ đó, lực suy rộng của xy lanh: } \mathbf{Q}_{xl}^{(k)} = \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T = \left(\frac{\partial u_k}{\partial \mathbf{q}} \right)^T F_{xl}^{(k)} \quad (33)$$

2.3.2. Xác định lực suy rộng của lực tác động vào giá khoan

Bây giờ, ta xác định lực suy rộng của lực tác động vào giá khoan $\vec{F}_G(t)$ và mômen xoắn $\vec{M}_G(t)$ do lực cắt gây ra khi làm việc. Lực $\vec{F}_G(t)$ tác dụng ngược chiều với trục z_6 của hệ $\{x_6 y_6 z_6\}$.

$$\text{Từ đó, các hình chiếu của } \vec{F}_G(t) \text{ là: } \mathbf{F}_G^{(6)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} F_G(t) \Rightarrow \mathbf{F}_G^{(0)} = \mathbf{A}_6 \mathbf{F}_G^{(6)} \quad (34)$$

$$\text{Lực suy rộng của } \vec{F}_G(t): \mathbf{Q}_{FG} = \mathbf{J}_{TE}^T \mathbf{F}_G^{(0)} = \mathbf{J}_{TE}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} F_G(t) \quad (35)$$

$$\text{Trong đó } \mathbf{J}_{TE} \text{ là ma trận Jacobi của vị trí điểm tỳ E: } \mathbf{J}_{TE} = \frac{\partial \mathbf{r}_E^{(0)}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_E}{\partial \mathbf{q}} \\ \frac{\partial y_E}{\partial \mathbf{q}} \\ \frac{\partial z_E}{\partial \mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

với x_E, y_E, z_E được xác định từ (7), (8) và (9).

Lực $\vec{M}_G(t)$ quay cùng chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trục z_6 của hệ $\{x_6 y_6 z_6\}$. Từ đó,

$$\text{các hình chiếu của } \vec{M}_G(t) \text{ là: } \mathbf{M}_G^{(6)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} M_G(t). \quad (37)$$

$$\text{Lực suy rộng của } \vec{M}_G(t): \mathbf{Q}_{MG} = \mathbf{J}_{RE}^T \mathbf{M}_G^{(6)} = \mathbf{J}_{RE}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} M_G(t) \quad (38)$$

$$\text{Trong đó } \mathbf{J}_{RE} \text{ là ma trận Jacobi quay của khâu số 6: } \mathbf{J}_{RE}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_6^{(6)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \quad (39)$$

với $\boldsymbol{\omega}_6^{(6)}$ được xác định từ (6).

2.4. Thiết lập các phương trình liên kết

Các phương trình liên kết (ràng buộc) vị trí điểm tỳ E:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= y_E - y_{EE} = 0 \\ \Phi_2 &= z_E - z_{EE} = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

Trong đó y_{EE}, z_{EE} là tọa độ của điểm tỳ ở trạng thái giữ và dừng ban đầu.

Chú ý rằng $|\mathbf{u}_k|$ là chiều dài xy lanh. Việc thiết lập điều kiện $|\mathbf{u}_k|$ nhờ công thức (24):

$$\Phi_k = |\mathbf{u}_k|^2 - |\mathbf{r}_{P_j} - \mathbf{r}_{P_i}|^2 = |\mathbf{u}_k|^2 - \left| (\mathbf{r}_{O_j} + \mathbf{A}_j \mathbf{u}_j^{(j)}) - (\mathbf{r}_{O_i} + \mathbf{A}_i \mathbf{u}_i^{(i)}) \right|^2 = 0 \quad (k = 3, 4, \dots, 7) \quad (41)$$

3. PHƯƠNG PHÁP SỐ GIẢI HỆ PHƯƠNG TRÌNH VI PHÂN - ĐẠI SỐ

Phương pháp giải hệ phương trình vi phân - đại số thường là biến đổi hệ phương trình vi phân - đại số về hệ phương trình vi phân thường. Sau đó sử dụng thuật toán số giải hệ phương trình vi phân thường.

Sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử, ta thu được hệ phương trình vi phân - đại số mô tả chuyển động của hệ nhiều vật hólônôm chịu liên kết giữ và lý tưởng [3].

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} - \Phi_q^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} \quad (42)$$

$$\Phi(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (43)$$

Trong đó \mathbf{Q} là vectơ lực suy rộng ứng với các lực hoạt động không có thế (lực $\vec{F}_G(t), \vec{M}_G(t)$ và các lực xy lanh), $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_7]^T$ là vectơ các nhân tử Lagrange, $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_7]^T$ là các điều kiện ràng buộc (40), (41), Φ_q là ma trận Jacobi của Φ cỡ 7×11 .

$$\Phi_q = \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{q}} \quad (44)$$

Đưa vào vectơ $\mathbf{p}_1 = \mathbf{Q} - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{h}(\mathbf{q})$ và chú ý đến các phương trình liên kết ta nhận được hệ phương trình vi phân đại số mô tả hệ như sau

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{p}_1(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (45)$$

$$\Phi(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (46)$$

Để giải hệ (45)-(46), các điều kiện đầu tương thích là cần thiết, nghĩa là các điều kiện đầu cần thỏa mãn các phương trình liên kết hình học và động học

$$\Phi(\mathbf{q}_o) = \mathbf{0}, \quad (47)$$

$$\Phi(\mathbf{q}_o)\dot{\mathbf{q}}_o = \mathbf{0} \quad (48)$$

Hệ phương trình vi phân đại số (45)-(46) có thể được giải bằng phương pháp số. Một số kỹ thuật hay được sử dụng như tách nhân tử Lagrange, phương pháp ổn định liên kết, và phương pháp đưa về tọa độ tối thiểu. Về cơ bản, khi áp dụng các phương pháp số cho phương trình vi phân thường ta thường sử dụng đạo hàm bậc hai của phương trình liên kết.

Dựa trên giả thiết rằng các liên kết trong hệ là lý tưởng, do đó tổng công ảo của các lực liên kết triệt tiêu. Để khử các lực liên kết và đưa về hệ phương trình vi phân thường, ta sử dụng ma trận khử định nghĩa bởi

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ -[\Phi_d(\mathbf{q})]^{-1}\Phi_i(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad (49)$$

với các ma trận Jacobi được suy ra từ phương trình liên kết thỏa mãn

$$\Phi(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \Phi_d(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_d + \Phi_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{0}$$

trong đó $\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_d$ tương ứng là các tọa độ độc lập và tọa độ phụ thuộc.

Nhân từ trái ma trận $\mathbf{R}^T(\mathbf{q})$ với phương trình (45) và chú ý tới $\mathbf{R}^T(\mathbf{q})\Phi^T(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$ ta nhận được:

$$\mathbf{R}^T(\mathbf{q})(M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q})) = \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q} \quad (50)$$

Kết hợp phương trình (50) với đạo hàm hai lần phương trình liên kết theo thời gian ta nhận được hệ phương trình vi phân thường sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}^T(\mathbf{q})(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q})) &= \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q} \\ \ddot{\Phi}(\mathbf{q}) &= 0 \end{aligned}$$

hay

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q}) \\ \Phi(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{R}^T(\mathbf{q})(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q})) \\ -\dot{\Phi}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}. \quad (51)$$

Đó là hệ phương trình vi phân thường n phương trình n ẩn. Giải hệ phương trình vi phân thường trên với điều kiện đầu tương thích ta nhận được các tọa độ suy rộng $\mathbf{q}(t)$.

Ổn định hóa theo nguyên lý điều khiển trượt

Dựa trên nguyên lý điều khiển trượt, thay vì sử dụng trực tiếp phương trình liên kết (51), ta sử dụng phương trình

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q}) \\ \Phi(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{R}^T(\mathbf{q})(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q})) \\ -[\dot{\Phi}(\mathbf{q}) + \Lambda\Phi(\mathbf{q})]\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{K}s - \mathbf{k} \operatorname{sgn}(s) \end{bmatrix} \quad (52)$$

với $\mathbf{s} = \dot{\Phi}(\mathbf{q}) + \Lambda\Phi(\mathbf{q}) = \dot{\Phi}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \Lambda\Phi(\mathbf{q})$, $\Lambda = \operatorname{diag}([\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]) > 0$ là ma trận hệ số xác định dương.

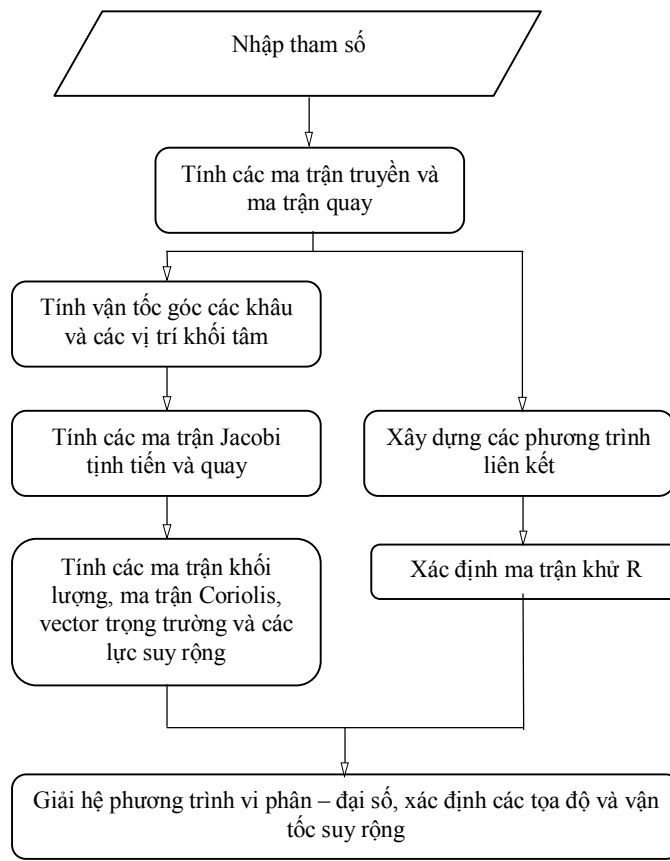
Lưu ý rằng, khi sử dụng phương trình (52) để mô phỏng hiện tượng chattering sẽ xuất hiện trong đáp ứng của hệ do hàm sgn . Để khắc phục hiện tượng này, trong mô phỏng số ta sẽ thay thế xấp xỉ sgn bởi một trong các hàm trơn xấp xỉ sau: $\operatorname{sgn}(s) \approx \tanh(cs)$, $c \gg 1$.

4. MÔ PHỎNG SỐ

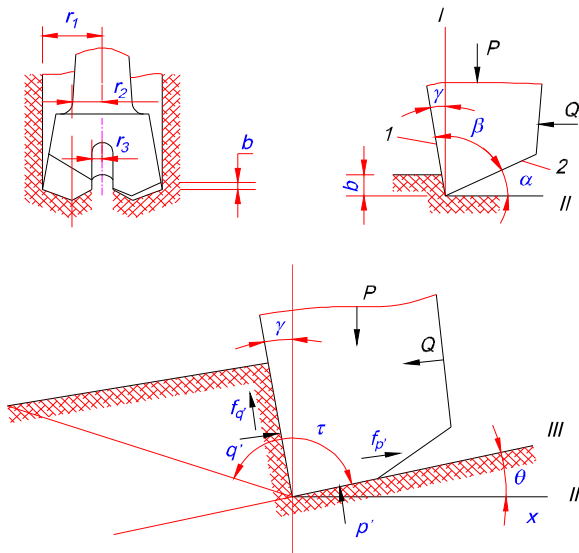
Trong mục này, các kết quả mô phỏng số cho bộ giá đỡ máy khoan được trình bày. Khi tính toán có sử dụng phương pháp ổn định hóa theo nguyên lý trượt.

Khi thay các tham số kết cấu, giá trị ma trận quán tính khâu, thông số xi lanh thủy lực, tọa độ điểm đầu điểm cuối của mỗi xi lanh, tọa độ ban đầu của các khâu, lực suy rộng vào mô hình tính toán. Các kết quả mô phỏng bằng MATLAB dựa trên sơ đồ thuật toán chương trình như hình 4.

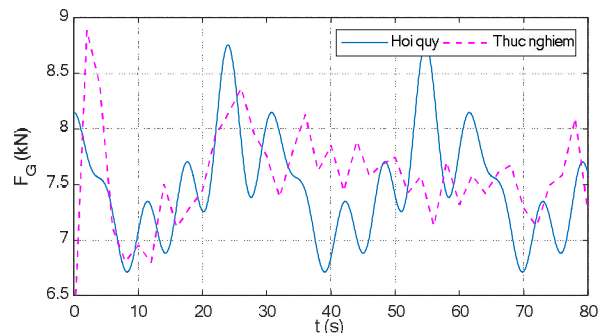
Lực và mômen xoắn tác dụng lên khâu dẫn hướng đầu khoan được thể hiện ở các hình 6-7. Đồ thị các tọa độ suy rộng xác định các khâu được thể hiện trong các hình từ 8-13.



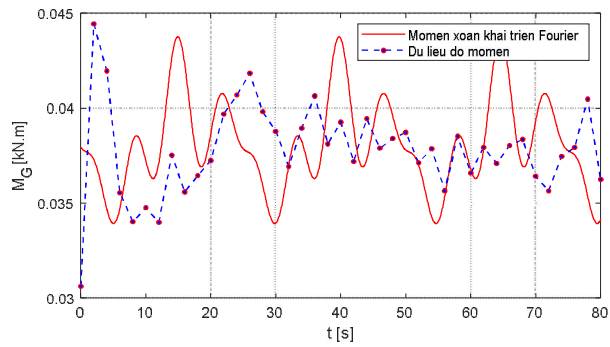
Hình 4. Sơ đồ khối chương trình tính toán



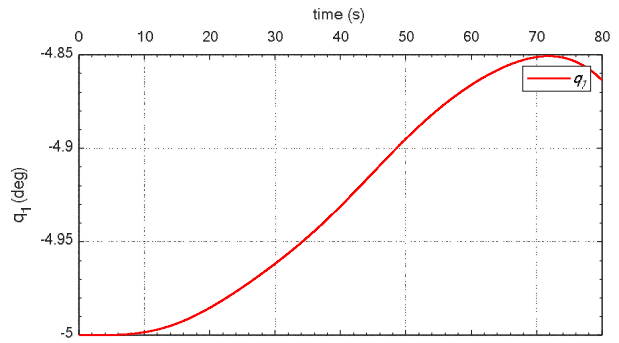
Hình 5. Sơ đồ tương tác mũi khoan sinh ra F_G và M_G



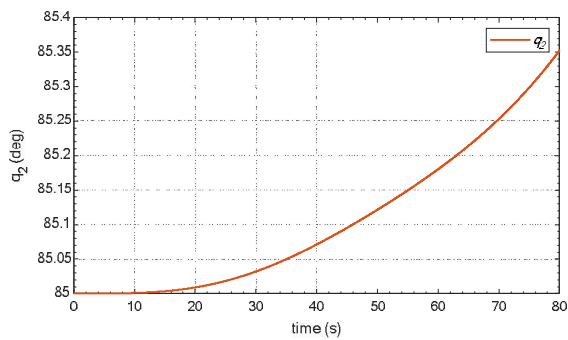
Hình 6. Đồ thị hàm hóa lực F_G



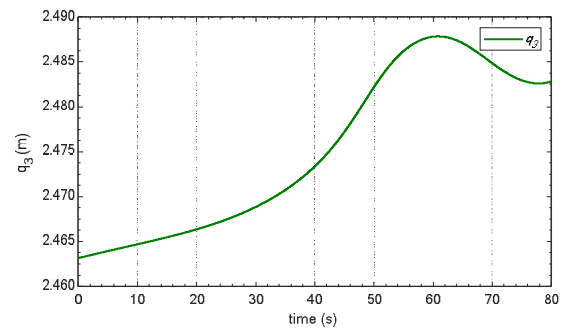
Hình 7. Đồ thị hàm hóa mômen M_G



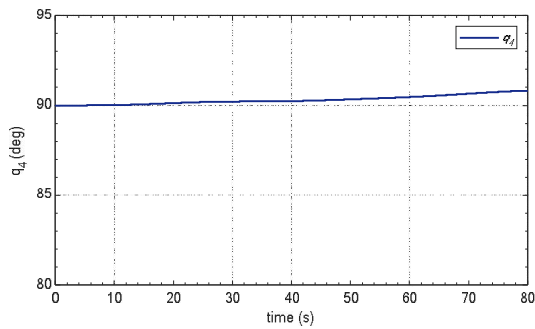
Hình 8. Đồ thị q_1



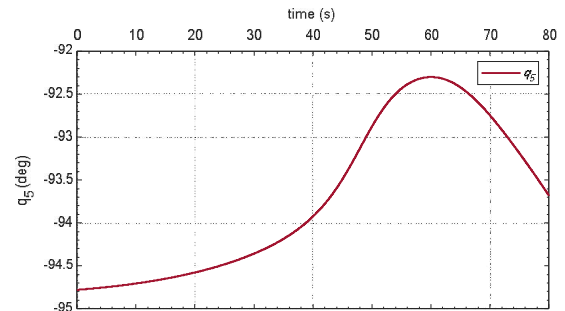
Hình 9. Đồ thị q_2



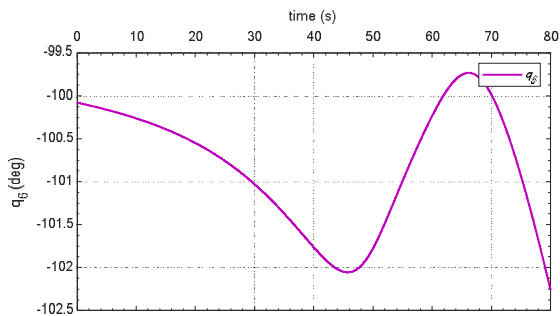
Hình 10. Đồ thị q_3



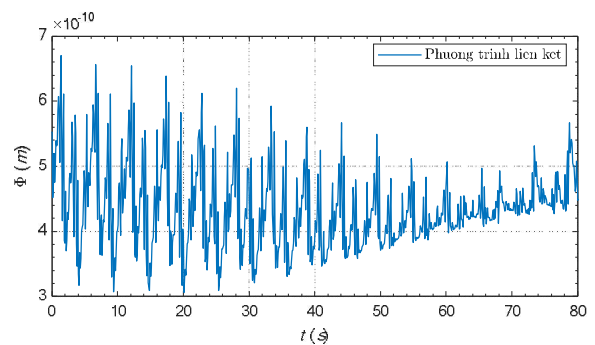
Hình 11. Đồ thị q_4



Hình 12. Đồ thị q_5

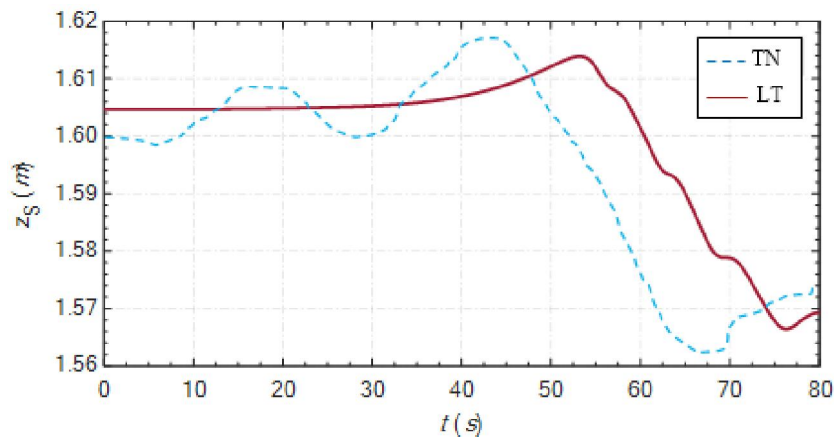


Hình 13. Đồ thị q_6



Hình 14. Sai số của phương trình liên kết

$$\phi = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + \dots + \phi_7^2}$$



Hình 15. Đồ thị chuyển vị của điểm S cách điểm tỳ một đoạn l_S

5. KẾT LUẬN

Bài báo thiết lập phương trình động lực học của bộ giá đỡ máy khoan nhỏ dựa trên phương trình Lagrange dạng nhân tử, đã tính toán chi tiết lực xi lanh và các lực suy rộng của xy lanh, lực suy rộng của lực tác dụng lên giá đỡ. Bên cạnh đó trình bày phương pháp giải hệ phương trình vi phân – đại số mà sử dụng các điều kiện ràng buộc ở mức gia tốc và phương pháp ổn định hóa theo nguyên lý điều khiển trượt, sau đó sử dụng các phần mềm MATLAB, MAPLE để giải. Theo trang 341 tài liệu số [3] tái bản năm 2017, sai số của phương trình liên kết $\phi = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + \dots + \phi_7^2}$ cỡ 10^{-10} m, mặt khác khi so sánh kết quả tính toán lý thuyết chuyển vị tại điểm S với kết quả đo thực nghiệm có sai số 9,433 % khẳng định phương pháp hàm hóa giá trị F_G và M_G , phương pháp xây dựng mô hình hệ nhiều vật không gian của máy khoan và thuật toán giải hệ phương trình vi phân - đại số là hoàn toàn tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Vịnh (2008): *Động lực học máy xây dựng*. Tài liệu giảng dạy cao học. Đại học Giao thông vận tải.
- [2]. Bùi Hải Triều (2018): *Truyền động và điều khiển thủy lực ứng dụng*. Nhà xuất bản khoa học và Kỹ thuật.
- [3]. Nguyễn Văn Khang (2017): *Động lực học hệ nhiều vật*. NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội.
- [4]. Đào Công Hiến (2009): *Nghiên cứu thiết kế thiết bị khoan thi công đường hầm quân sự khẩu độ vừa và nhỏ*. Đề tài NCKH nhánh độc lập cấp nhà nước mã nhánh đề tài ĐTĐL-05G/03.
- [5]. Lê Anh Sơn (2015): *Nghiên cứu động lực học của bộ công tác máy xúc thủy lực một gầu lắp thiết bị cắt bê tông cốt thép*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện kỹ thuật Quân sự.
- [6]. J. G. De Jalon, E. Bayo (1994): *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems*. Springer-Verlag, New York.

[7]. Nguyen Van Khang (1973): *Ein Beitrag zur dynamischen Analyse ebener Koppelgetriebe mit mehreren Freiheitsgraden mit Hilfe der numerischen Lösung der Bewegungsdifferentialgleichungen*. Diss. A, TH Karl-Marx-Stadt.

[8]. Nguyen Van Khang (2011): Kronecker product and a new matrix form of Lagrange equations with multipliers for constrained multibody systems. *Mechanics Research Communications*, Vol. **38**, 294-299.

[9]. J. Baumgarte (1972): Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamic systems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. **1**, pp. 1-16.

[10]. P. Flores, M. Machado, E. Seabra, M. T. da Silva (2011): A Parametric Study on the Baumgarte Stabilization Method for Forward Dynamics of Constrained Multibody Systems. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. **6**, 011019-1 – 011019-9.

[11]. A. Alexandera, A. Vaccaa, D. Cristoforib: Active vibration damping in hydraulic construction machinery. *Procedia Engineering, Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2016)*, **176** (2017) 514 – 528.