

ĐỘNG LỰC HỌC KHÔNG GIAN MÁY KHOAN NỔ MÌN KIỂU XOAY ĐẬP SỬ DỤNG DẠNG THỨC HỆ NHIỀU VẬT CÓ CẤU TRÚC NỬA KÍN NỬA HỞ

Bùi Văn Trầm^{a,*}, Chu Văn Đạt^b, Nguyễn Văn Quyền^c, Nguyễn Lâm Khánh^d

^aKhoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải,
54 Triều Khúc, Thanh Xuân Nam, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

^bBộ môn Xe máy Công binh, Viện Kỹ thuật Cơ khí động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự,
236 Hoàng Quốc Việt, Quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Cơ điện tử, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội,
01 Đại Cồ Việt, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^dKhoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải, 03 phố Cầu Giấy, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 14/4/2023, Sửa xong 08/8/2023, Chấp nhận đăng 20/11/2023

Tóm tắt

Bài báo trình bày bài toán mô hình hóa và phân tích động lực học bằng phương trình Lagrange dạng nhân tử với cơ hệ là hệ giá đỡ máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập do Việt Nam chế tạo. Nội dung nghiên cứu trình bày các bước xây dựng mô hình động lực học 3D, tính toán lực và các lực suy rộng tác động vào cơ hệ. Việc giải thuật được trình bày theo phương pháp giải hệ phương trình vi phân - đại số có sử dụng các điều kiện ràng buộc ở mức gia tốc và phương pháp ổn định hóa Baumgarte. Kết quả nghiên cứu xác định chuyển vị tại điểm khảo sát, làm cơ sở đánh giá sự rung động của máy với các trường hợp tác động của ngoại lực. Từ đó khuyến cáo trong thiết kế, chế tạo và sử dụng máy khoan chế tạo trong nước.

Từ khóa: máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập; phương trình vi phân - đại số; phương pháp khử nhân tử Lagrange; ổn định hóa Baumgarte; hệ nhiều vật.

DYNAMICS OF A SPATIAL MODEL OF THE PERCUSSIVE-ROTARY DRILLING MACHINES USES CLOSED-LOOP MULTIBODY SYSTEM

Abstract

This paper presents the problem of modeling and analyzing dynamics by the Lagrange multiplier equation with the mechanical system being the supporting system of the percussive-rotary drilling machines manufactured by Vietnam. The content of the study presents the steps of building a 3D dynamical model, calculating forces, and generalizing forces acting on the mechanical system. The algorithm is presented by solving the system of differential algebraic equation using the constraints at the acceleration level and the Baumgarte stabilization method. The research results determine the displacement at the survey site, as a basis for evaluating the machine's vibration with the impact of external forces. From there, recommendations in designing, manufacturing, and using drilling machines manufactured in Vietnam.

Keywords: the percussive-rotary blast-hole drilling machine; differential algebraic equation; lagrange multiplier method; baumgarte stabilization; multibody systems.

[https://doi.org/10.31814/stee.huice2023-17\(4V\)-13](https://doi.org/10.31814/stee.huice2023-17(4V)-13) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Xây dựng đường hầm phục vụ các mục đích dân sinh và quốc phòng đã và đang được đặt ra với nhu cầu ngày càng lớn, kéo theo đó là nhu cầu sử dụng ngày càng nhiều máy móc thiết bị chuyên

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: trambv@utt.edu.vn (Trầm, B. V.)

dùng. Sử dụng thiết bị khoan xoay đập lắp trên máy đào thông qua hệ giá đỡ để khoan lỗ nổ mìn là một giải pháp khả thi, cho phép nâng cao đáng kể năng suất lao động. Tuy nhiên, khi thi công đường hầm khẩu độ vừa và nhỏ như đường hầm quân sự thì yêu cầu đặt ra với thiết bị phải nhỏ gọn, cơ động, hoạt động an toàn, ổn định và hiệu quả. Một trong các bộ phận liên kết, hỗ trợ cho công việc của bộ công tác, có ảnh hưởng lớn tới chất lượng làm việc của toàn máy là hệ giá đỡ thiết bị khoan. Trong quá trình làm việc, hệ giá đỡ là bộ phận trung gian giữa máy cơ sở và cụm khoan, chịu toàn bộ tải trọng và đập tạo ra từ cụm khoan khi làm việc. Máy khoan nổ mìn do nước ngoài chế tạo có tính năng hiện đại, thi công hiệu quả và năng suất cao, tuy nhiên sản phẩm chủ yếu phục vụ thi công hầm cỡ lớn với giá thành cao và khó khăn khi sửa chữa bảo dưỡng do phụ thuộc nguồn phụ tùng. Với những giá khoan chế tạo trong nước thường được thực hiện theo kinh nghiệm và chép mẫu, sản phẩm còn tồn tại hạn chế như giá khoan rung lắc làm ảnh hưởng đến độ chính xác của lỗ khoan và năng suất thi công [1].

Các tác giả [2–4] đã nghiên cứu thiết kế và chế tạo thiết bị khoan nổ mìn kiểu xoay đập thi công đường hầm quân sự khẩu độ vừa và nhỏ. Thiết bị này phù hợp với không gian và đặc điểm thi công, tuy nhiên còn một số tồn tại như hệ giá đỡ máy khoan hoạt động kém ổn định, ảnh hưởng đến chất lượng lỗ khoan và tuổi thọ của kết cấu. Để giải quyết được vấn đề này, cần tập trung giải bài toán động lực học của cơ hệ theo lý thuyết [5–7] nhằm xác định được các thông số về phổ biên độ tần số của các khâu và điểm khảo sát. Kết quả nghiên cứu là cơ sở đánh giá chất lượng lỗ khoan của máy khoan nổ mìn chế tạo trong nước,...

Nội dung nghiên cứu động lực học của hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng được tác giả đề cập khá kỹ trong các tài liệu [8–12]. Trong những tài liệu này, nhóm tác giả đưa ra cách thức thiết lập phương trình động lực học của hệ nhiều vật có cấu trúc cây bằng các phương trình Lagrange loại 2, còn với các robot song song tác giả sử dụng phương pháp tách cấu trúc và phương pháp Lagrange dạng nhân tử để thiết lập phương trình chuyển động của cơ hệ nhiều vật. Ngoài ra, nhóm tác giả đã trình bày hai phương pháp số giải bài toán động lực học ngược robot song song [8], đó là phương pháp dựa trên các phương trình Lagrange dạng nhân tử và phương pháp dựa trên các phương trình vi phân thu gọn về các tọa độ tối thiểu. Bên cạnh đó, nhóm tác giả cũng đề xuất ba thuật toán biến đổi phương trình chuyển động của hệ nhiều vật cấu trúc mạch vòng từ dạng phương trình vi phân - đại số sang phương trình vi phân thường để giải bài toán động lực học [7].

Tài liệu [9] đã đề xuất phương pháp ổn định hóa phương trình liên kết của hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng dựa trên nguyên lý trượt, do trong quá trình tích phân các liên kết của cơ hệ có thể bị phá vỡ. Tài liệu [13, 14] nghiên cứu áp dụng phương pháp ổn định hóa Baumgarte khi giải cơ hệ bằng phương trình Lagrange dạng nhân tử.

Tài liệu [15] nghiên cứu động lực học xi lanh thủy lực dẫn động cơ cấu lái trên máy xây dựng, trong mô hình tính động lực học xi lanh thủy lực có kể đến độ nhớt, mô đun đàn hồi và hệ số cản của môi chất công tác. Tác giả đã đánh giá ảnh hưởng một số thông số của xi lanh thủy lực tới độ chính xác của hướng lái như: thông số của dầu thủy lực công tác, van phân phối, đường ống, cút nối, rò rỉ,... Kết quả nghiên cứu, thấy rằng áp suất và thể tích của dầu thủy lực trong các khoang của xi lanh ảnh hưởng nhiều độ chính xác của hướng lái. Tuy nhiên mô hình động lực học của xi lanh thủy lực mới chỉ xét cho bài toán phẳng.

Tài liệu [1] nghiên cứu động học và động lực học hệ giá đỡ thiết bị khoan và đã tính toán trực tiếp động lực học xy lanh thủy lực, nghiên cứu động lực học không gian hệ giá đỡ thiết bị khoan nổ mìn sử dụng dạng thức hệ nhiều vật có cấu trúc nửa kín nửa hở, chịu tương tác môi trường. Từ đó làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về liên kết và điều khiển bằng xy lanh thủy lực. Theo tài liệu [1], khi tiếp cận với máy khoan lỗ nổ mìn, phần lớn các tác giả tập trung nghiên cứu về động lực học cụm

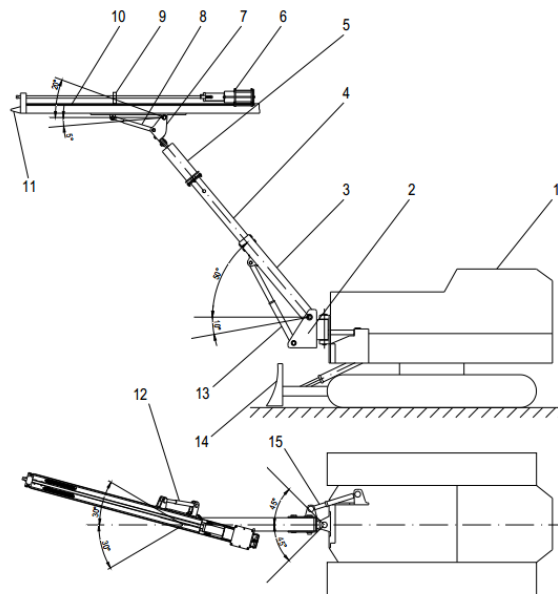
đầu khoan, về chế độ làm việc của cụm đầu khoan, về tương tác mũi khoan với đá, về biến dạng của cần khoan,... mà rất hiếm có tài liệu nào nghiên cứu về động lực học hệ giá đỡ thiết bị khoan. Mặt khác, đối tượng nghiên cứu của bài báo là cơ hệ nhiều vật được liên kết và dẫn động bởi các xi lanh thủy lực, rung động của cơ hệ là do xi lanh thủy lực khi coi các khâu và khớp cứng tuyệt đối, không rơ lỏng. Trong quá trình làm việc hệ giá đỡ này có vai trò giữ ổn định và dẫn hướng cụm đầu khoan thông qua giá trượt được tỳ vào vách đá.

Từ những vấn đề còn tồn tại của hệ giá khoan chế tạo trong nước và các cơ sở khoa học từ những công bố nêu trên, bài báo này tập trung khảo sát và phân tích động lực học không gian máy khoan nổ mìn sử dụng dạng thức hệ nhiều vật có cấu trúc nửa kín nửa hở giúp khuyến cáo trong thiết kế chế tạo và sử dụng thiết bị.

2. Xây dựng mô hình động lực học

2.1. Các giả thiết xây dựng mô hình

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập MK-Z49 được chế tạo tại Nhà máy Z49 - Bình chủng Công binh, có sơ đồ cấu tạo như sau (Hình 1).



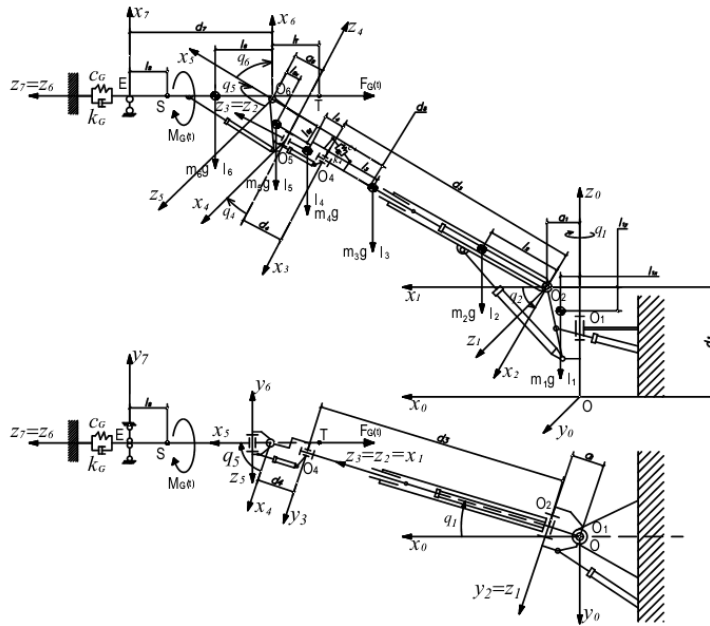
Hình 1. Sơ đồ cấu tạo máy khoan nổ mìn MK-Z49

- 1 - Máy cơ sở, 2 - Khâu đế, 3 - Cần máy, 4 - Đốt trong cần, 5 - Chụp đầu cần, 6 - Cụm máy khoan,
- 7 - Giá tam giác, 8 - Xi lanh nâng hạ giá dẫn hướng khoan, 9 - Cơ cấu chống cong cần khoan,
- 10 - Giá dẫn hướng khoan, 11 - Mũi tỳ vào gương khoan, 12 - Xi lanh lắc giá tam giác;
- 13 - Xi lanh nâng hạ cần; 14 - Lưỡi ủi; 15 - Xi lanh lắc khâu đế.

Để xây dựng mô hình động lực học, một số giả thiết được đưa ra như sau: Nền máy đứng, các khâu của chuỗi 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, bỏ qua ma sát và không có biến dạng đàn hồi, các xi lanh thủy lực bị khóa tại mỗi vị trí trước khi khoan và xi lanh được coi là một phần tử đàn hồi do tính chịu nén của chất lỏng; Các khâu có khối lượng tập trung; Khâu dẫn hướng khoan được ghim tỳ chặt vào vách gương khoan, cứng tuyệt đối nên 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 khi làm việc.

2.2. Mô hình động lực học

Trên cơ sở kết cấu và hoạt động của máy thực, mô hình (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 tiến); khâu 4 (chụp đỉnh cần, quay); khâu 5 (khâu tam giác, lắc ngang); khâu 6 (cụm giá đỡ đầu 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 cùng với hai phương bị ràng buộc tại điểm tỳ E (Hình 2). Các tọa độ suy rộng $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]$ dùng để xác định vị trí của cơ hệ theo phương pháp Denavit - Hartenberg [6]. Mô hình hệ giá đỡ máy khoan có 6 khâu giữ và dừng, chịu 2 liên kết theo hai phương y_E và z_E .



Hình 2. Mô hình động lực học máy khoan

Coi cụm mũi khoan, cần khoan và mô tơ khoan là một khối lượng tập trung (khâu 7) chịu tác dụng của lực thay đổi tác dụng liên tục trong quá trình khoan, tổ hợp lực này là ngoại lực tác động vào giá dẫn hướng máy khoan (khâu 6). Các khâu liên kết với nhau bằng khớp bản lề O_1 (khâu 1 với khâu 0); O_2 (khâu 2 với khâu 1); khớp quay O_4 (khâu 4 với khâu 3); O_5 (khâu 5 với khâu 4); O_6 (khâu 6 với khâu 5) và liên kết tịnh tiến giữa khâu 3 với khâu 2. Các tham số động học D-H (Bảng 1), vị trí các khối tâm và các ma trận quán tính các khâu trong hệ tọa độ khâu (Bảng 2) có thông số như sau:

Bảng 1. Bảng tham số động học Denavit - Hartenberg

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

Bảng 2. 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					
	$x_{Ci}^{(i)}$	$y_{Ci}^{(i)}$	$z_{Ci}^{(i)}$		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{yz}	I_{zx}
1	$-l_{1x}$	l_{1y}	0	m_1	J_{1x}	J_{1y}	J_{1z}	J_{1xy}	J_{1yz}	J_{1zx}
2	0	0	l_2	m_2	J_{2x}	J_{2y}	J_{2z}	J_{2xy}	J_{2yz}	J_{2zx}
3	0	0	$-l_3$	m_3	J_{3x}	J_{3y}	J_{3z}	J_{3xy}	J_{3yz}	J_{3zx}
4	0	d_4	0	m_4	J_{4x}	J_{4y}	J_{4z}	J_{4xy}	J_{4yz}	J_{4zx}
5	$-l_{5x}$	l_{5y}	0	m_5	J_{5x}	J_{5y}	J_{5z}	J_{5xy}	J_{5yz}	J_{5zx}
6	0	l_6	0	m_6	J_{6x}	J_{6y}	J_{6z}	J_{6xy}	J_{6yz}	J_{6zx}

Các ma trận truyền \mathbf{H}_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) cỡ 4×4 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:

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

Các ma trận truyền \mathbf{D}_i giữa hệ tọa độ gốc $\{x_0, y_0, z_0\}$ tới khâu $i \{x_i, y_i, z_i\}$: $\mathbf{D}_i = \prod_{k=1}^i \mathbf{H}_k$, các ma trận truyền có dạng: $\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{r}_{Oi}^{(0)} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$.

Ma trận khối lượng suy rộng (ma trận quán tính) được xác định bởi [4]

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^6 \left[\mathbf{J}_{Ti}^T m_i \mathbf{J}_{Ti} + \mathbf{J}_{Ri}^{(i)T} \mathbf{I}_i^{(i)} \mathbf{J}_{Ri}^{(i)} \right] \quad (2)$$

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 [11]:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\mathbf{I}_n \otimes \dot{\mathbf{q}}) + \left(\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{I}_n) \right) - \left(\frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{I}_n) \right)^T \right] \quad (3)$$

Thế năng của hệ được viết dưới dạng:

$$\Pi = - \sum_{i=1}^6 m_i \bar{\mathbf{g}}^T \mathbf{r}_i \quad (4)$$

trong đó $\bar{\mathbf{g}} = [0, 0, -g]^T$ với gia tốc trọng trường

$$g \approx 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = - \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{q}} \right)^T = \left(\sum_{i=1}^6 m_i \mathbf{J}_{Ti}^T \right) \bar{\mathbf{g}} \quad (6)$$

Véc tơ lực trọng trường được xác định bởi: Các phương trình liên kết (ràng buộc) vị trí điểm tỳ E:

$$\begin{aligned} f_1 &= y_E - y_{EE} = 0 \\ f_2 &= z_E - z_{EE} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

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

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 holoônôm chịu liên kết giữ, dừng và lý tưởng [6]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Q - \Phi_q^T(q)\lambda \quad (8)$$

$$f(q) = 0 \quad (9)$$

trong đó Q là vector lực suy rộng ứng với các lực hoạt động không có thế (lực $F_G(t)$, mô men $M_G(t)$ và các lực xy lạnh), $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]^T$ là véc tơ các nhân tử Lagrange, $f = [f_1, f_2]^T$ là các điều kiện ràng buộc, Φ_q là ma trận Jacobi của f cỡ 2×6 , với $\Phi_q = \frac{\partial f}{\partial q}$. Hệ phương trình vi phân - đại số (8) và (9) có thể triển khai theo dạng sau:

$$\left\{ \begin{aligned} &\begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{16} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{61} & \dots & m_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \dots \\ \ddot{q}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{16} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{61} & \dots & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dots \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ \dots \\ g_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \dots \\ Q_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{21} \\ \dots & \dots \\ \Phi_{16} & \Phi_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \\ &f_1 = 0 \\ &f_2 = 0 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

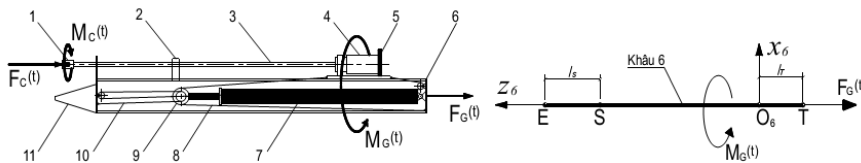
2.3. Lực suy rộng của các lực hoạt động

a. Các lực hoạt động

Các lực hoạt động tác động vào cơ hệ được thể hiện chi tiết (Bảng 3).

Bảng 3. Các lực hoạt động tác động vào cơ hệ

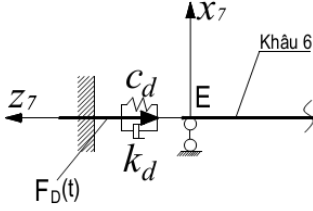
TT	Lực hoạt động	Ký hiệu	Cách xác định
1	Lực tác động vào giá khoan	$F_G(t)$	Xác định bằng thực nghiệm
2	Mô men xoắn giá khoan	$M_G(t)$	Xác định bằng thực nghiệm
3	Phản lực của đá vào mũi tỳ	$F_D(t)$	Xác định theo lý thuyết kết hợp thực nghiệm
4	Lực hoạt động của lực xi lạnh	F_{xl}	Xác định theo lý thuyết
5	Ngẫu lực tương tác giữa khâu 4 và khâu 3	M_4	Xác định theo lý thuyết



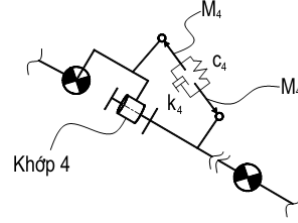
Hình 3. Ngoại lực tác động vào cơ hệ

$F_C(t)$ và $M_C(t)$ là phản lực và mô men cản tác dụng vào mũi khoan, $F_G(t)$ và $M_G(t)$ là lực và mô men tác động của cụm khoan lên giá đỡ, 1- Mũi khoan, 2- Cơ cấu chống cong cần khoan, 3- Cần khoan, 4- Cụm máy khoan, 5- Tấm đế liên kết máy khoan với bàn trượt, 6- Giá dẫn hướng khoan, 7- Xi lạnh dẫn tiến, 8- Nhánh cáp tiến, 9- Cụm pully cáp, 10- Nhánh cáp lùi, 11- mũi tỳ của giá dẫn hướng vào gương khoan

- Lực $\vec{F}_G(t)$ và mô men $\vec{M}_G(t)$ tác động từ mũi khoan vào cơ hệ (Hình 3).
- Lực $\vec{F}_D(t)$ tác động từ đá vào mũi tỳ của giá dẫn hướng khi máy làm việc (Hình 4).
- Ngẫu lực sinh ra từ liên kết khâu 4 và khâu 3 (\vec{M}_4) ở Hình 5.

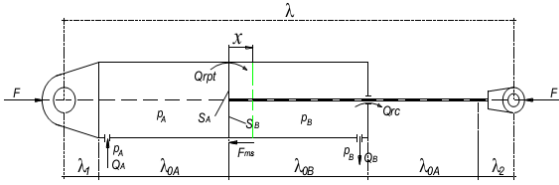


Hình 4. Lực tác động vào mũi tỳ của giá khoan

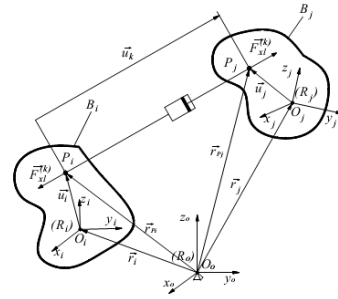


Hình 5. Mô tả liên kết giữa khâu 3 và khâu 4

- Lực sinh ra từ các xy lanh thủy lực (\vec{F}_{xl}) (Hình 6 và Hình 7).



Hình 6. Mô hình động lực học của xy lanh thủy lực



Hình 7. Mô hình tính toán lực tác dụng của xy lanh thủy lực

b. Công suất của các lực hoạt động tác dụng vào cơ hệ

Các xác định công suất của lực $\vec{F}_G(t)$, công suất của mô men $\vec{M}_G(t)$, công suất của lực từ đá tác dụng lên điểm tỳ \vec{F}_D và công suất của lực tác động giữa khâu 4 và khâu 3 đã được trình bày kỹ trong [1, 6], cụ thể:

- Công suất của ngoại lực tác động lên giá khoan:

Biểu thức công suất của lực $\vec{F}_G(t)$ có dạng:

$$W(\vec{F}_G(t)) = \vec{F}_G(t) \vec{v}_T = (\vec{F}_G^{(0)})^T \vec{v}_T \quad (11)$$

trong đó \vec{v}_T là véc tơ vận tốc điểm tác động lên giá khoan (điểm T).

$$\vec{v}_T = \mathbf{J}_T \dot{\mathbf{q}} \quad (12)$$

với \mathbf{J}_T là ma trận Jacobi của véc tơ vị trí điểm T:

$$\mathbf{J}_T = \frac{\partial \mathbf{r}_T^{(0)}}{\partial \mathbf{q}} = \left[\frac{\partial x_T}{\partial \mathbf{q}}; \frac{\partial y_T}{\partial \mathbf{q}}; \frac{\partial z_T}{\partial \mathbf{q}} \right]^T \quad (13)$$

với x_T, y_T, z_T là tọa độ điểm tác động T. Vì điểm T thuộc giá khoan (khâu 6) nên nếu tọa độ địa phương của nó trên khâu 6 là: $\mathbf{r}_T^{(6)} = [0; 0; -l_T]^T$ thì véc tơ vị trí của điểm T trong hệ quy chiếu cố định là:

$$\mathbf{r}_T^{(0)} = [x_T; y_T; z_T]^T = \mathbf{A}_6 [0; 0; -l_T]^T \quad (14)$$

Thế ma trận quay khâu 6 vào (14), ta thu được biểu thức của vị trí điểm T trong hệ tọa độ cố định theo các biểu thức $x_T; y_T; z_T$ được trình bày chi tiết trong [1].

Thế biểu thức (12) vào (11), ta thu được biểu thức công suất của lực $F_G(t)$:

$$W(\vec{F}_G(t)) = (\mathbf{Q}_G)^T \dot{\mathbf{q}} \quad (15)$$

Với véc tơ lực suy rộng:

$$\mathbf{Q}_G = \mathbf{J}_T^T \mathbf{F}_G^{(0)} = \mathbf{J}_T^T [0; 0; -1]^T F_G(t) \quad (16)$$

- Công suất của mô men ngoại lực tác động lên giá khoan:

Biểu thức công suất của lực $M_G(t)$ có dạng:

$$W(\vec{M}_G(t)) = \vec{M}_G(t) \vec{\omega}_6 = (\mathbf{M}_G^{(6)})^T \omega_6^{(6)} \quad (17)$$

Mô men $M_G(t)$ quay cùng chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trục z_6 của hệ $\{x_6, y_6, z_6\}$. Từ đó, các hình chiếu của $M_G(t)$ là:

$$\mathbf{M}_G^{(6)} = [0; 0; -1]^T M_G(t) \quad (18)$$

Vận tốc góc của khâu 6 khi chiếu lên hệ $\{x_6, y_6, z_6\}$:

$$\omega_6^{(6)} = \mathbf{J}_{RE} \dot{\mathbf{q}} \quad (19)$$

trong đó \mathbf{J}_{RE} là ma trận Jacobi quay của khâu số 6:

$$\mathbf{J}_{RE}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \omega_6^{(6)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \quad (20)$$

Thế biểu thức (18), (19) vào (17), ta thu được biểu thức công suất:

$$W(\vec{M}_G(t)) = (\mathbf{Q}_{MG})^T \dot{\mathbf{q}} \quad (21)$$

với véc tơ:

$$\mathbf{Q}_{MG} = \mathbf{J}_{RE}^T \mathbf{M}_G^{(6)} = \mathbf{J}_{RE}^T [0; 0; -1]^T M_G(t) \quad (22)$$

- Công suất của lực từ vách đá tác dụng lên giá khoan:

Biểu thức công suất của lực F_D có dạng:

$$W(\vec{F}_D(t)) = \vec{F}_D(t) \vec{v}_E = (\mathbf{F}_D^{(0)})^T \mathbf{v}_E \quad (23)$$

trong đó \mathbf{v}_E là véc tơ vận tốc điểm tì E.

$$\mathbf{v}_E = \mathbf{J}_{TE} \dot{\mathbf{q}} \quad (24)$$

trong đó \mathbf{J}_{TE} là ma trận Jacobi của vị trí điểm tì E:

$$\mathbf{J}_{TE} = \frac{\partial \mathbf{r}_E^{(0)}}{\partial \mathbf{q}} = \left[\frac{\partial x_E}{\partial \mathbf{q}}; \frac{\partial y_E}{\partial \mathbf{q}}; \frac{\partial z_E}{\partial \mathbf{q}} \right]^T \quad (25)$$

Công suất của lực từ đá tác dụng lên điểm tỳ:

$$W(\vec{F}_D(t)) = (\mathbf{Q}_D)^T \dot{\mathbf{q}} \quad (26)$$

với lực suy rộng:

$$\mathbf{Q}_D = \mathbf{J}_{TE}^T \mathbf{F}_D^{(0)} = \mathbf{J}_{TE}^T [0; 0; -1]^T [c_d (x_E - x_E(0)) + k_d \dot{x}_E] \quad (27)$$

- Công suất của các lực do xy lanh tác dụng lên cơ hệ:

Từ phương trình (8), việc xác định lực suy rộng ứng với các lực hoạt động không có thể là nhiệm vụ chính, đặc biệt xác định lực tác động lên xy lanh là vấn đề cần quan tâm trong luận án này. Phát triển từ mô hình động lực học xy lanh thủy lực với bài toán phẳng được trình bày kỹ trong tài liệu [15] và triển khai mô hình 3D trong [1] theo Hình 6 và Hình 7.

Để đơn giản hóa mô hình, chúng ta giả thiết rằng tính nén của dầu thủy lực $E_0(p)$ là không đổi, với dầu thủy lực trong hệ thống truyền động thủy lực trên máy xây dựng và máy thi công thường chọn theo tài liệu [5] là: $E_0 = 2,85.10^9$ (N/m²). Với điều kiện không có sự rò rỉ dầu trong xy lanh $Q_{rc} = Q_{rpt} = 0$, và mạch thủy lực có bố trí van một chiều có điều khiển nối với cửa vào ra của mỗi xy lanh. Ký hiệu lực tác động vào xy lanh là F . Do khối lượng của xy lanh nhỏ hơn nhiều so với khối lượng của các khâu nên ta bỏ qua khối lượng của xy lanh. Theo tài liệu [1, 15] ta có hệ phương trình cân bằng của mỗi xy lanh thủy lực như sau:

$$F = p_A.S_A - p_B.S_B - k.\dot{x} \quad (28)$$

$$\dot{p}_A = \frac{E_0(p_A)}{V_{0A} + S_A x} (Q_A(p_A) - S_A \dot{x}) \quad (29)$$

$$\dot{p}_B = \frac{E_0(p_B)}{V_{0B} + S_B x} (Q_B(p_B) + S_B \dot{x}) \quad (30)$$

trong đó: p_A, p_B , tương ứng là áp suất dầu tại khoang A và B; S_A, S_B , tương ứng là diện tích bề mặt pít tông tại khoang A và B; k là hệ số ma sát giữa pít tông và xy lanh, trong xy lanh thủy lực chọn theo [5, 16], lấy giá trị $k = 10$ Ns/mm; x là dịch chuyển của pít tông trong xy lanh; $F(x)$ là lực tác dụng lên cán pít tông (trọng lượng quy đổi của toàn bộ thiết bị công tác quy đổi tại cán pít tông); V_{0A} là thể tích ban đầu trong khoang A khi pít tông ở vị trí giữa; $Q_A(p_A)$ là lưu lượng dầu đi vào khoang A; $Q_B(p_B)$ là lưu lượng dầu đi vào khoang B.

Do van phân phối khóa dòng dầu cấp cho các xy lanh thủy lực nhằm giữ hệ giá đỡ trước khi khoan nên $Q_A = Q_B = 0$. Từ biểu thức (29), ta suy ra:

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{E_0}{V_{0A} + x.S_A} \left(-S_A \cdot \frac{dx}{dt} \right) \Rightarrow \frac{dp_A}{dx} = \frac{-E_0.S_A}{V_{0A} + x.S_A} \Rightarrow dp_A = \frac{-E_0.S_A}{V_{0A} + x.S_A} dx$$

Suy ra

$$p_A(x) = -E_0 \ln |V_{0A} + x.S_A| + C \quad (31)$$

Tại $x = 0$ ta có $p_A = p_A(0)$ nên ta có:

$$p_A(0) = -E_0 \ln |V_{0A}| + C \Rightarrow C = p_A(0) + E_0 \ln |V_{0A}| \quad (32)$$

Thay (32) vào (31) ta được công thức tính áp suất khoang A:

$$\begin{aligned} p_A(x) &= -E_0 \ln |V_{0A} + x.S_A| + p_A(0) + E_0 \ln |V_{0A}| = -E_0 \ln \left| \frac{V_{0A} + x.S_A}{V_{0A}} \right| + p_A(0) \\ &= -E_0 \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0A}} \right| + p_A(0) \end{aligned} \quad (33)$$

Với $l_{0A} = \frac{V_{0A}}{S_A}$ là chiều dài ban đầu của khoang A khi $x = 0$.

Từ biểu thức (30) ta cũng suy ra: $\frac{dp_B}{dx} = \frac{E_0.S_B}{V_{0B} + x.S_B}$.

Biến đổi tương tự như $p_A(x)$ ta thu được các công thức tính áp suất khoang B:

$$p_B(x) = E_0 \cdot \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0B}} \right| + p_B(0) \quad (34)$$

Thế (33) và (34) vào (28), ta được công thức xác định lực xy lanh tổng quát:

$$F(x) = \left(-E_0 \cdot \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0A}} \right| + p_A(0) \right) \cdot S_A - \left(E_0 \cdot \ln \left| 1 + \frac{x}{l_{0B}} \right| + p_B(0) \right) \cdot S_B - k \cdot \dot{x} \quad (35)$$

trong đó l_{0A}, l_{0B} là chiều dài ban đầu của khoang A và B, $p_A(0), p_B(0)$ là áp suất ban đầu của khoang A và B. Sau khi xác định được lực xy lanh theo (35), ta có mô hình lực xy lanh tác dụng lên các khâu như (Hình 7).

Sau khi xác định được lực tác động lên xy lanh theo (35), ta có công suất của lực tác động lên xy lanh thứ k là:

$$W(\vec{F}_{xl}^{(k)}) = \vec{F}_{xl}^{(k)} (\vec{v}_{Pj} - \vec{v}_{Pi}) \quad (36)$$

Mặt khác, từ (Hình 7) ta xác định được:

$$\vec{u}_k = \vec{r}_{Pj} - \vec{r}_{Pi} \Rightarrow \dot{\vec{u}}_k = \dot{\vec{r}}_{Pj} - \dot{\vec{r}}_{Pi} = \vec{v}_{Pj} - \vec{v}_{Pi} \quad (37)$$

Thế (37) vào (36), ta có công suất:

$$W = \vec{F}_{xl}^{(k)} \dot{\vec{u}}_k \quad (38)$$

Trong mô hình các véc tơ $\vec{F}_{xl}^{(k)}, \vec{u}_k$ là cùng chiều. 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. Các cosin chỉ hướng $\cos \varphi, \cos \psi, \cos \theta$ thỏa mãn đẳng thức:

$$\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta = 1 \quad (39)$$

Ta có:

$$\vec{F}_{xl}^{(k)} = F_{xl}^{(k)} (\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0}) \quad (40)$$

$$\vec{u}_k = |\vec{u}_k| (\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0}) \quad (41)$$

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

Đạo hàm hai vế (41), ta thu được biểu thức:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{u}}_k &= |\dot{\vec{u}}_k| (\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0}) \\ &+ |\vec{u}_k| \frac{d}{dt} (\cos \varphi \vec{e}_{x_0} + \cos \psi \vec{e}_{y_0} + \cos \theta \vec{e}_{z_0}) \end{aligned} \quad (42)$$

Thế (42) và (40) vào (38), ta thu được biểu thức công suất:

$$\begin{aligned} W &= F_{xl}^{(k)} |\dot{\vec{u}}_k| (\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta) \\ &+ F_{xl}^{(k)} |\vec{u}_k| \left(\cos \varphi \frac{d \cos \varphi}{dt} + \cos \psi \frac{d \cos \psi}{dt} + \cos \theta \frac{d \cos \theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

Đạo hàm (39) ta có biểu thức:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\cos^2 \varphi + \cos^2 \psi + \cos^2 \theta) &= 2 \left(\cos \varphi \frac{d \cos \varphi}{dt} + \cos \psi \frac{d \cos \psi}{dt} + \cos \theta \frac{d \cos \theta}{dt} \right) \\ &= -(\dot{\varphi} \sin 2\varphi + \dot{\psi} \sin 2\psi + \dot{\theta} \sin 2\theta) = 0 \end{aligned} \quad (44)$$

Thế (39) và (44) vào (43), ta được biểu thức đơn giản của công suất:

$$W(\vec{F}_{xl}^{(k)}) = F_{xl}^{(k)} |\dot{\mathbf{u}}_k| = F_{xl}^{(k)} \frac{\partial |\mathbf{u}_k|}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{Q}_{xl}^{(k)})^T \dot{\mathbf{q}} \quad (45)$$

với

$$\mathbf{Q}_{xl}^{(k)} = \left(\frac{\partial |\mathbf{u}_k|}{\partial \mathbf{q}} \right)^T F_{xl}^{(k)} \quad (46)$$

trong đó $|\mathbf{u}_k|$ là chiều dài xy lanh và $F_{xl}^{(k)}$ là lực tác động lên xy lanh được xác định thông qua công thức (35). Việc tính $|\mathbf{u}_k|$ tương đối đơn giản nhờ công thức (37):

$$|\mathbf{u}_k| = |\mathbf{r}_{Pj} - \mathbf{r}_{Pi}| = \left| (\mathbf{r}_{Oj} + \mathbf{A}_j \mathbf{u}_j^{(j)}) - (\mathbf{r}_{Oi} + \mathbf{A}_i \mathbf{u}_i^{(i)}) \right| \quad (47)$$

- Công suất của lực tác động giữa khâu 4 và khâu 3

Biểu thức công suất của ngẫu lực \mathbf{M}_4 có dạng:

$$W(\vec{M}_4) = M_4 \dot{q}_4 \quad (48)$$

Do $\dot{q}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}$, nên biểu thức công suất của ngẫu lực \mathbf{M}_4 có dạng: $W(\mathbf{M}_4) = (\mathbf{Q}_4)^T \dot{\mathbf{q}}$ trong đó:

$$\mathbf{Q}_4 = \mathbf{M}_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -c_4(q_4 - q_4^{(0)}) - k_4 \dot{q}_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Từ các biểu thức công suất (15), (21), (26), (45) và (48), ta thu được biểu thức tổng công suất của 5 loại lực hoạt động:

$$W = W(\vec{F}_G(t)) + W(\vec{M}_G(t)) + W(\vec{F}_D) + \sum_{k=1}^5 W(\vec{F}_{xl}^{(k)}) + W(\vec{M}_4) \quad (50)$$

Biểu thức công suất có dạng: $W = \mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{q}}$, trong đó ma trận lực suy rộng của các lực hoạt động:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_G + \mathbf{Q}_{MG} + \mathbf{Q}_D + \sum_{k=1}^5 \mathbf{Q}_{xl}^{(k)} + \mathbf{Q}_4 \quad (51)$$

3. Phương pháp giải hệ phương trình vi phân-đại số của hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng

Theo phương pháp giải hệ phương trình vi phân - đại số [6], 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. Hệ phương trình vi phân - đại số mô tả chuyển động của hệ nhiều vật Hôlônôm chịu liên kết giữ và lý tưởng theo các phương trình (8) và (9). Để thuận tiện cách viết ta đưa vào biểu thức:

$$\mathbf{p}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{Q}(t) - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (52)$$

Khi đó các phương trình (8), (9) có dạng:

$$M(q)\ddot{q} + \Phi_q^T(q)\lambda = p_1(q, \dot{q}, t) \quad (53)$$

$$f(q) = O \quad (54)$$

Đạo hàm hai lần phương trình liên kết và thu được các phương trình:

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q} = \Phi_q \dot{q} = O \quad (55)$$

$$\ddot{f} = \Phi_q \ddot{q} + \dot{\Phi}_q \dot{q} = O \Rightarrow \Phi_q \ddot{q} = -\dot{\Phi}_q \dot{q} =: p_2 \quad (56)$$

Các phương trình (53) và (56) có thể viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Hệ hai phương trình (56) và (57) có thể viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} R^T M \\ \Phi_q \end{bmatrix} \ddot{q} = \begin{bmatrix} R^T p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Để giải hệ (58) thì các điều kiện đầu cần thỏa mãn các phương trình liên kết hình học và động học:

$$f(q_0) = O, \quad \Phi_q(q_0)\dot{q}_0 = O \quad (59)$$

Theo phương pháp Baumgarte [13], thay vì giải phương trình $\ddot{f}(q, \dot{q}) = O$, ta sẽ tiến hành giải phương trình:

$$\ddot{f} + 2\alpha\dot{f} + \beta^2 f = O \quad (60)$$

Như vậy thay cho giải hệ phương trình:

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + \Phi_q^T(q)\lambda &= p_1(q, \dot{q}, t) \\ \ddot{f} &= O \end{aligned} \quad (61)$$

Ta sẽ tiến hành giải hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + \Phi_q^T(q)\lambda &= p_1(q, \dot{q}, t) \\ \ddot{f} + 2\alpha\dot{f} + \beta^2 f &= O \end{aligned} \quad (62)$$

Hệ phương trình (62) có thể viết lại dưới dạng ma trận

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \hat{p}_2 \end{bmatrix} \quad (63)$$

4. Mô phỏng số

4.1. Số liệu đầu vào

Để giải bài toán, cần có các số liệu đầu vào gồm thông số hình học của kết cấu, thông số về vị trí của các xy lanh trong không gian, thông số về mô men quán tính và thông số về trạng thái ban đầu của cơ hệ được xác định theo (Bảng 4, 5, 6) dưới đây. Khi tính toán có sử dụng phương pháp điều khiển Baumgarte [13].

Thông số về vị trí đầu cuối của các xy lanh dẫn động các khâu trong không gian được trình bày chi tiết trong phụ lục của tài liệu [1]. Theo tài liệu [1] quá trình thực nghiệm khoan tại 09 lỗ (Hình 8), mỗi lỗ khoan ứng với mỗi trạng thái làm việc khác nhau của cơ hệ, tất cả các lỗ khoan đều lưu giữ đầy đủ số liệu trong quá trình thực nghiệm. Thông số về ngoại lực được đo từ thực nghiệm, được hồi quy và hàm hóa, các bước được trình bày chi tiết trong [17] và thể hiện kết quả ở Hình 9.

Bảng 4. Các tham số của máy khoan nổ mìn

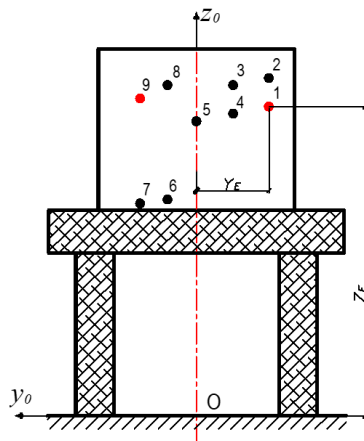
Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)
d_1	869	l_{1x}	58
d_4	310	l_{1y}	46
d_5	177	l_2	684
d_7	1929	l_3	530
a_1	155	l_{5x}	237
a_5	160	l_{5y}	47
a_6	0	l_6	561

Bảng 5. Thông số kết cấu các xy lanh của bộ công tác khoan

Thông số	XL lắc đế (XL1)	XL nâng cần (XL2)	XL đẩy cần (XL3)	XL lắc khâu tam giác (XL4)	XL nâng hạ giá khoan (XL5)
ĐK nòng (D), mm	80	80	80	63	63
ĐK cần (d), mm	40	40	40	30	30
Kích thước khi XL co hết cỡ	717	567	1330	472	558
l_1 (mm)	50	60	60	40	50
l_2 (mm)	70	80	80	60	70

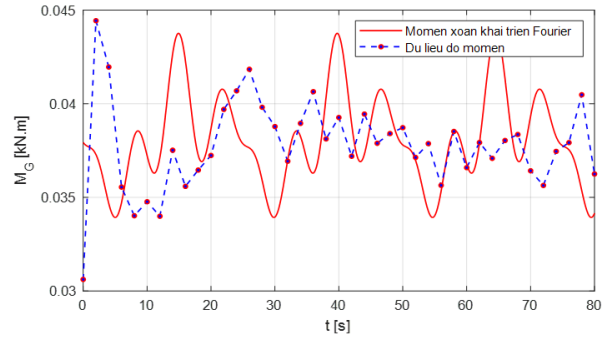
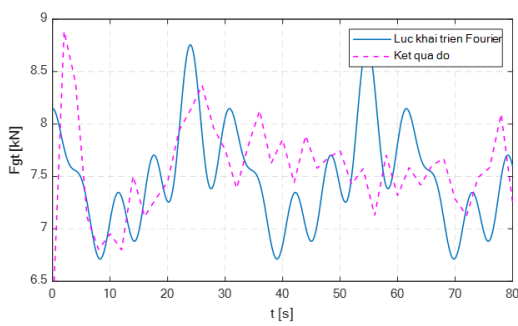
Bảng 6. Thông số ma trận quán tính các khâu trong hệ tọa độ khâu

TT	Tên khâu	I_{xx} (kg.m ²)	I_{xy} (kg.m ²)	I_{xz} (kg.m ²)	I_{yy} (kg.m ²)	I_{yz} (kg.m ²)	I_{zz} (kg.m ²)	Khối lượng (Kg)
1	Khâu 1	0,3295	0,000	0,000	0,8525	0,000	1,024	27,377
2	Khâu 2	0,8597	-3,196.10 ⁻⁶	-3,355.10 ⁻⁶	12,664	4,325.10 ⁻⁶	12,6658	79,143
3	Khâu 3	0,2135	0,000	0,000	2,9135	0,000	2,9135	19,929
4	Khâu 4	0,3600	-0,34.10 ⁻⁹	0,000	1,0170	2,084.10 ⁻⁶	1,0236	32,997
5	Khâu 5	0,1994	0,1132	-7,183.10 ⁻⁶	0,5367	-1,946.10 ⁻⁶	0,6227	24,560
6	Khâu 6	0,6551	0,000	0,000	48,7536	0,000	48,8433	87,032



Hình 8. Vị trí lỗ khoan thí nghiệm trên mẫu khoan

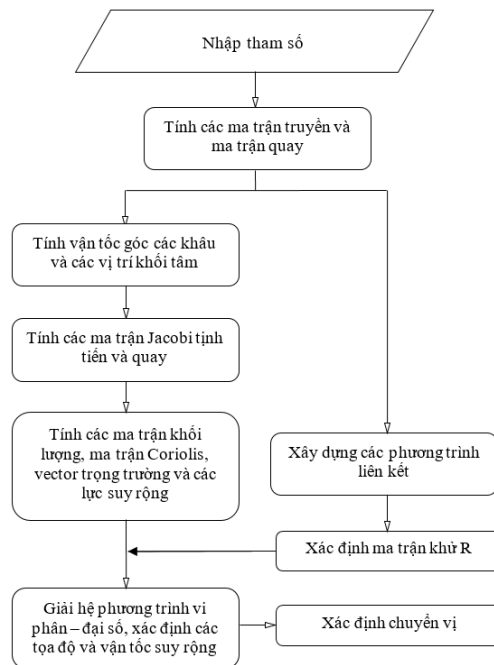
Thông số tọa độ ban đầu tại lỗ khoan số 09: $y_E^{(0)} = 0,35$ m, $z_E^{(0)} = 1,710$ m, $q_1(0) = 3^\circ$, $q_2(0) = 69^\circ$, $q_3(0) = 1,940$ m, $q_4(0) = 90^\circ$, $q_5(0) = -90,7^\circ$, $q_6(0) = -41,5^\circ$



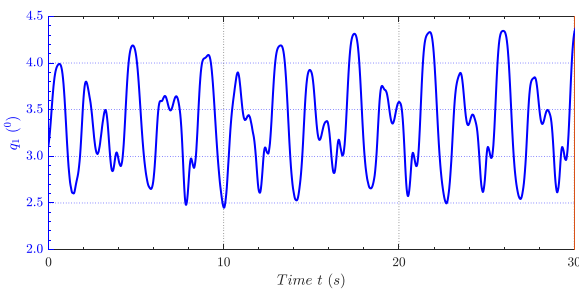
Hình 9. Đồ thị hàm hóa lực $F_G(t)$ và mô men $M_G(t)$ tác dụng vào hệ

4.2. Kết quả

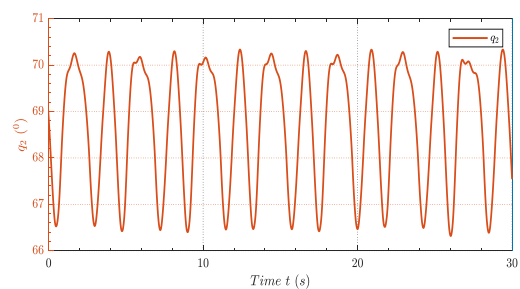
Mô phỏng bằng phần mềm MATLAB dựa trên sơ đồ thuật toán chương trình (Hình 10), điểm S xét chuyển vị (Hình 3). Kết quả dao động các khâu (Hình 11 đến Hình 20).



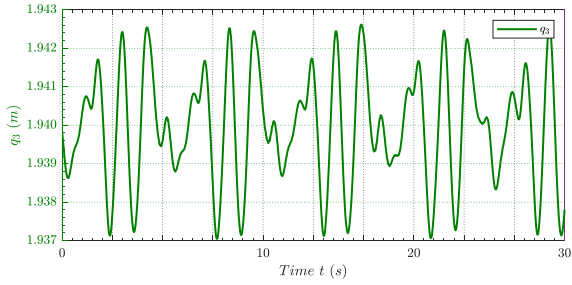
Hình 10. Sơ đồ khối chương trình tính động lực học máy khoan



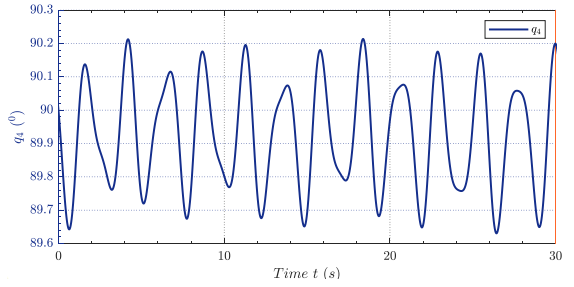
Hình 11. Đồ thị q_1



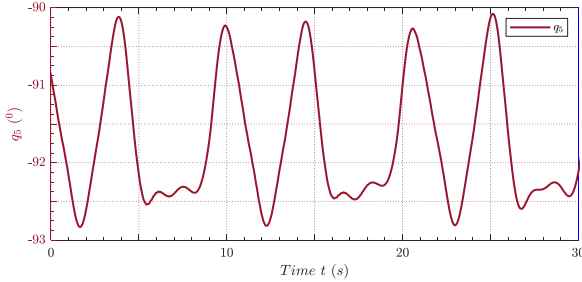
Hình 12. Đồ thị q_2



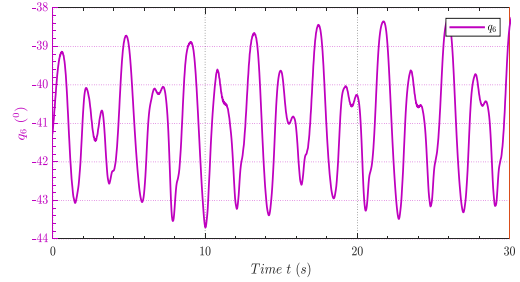
Hình 13. Đồ thị q_3



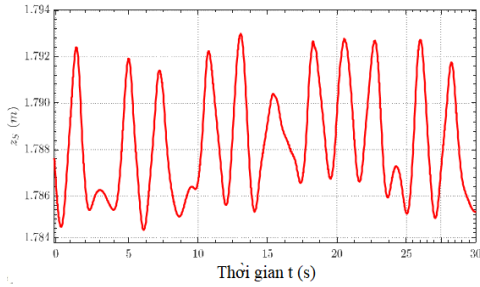
Hình 14. Đồ thị q_4



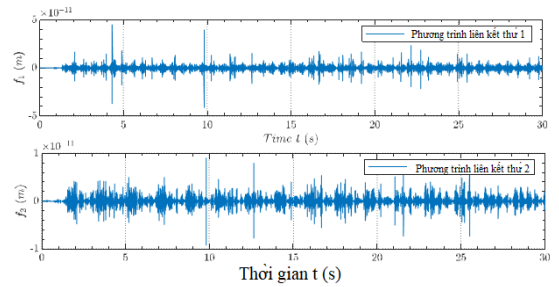
Hình 15. Đồ thị q_5



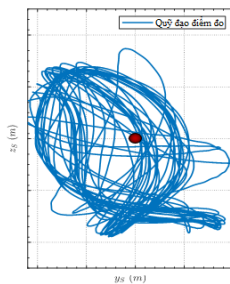
Hình 16. Đồ thị q_6



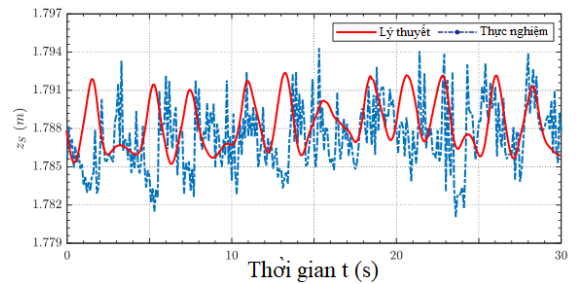
Hình 17. Chuyển vị điểm S theo phương OZ



Hình 18. Đồ thị các phương trình liên kết



Hình 19. Quỹ đạo điểm S trong mặt phẳng pha YOZ điểm khoan số 9



Hình 20. Chuyển vị điểm S khi khoan mẫu có cường độ C30

5. Kết luận

Bài báo đã giải được bài toán động lực học của bộ giá đỡ máy khoan nổ mìn dựa vào phương trình Lagrange dạng nhân tử, có sử dụng các điều kiện ràng buộc ở mức gia tốc và phương pháp ổn định hóa Baumgarte, sau đó sử dụng các phần mềm chuyên dùng để giải. Nội dung nghiên cứu đã tính toán được lực tác động của xy lanh thủy lực, lực suy rộng của lực tác dụng lên giá đỡ; đã xác định được miền dao động của các khâu và chuyển vị tại điểm khảo sát.

Kết quả của chương trình tính nhận thấy, dao động của các khâu trong cơ hệ ứng với mẫu khoan cường độ C30 có miền giá trị nhỏ từ $0^\circ \div 3,5^\circ$; sai số của phương trình liên kết (Hình 18) đạt 10^{-11} m và chuyển vị của điểm khảo sát (điểm S) nhỏ hơn giá trị thực nghiệm (Hình 20) với giá trị 19,5%. Từ đó thị kết quả khảo sát khẳng định phương pháp xây dựng mô hình hệ nhiều vật không gian của máy khoan, phương pháp đánh giá khảo sát và thuật toán giải hệ phương trình vi phân - đại số là hoàn toàn tin cậy. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học cho việc đánh giá chất lượng lỗ khoan khi lấy số liệu tính toán so sánh với Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 9161:2012, Khoan nổ mìn đào đá - phương pháp thiết kế, thi công và nghiệm thu).

Tài liệu tham khảo

- [1] Trầm, B. V. (2019). *Nghiên cứu động lực học thiết bị khoan xoay đập lắp trên máy đào phục vụ thi công hầm khâu độ vừa và nhỏ*. Luận án Tiến sĩ, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [2] Hiến, Đ. C. (2009). *Nghiên cứu thiết kế thiết bị khoan thi công đường hầm quân sự khâu độ vừa và nhỏ*. Đề tài NCKH nhánh độc lập cấp nhà nước mã nhánh đề tài ĐTĐL-05G/03.
- [3] Tân, N. V. và cs. (2005). *Nghiên cứu thiết kế bộ giá khoan chuyên dụng phục vụ thi công hầm khâu độ vừa và nhỏ*. Đề tài NCKH cấp Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [4] Thành, P. N. (2010). *Hoàn thiện thiết kế và công nghệ chế tạo thiết bị thủy lực khoan lỗ trong thi công đường hầm khâu độ nhỏ*. Đề tài NCKH cấp Bộ Quốc phòng.
- [5] Triều, B. H. (2018). *Truyền động và điều khiển thủy lực ứng dụng*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [6] Khang, N. V. (2017). *Động lực học hệ nhiều vật*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội.
- [7] Khang, N. V., Quyền, N. V. (2015). Nghiên cứu so sánh một vài phương pháp giải hệ phương trình vi phân-đại số của hệ nhiều vật có cấu trúc mạch vòng. *Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc*, Đà Nẵng, 147–158.
- [8] Khang, N. V., Tuấn, L. A. (2013). Tính toán so sánh một vài phương pháp số giải bài toán động học ngược robot song song dư dẫn động. *Tạp chí Tin học và Điều khiển học*, 29(1):3–15.
- [9] Hoàng, N. Q., Quyền, N. V. (2015). Ổn định hóa phương trình liên kết trong mô phỏng hệ nhiều vật cấu trúc mạch vòng dựa trên nguyên lý trượt. *Hội nghị toàn quốc lần thứ III về Điều khiển và Tự động hóa - VCCA*, 282–287.
- [10] Khang, N. V. (1973). *Ein Beitrag zur dynamischen Analyse ebener Koppelgetriebe mit mehreren Freiheitsgraden mit Hilfe der numerischen Lösung der Bewegungsdifferentialgleichungen*. Diss. A, TH Karl-Marx-Stadt.
- [11] Khang, N. V. (2011). [Kronecker product and a new matrix form of Lagrangian equations with multipliers for constrained multibody systems](#). *Mechanics Research Communications*, 38(4):294–299.
- [12] Khang, N. V. (2010). [Consistent definition of partial derivatives of matrix functions in dynamics of mechanical systems](#). *Mechanism and Machine Theory*, 45(7):981–988.
- [13] Baumgarte, J. (1972). [Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems](#). *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1(1):1–16.
- [14] Flores, P., Machado, M., Seabra, E., Tavares da Silva, M. (2010). [A parametric study on the baumgarte stabilization method for forward dynamics of constrained multibody systems](#). *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 6(1).
- [15] Kemmetmuller, W., Muller, S., Kugi, A. (2007). [Mathematical modeling and nonlinear controller design for a novel electrohydraulic power-steering system](#). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12(1): 85–97.
- [16] Giang, D. T., Trường, T. V., Dũng, N. T. (2022). [Nghiên cứu tính toán thiết kế và điều chỉnh hệ truyền động máy đào rãnh dạng xích](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(3V): 150–161.
- [17] Trầm, B. V., Đạt, C. V., Quyền, N. V., Khánh, N. L. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số động lực học hệ giá đỡ của máy khoan lỗ nổ mìn kiểu xoay đập do việt nam chế tạo. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng Hải*, 10:304–309.