

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

RESEARCHING OF EXPERIMENTAL FOR THE DETERMINATION OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF THE LIFTING SYSTEM OF ROTARY PERCUSSION DRILLER PRODUCED IN VIETNAM

BÙI VĂN TRÂM^{1*}, CHU VĂN ĐẠT², NGUYỄN VĂN QUYỀN³,
NGUYỄN LÂM KHÁNH⁴

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải,

²Học viện Kỹ thuật Quân sự,

³Trường Đại học Bách khoa Hà Nội,

⁴Trường Đại học Giao thông vận tải.

*Email liên hệ: trambv@utt.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày các bước thực nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm để 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 trong quá trình làm việc. Bài báo sử dụng lý thuyết quy hoạch thực nghiệm xác định số lần đo, lý thuyết xác suất thống kê đánh giá sai số đo, xử lý số liệu thực nghiệm đưa kết quả thành các bảng thống kê, phục vụ việc hồi quy các số liệu thực nghiệm. Nội dung bài báo còn trình bày các bước và điều kiện hồi quy bộ số liệu thực nghiệm ngẫu nhiên rời rạc thành hàm ngoại lực tác dụng vào máy khoan thông qua phép biến đổi Fourier.

Từ khóa: Máy khoan kiểu xoay đập, nghiên cứu thực nghiệm, thông số động lực học, các ngoại lực liên kết, phép biến đổi Fourier.

Abstract

The paper proposes the steps of conducting experiments and processing experimental data to determine the dynamic parameters of the lifting system of the rotary percussion driller produced in Vietnam in operation. The article applies experimental programming theory to detect the number of measurements and uses statistical probability theory to evaluate measurement errors, processing experimental data to turn the results into statistical tables to regress the experimental data. Additionally, the paper also presents the steps and conditions for regressing the randomly experimental data into an external force function acting on the drill based on the Fourier transform.

Keywords: Rotary percussion driller, Research of experiments, dynamic parameters, external reaction forces, Fourier transform.

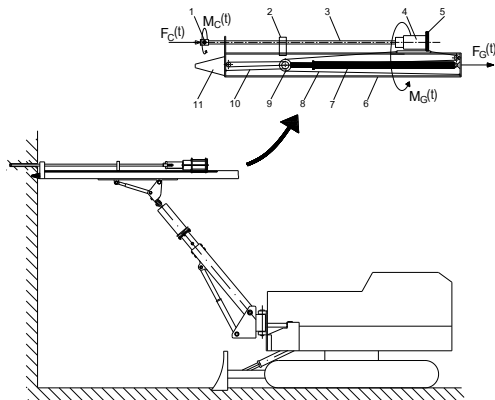
1. Đặt vấn đề

Khi khoan đường hầm khẩu độ vừa và nhỏ phải sử dụng thiết bị nhỏ gọn, cơ động, hoạt động an toàn, ổn định và hiệu quả. Với yêu cầu này thì thiết bị nhập ngoại không phù hợp mà phải tập trung phát triển và hoàn thiện thiết bị đã có trong nước còn tồn tại nhiều hạn chế [3]. Trong quá trình làm việc, hệ giá đỡ của máy khoan là bộ phận trung gian giữa máy cơ sở và thiết bị công tác, chịu toàn bộ tải trọng tạo ra từ cụm thiết bị khoan, cần có kết cấu phù hợp để đảm bảo cho bộ phận công tác làm việc chính xác, ổn định trong các điều kiện hoạt động khó khăn [7-8]. Đây là vấn đề phức tạp, cần có các nghiên cứu chuyên sâu về động lực học hệ giá đỡ, trong đó việc xác định được bộ thông số động lực học bằng thực nghiệm là bước quan trọng [2], [5-6]. Kết cấu của hệ giá đỡ là cơ hệ phức tạp thuộc loại cơ cấu không gian nhiều khâu, nhiều khớp, loại nửa hở nửa kín, chịu tương tác với môi trường (là loại cơ hệ chịu liên kết không lý tưởng) [3]. Việc nghiên cứu cơ hệ chịu liên kết không lý tưởng đòi hỏi cần kết hợp cả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, nếu không nghiên cứu thực nghiệm thì không thể xác định được ngoại lực tác động vào cơ hệ [7]. Mục tiêu của nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định các thông số đầu vào phục vụ việc khảo sát lý thuyết, và so sánh kiểm chứng độ tin cậy của mô hình nghiên cứu [3].

Đặc trưng làm việc của máy khoan nổ mìn kiểu xoay đập do nhà máy Z49 - Binh chủng Công binh chế tạo, ký hiệu là MK-Z49 khác nhiều so với các máy

xây dựng, khi làm việc hệ giá đỡ của máy khoan luôn ghim chặt và tỳ sát với gương khoan.

Trên (Hình 1) khi khoan xi lanh thủy lực (7) thông qua nhánh cấp tiến (8) tạo một lực nhằm ép mũi khoan luôn tỳ vào đá cứng, do đuôi của thân xi lanh (7) tỳ trực tiếp vào giá dẫn hướng tạo nên phản lực tác động lên giá là $F_G(t)$. Ngoài ra để thắng được mô men cản cắt $M_C(t)$ đầu khoan phải tạo ra một mô men phát động, mô men này tác động lên giá dẫn hướng tạo thành mô men ngoại lực $M_G(t)$.



Hình 1. Kết cấu và ngoại lực tác động vào hệ giá đỡ thiết bị khoan xoay đập MK-Z49

$F_C(t)$ 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; Chú thích:

- 1- mũi khoan; 2- cơ cấu chống cong cần khoan;
- 3- cần khoan; 4- cụm máy khoan; 5- tấm để liên kết máy khoan với bàn trượt; 6- giá dẫn hướng khoan;
- 7- xi lanh dẫn tiến; 8- nhánh cấp tiến; 9- cụm puly cấp;
- 10- nhánh cấp lùi; 11- mũi tỳ vào gương khoan.

2. Cơ sở nghiên cứu thực nghiệm

Trong kỹ thuật khi đo đạc ta nhận được các số liệu rời rạc, từ các số liệu đo này cần biểu diễn thành các đường cong liên tục để biết được đặc tính của hệ khảo sát và có thể xác định được những giá trị lân cận các giá trị đã đo. Để kiểm tra kết quả hồi quy có phù hợp với bộ dữ liệu đo được, thường sử dụng tiêu chuẩn bình phương tối thiểu, sử dụng cho hàm $f(x)$ là tổng bình phương các phần dư S với biểu thức sau:

$$S = \sum_{i=1}^m [f(x_i) - y_i]^2 \quad (1)$$

Sử dụng giá trị S để so sánh chất lượng của các đường cong mô tả cùng một dữ liệu. Hàm nào cho giá trị S nhỏ nhất là phù hợp nhất. Khi biểu thị tổng bình

phương độ lệch các giá trị y từ trung bình của chúng bằng J , có thể được tính từ:

$$J = \sum_{i=1}^m [y_i - \bar{y}]^2 \quad (2)$$

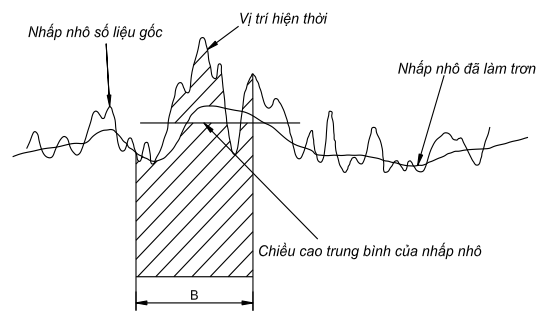
Công thức (2) còn được sử dụng để tính toán cho một phép đo khác về chất lượng của đường cong phù hợp, có hệ số xác định được gọi là giá trị bình phương R^2 với biểu thức:

$$R^2 = 1 - \frac{S}{J} \quad (3)$$

Phép hồi quy phù hợp tốt tương ứng với $R^2 \geq 0,99$.

Công đoạn lọc số liệu thực chất là việc phân tích số liệu một cách chi tiết, có thể được thực hiện với các mục đích khác nhau, việc tách các thành phần có tính chu kỳ có thể làm sai lệch kết quả sau biến đổi Fourier.

Trong Hình 2 minh họa cho công đoạn làm trơn số liệu và quy tâm số liệu, ở đây B là chiều rộng của dải làm trơn còn gọi là bước lọc.



Hình 2. Làm trơn số liệu

Một hàm tuần hoàn $y(t)$ bất kỳ có thể được khai triển thành tổng của các hàm điều hòa dưới dạng:

$$y(t) = a_0 + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(2\pi f_k t) + b_k \sin(2\pi f_k t) \quad (4)$$

Công thức (4) còn được gọi là chuỗi Fourier.

3. Tổ chức thực nghiệm [3, 5]

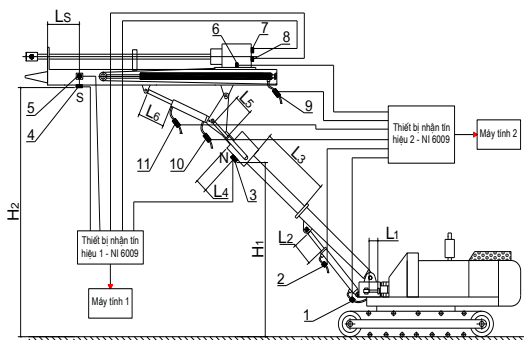
Để đảm bảo hệ thống thủy lực của máy được kín khít và các thông số đo đạt độ tin cậy cao, các phần tử của hệ thống thủy lực như xi lanh, van phân phối và đường dầu thủy lực được thay mới. Tiến hành thực nghiệm với các nội dung sau: Xác định các ngoại lực tác động vào giá khoan; đo chuyển vị, gia tốc của điểm khảo sát; đo áp suất và lưu lượng trong các khoang của xi lanh thủy lực. Thực nghiệm được tiến hành trong cùng một điều kiện và các thông số được đo trên

cùng trục thời gian. Đo lực khoan thông qua đo áp suất khoang dưới của xi lanh dẫn tiến cụm mũi khoan.

Phương tiện thực nghiệm bao gồm: Máy khoan đá kiểu xoay đập. Các bộ kết nối cơ khí và kết nối hệ thống thủy lực.

Thiết bị đo và xử lý số liệu: Sử dụng đầu đo áp suất OCM-511 do Hãng Huba Control chế tạo; đầu đo lưu lượng loại R4S7HD25; sử dụng thiết bị NI-6009 do Hãng National Instruments của Mỹ chế tạo, có chức năng nhận tín hiệu từ thiết bị đo và đưa đến máy tính. Tín hiệu vào máy tính được xử lý bằng phần mềm DaSyLab 11. Các phương tiện và thiết bị được bố trí và kết nối như Hình 3

Ngoài ra cần có máy cắt mẫu bê tông DK-5V để cắt lấy mẫu bê tông từ khối bê tông đúc sẵn, cắt lấy tối thiểu 03 mẫu có kích thước $\phi 100 \times 150$; Máy nén bê tông 3000kN điện tử Matest Model C070D do Italia sản xuất được sử dụng nén ép thử cường độ của các mẫu lấy từ khối bê tông thí nghiệm; Máy kéo nén vạn năng 2000kN được sử dụng kéo mẫu thép xác định mô đun đàn hồi, mẫu thép này chính là vật liệu tẩm liên kết giữa mô tơ khoan với đế trượt. Khối bê tông xi măng đúc sẵn có độ cứng $f_{kp} = 3, f_{kp} = 5, f_{kp} = 7, f_{kp} = 9$ tương đương cường độ nén C30, C50, C70, C90 ở tuổi 28 ngày.



Hình 3. Sơ đồ bố trí các thiết bị đo

Trong quá trình thí nghiệm, do năng lực thiết bị và cần đo nhiều thông số cùng lúc nên việc kết nối và xử lý tín hiệu phải dùng hai bộ thiết bị nhận tín hiệu cùng tính năng và hoạt động đồng thời như Hình 3.

Các đầu đo được bố trí: 1, 2- Đầu đo áp suất dầu thủy lực khoang dưới và khoang trên của xi lanh nâng hạ cần; 3, 4, 5- Các đầu đo chuyển vị; 6- Đầu đo gia

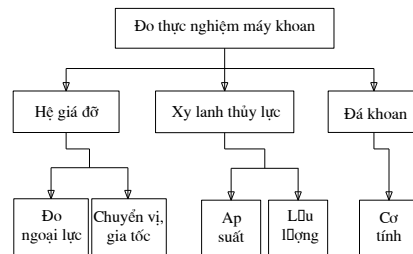
tốc theo phương vuông góc với giá dẫn hướng khoan; 7, 8- Lá điện trở đo biến dạng; 9- Đầu đo áp suất và lưu lượng dầu thủy lực khoang dưới của xi lanh đẩy mũi khoan; 10, 11- Đầu đo áp suất khoang dưới và khoang trên của xi lanh nâng hạ giá khoan. Thiết bị nhận tín hiệu số 1 kết nối các đầu đo: 3, 4, 5, 7, 8; thiết bị nhận tín hiệu số 2 kết nối các đầu đo: 1, 2, 6, 9, 10, 11.

Sau khi đã lắp đặt các thiết bị và đầu đo lên máy, tiến hành thí nghiệm đo các thông số với từng mũi khoan, đầu tiên khoan lỗ bám chân ghim, sau đó ghim máy chắc chắn và ổn định trước khi khoan lỗ chính.

Trong quá trình mũi khoan làm việc, tất cả các thông số đều được ghi cùng thời điểm và được xử lý cùng một loại thiết bị nhận tín hiệu.

4. Xử lý số liệu và kết quả [1, 4, 6]

Các dữ liệu thực nghiệm được xuất ra với tần suất đo 10-3(s). Để sử dụng dữ liệu này tác giả dùng phần mềm Matlab tiến hành: import dữ liệu, sử dụng thuật toán cộng dồn thời gian, lọc các quãng thời gian chết khi đo đặc, lọc một số tín hiệu nhiễu và xuất dữ liệu dưới dạng đồ thị. Tiến hành đo đặc nhiều lần để xây dựng mẫu chuẩn sau đó xác định phân bố chuẩn của mẫu và đánh giá sai số so với lý thuyết.



Hình 4. Sơ đồ khối chỉ dẫn các thông số cần đo

4.1. Xác định ngoại lực

Ngoại lực tác động vào cơ hệ gồm lực $F_G(t)$ và mô men $M_G(t)$ (Hình 1). Thành phần lực được xác định thông qua đo áp suất khoang dưới của xi lanh dẫn tiến cụm khoan, thành phần mô men được xác định thông qua biến dạng của tấm thép gá cụm đầu khoan. Khi xác định được bộ số liệu trên chỉ là các giá trị rời rạc tại các thời điểm đo, phải tiến hành lọc số liệu, tính toán biến đổi trung gian và hàm hóa bộ số liệu tạo thành các hàm ngoại lực là các đường cong liên tục.

Áp dụng công thức (4) cho bộ số liệu thực nghiệm rời rạc, kết quả giải tích hóa thỏa mãn R^2 [2] ta nhận được biểu thức của $F_G(t)$ và $M_G(t)$ theo công thức (5) và (6):

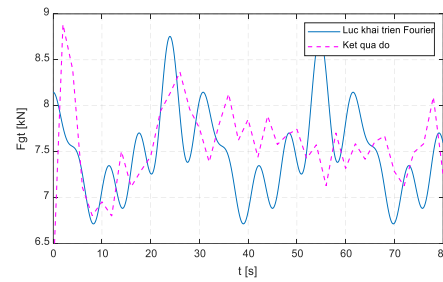
$$F_G(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega_F t) + b_1 \cdot \sin(\omega_F t) + a_2 \cdot \cos(2\omega_F t) + b_2 \cdot \sin(2\omega_F t) + a_3 \cdot \cos(3\omega_F t) + b_3 \cdot \sin(3\omega_F t) + a_4 \cdot \cos(4\omega_F t) + b_4 \cdot \sin(4\omega_F t) + a_5 \cdot \cos(5\omega_F t) + b_5 \cdot \sin(5\omega_F t) \quad (5)$$

$$M_G(t) = c_0 + c_1 \cdot \cos(\omega_M t) + s_1 \cdot \sin(\omega_M t) + c_2 \cdot \cos(2\omega_M t) + s_2 \cdot \sin(2\omega_M t) + c_3 \cdot \cos(3\omega_M t) + s_3 \cdot \sin(3\omega_M t) + c_4 \cdot \cos(4\omega_M t) + s_4 \cdot \sin(4\omega_M t) + c_5 \cdot \cos(5\omega_M t) + s_5 \cdot \sin(5\omega_M t) \quad (6)$$

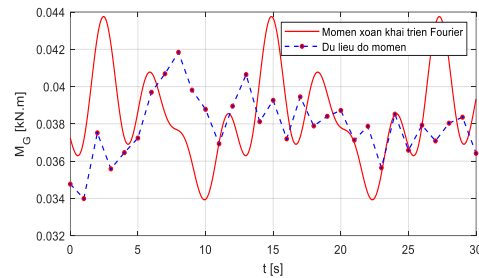
Trong đó các hệ số khi khai triển Fourier của hàm lực và mô men có giá trị cụ thể như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị hệ số khai triển Fourier

TT	HÀM LỰC $F_G(t)$		HÀM MÔ MEN $M_G(t)$	
	$\omega_F = 0,2042$	$a_0 = 7541$	$\omega_M = 0,5027$	$c_0 = 6315$
1	$a_1 = 316,6$	$b_1 = -442,1$	$c_1 = -638,1$	$s_1 = -828,3$
2	$a_2 = -18,87$	$b_2 = 32,92$	$c_2 = -927,6$	$s_2 = 103,1$
3	$a_3 = -13,3$	$b_3 = 236,9$	$c_3 = 114,3$	$s_3 = 685,7$
4	$a_4 = 96,13$	$b_4 = 185,5$	$c_4 = 433,4$	$s_4 = -133,4$
5	$a_5 = 225,3$	$b_5 = -216,9$	$c_5 = -700,5$	$s_5 = -208,8$



Hình 5. Đồ thị hàm lực tác dụng vào giá dẫn hướng



Hình 6. Đồ thị mô men $M_G(t)$

Bảng 2. Kết quả xác định mô đun đàn hồi của tấm thép gá cụm động cơ

TT	Kí hiệu mẫu	Cấp tải	Số đọc Strain Gauges1	Biến dạng 1	Số đọc Strain Gauges2	Biến dạng 2	Biến dạng trung bình	Ứng suất	Mô đun đàn hồi của từng mẫu	Mô đun đàn hồi
...	...	P (kN)	ϵ (vol)	$\mu\epsilon$	ϵ (vol)	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	δ (Mpa)	E_i (Mpa)	E_i (Mpa)
1	Mẫu M1	0,00	0,001	1,005	0,000	0,000	0,503	0,000	1,96E+05	1,96E+05
		3,30	0,139	138,690	0,133	133,665	136,178	27,500		
		10,00	0,422	423,105	0,417	419,085	421,095	83,333		
2	Mẫu M2	0,00	0,001	1,005	0,000	0,000	0,503	0,000	1,94E+05	
		3,35	0,135	134,670	0,139	139,695	137,183	27,917		
		10,10	0,429	430,140	0,427	429,638	429,638	84,167		
3	Mẫu M3	0,00	0,001	1,005	0,000	0,503	0,503	0,000	1,99E+05	
		3,40	0,135	134,670	0,131	133,163	133,163	28,333		
		10,26	0,416	417,075	0,417	418,080	418,080	85,500		

Bảng 3. Kích thước vị trí lắp đặt thiết bị (mm)

Trường hợp	Lần đo	H ₁	H ₂	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₈
1	1	1020	1620	165	180	950	270	210	180	410
	2	1020	1620	165	180	950	270	210	180	410
	3	1020	1620	165	180	950	270	210	180	410
	4	1020	1620	165	180	950	270	210	180	410
2	5	930	1450	165	250	0	290	210	200	360
	6	930	1450	165	250	0	290	210	200	360
3	7	560	1050	150	0	700	300	220	200	440
	8	560	1050	150	0	700	300	220	200	440
	9	1630	1788	150	250	700	330	220	200	410

Hàm $F_G(t)$ được biểu diễn bằng đồ thị Hình 5. Tương tự như việc xử lý số liệu của $F_G(t)$, sau khi hồi quy số liệu mô men xoắn tác dụng lên giá khoan, ta thu được hàm đồ thị mô men $M_G(t)$ như Hình 6.

Đồ thị của hàm $F_G(t)$ và $M_G(t)$ vừa xác định có tín hiệu tuần hoàn, đúng với đặc tính của dao động cơ khí.

4.2. Xác định các tham số khác

Trong phòng thí nghiệm xác định được cường độ các mẫu bê tông C30, C50, C70, C90 và xác định được mô đun đàn hồi của tấm thép gá động cơ làm căn cứ xác định mô men dẫn động cụm khoan.

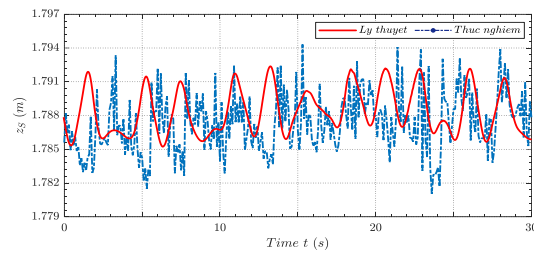
Ngoài hiện trường, các thông số hình học (Hình 3) xác định được qua các lần đo được thể hiện ở Bảng 3.

5. Đánh giá kết quả giữa lý thuyết [3] và thực nghiệm

Thực nghiệm đo xác định được chuyển động của các khâu và chuyển vị tại điểm xét (điểm S nằm trên giá dẫn hướng, Hình 3) ứng với mỗi thông số đầu vào của mô hình tính. Đối chiếu với kết quả nghiên cứu lý thuyết trong tài liệu [3] ta có kết quả so sánh như sau.

Khi thay đổi giá trị của ngoại lực (bằng cách thay đổi độ cứng của mẫu khoan), giá trị chuyển vị điểm khảo sát sẽ thay đổi và được thể hiện trên Hình 7.

Từ đồ thị Hình 7, nhận thấy chuyển vị tại điểm S có giá trị tính toán lý thuyết nhỏ hơn giá trị thực nghiệm, giá trị sai lệch lớn nhất đạt 16,5%.



Hình 7. Chuyển vị điểm S khi mẫu có cường độ C70

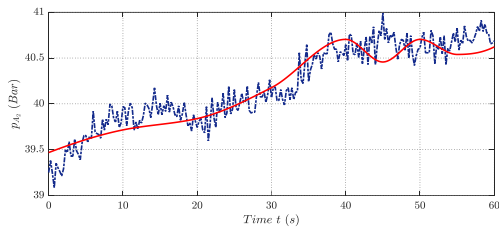
Ngoài đánh giá kết quả chuyển vị, bài báo còn đánh giá thông số áp suất trong các khoang của xi lanh, Bảng 4 đánh giá xi lanh nâng hạ cần và xi lanh nâng hạ giá dẫn hướng khoan. Trên cơ sở so sánh kết quả giữa lý thuyết và thực nghiệm ở Bảng 4 có nhận xét như sau:

- Xu hướng biến thiên của các đồ thị tương đối phù hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm.
- Trị số sai số các giá trị lớn nhất trong khoảng từ 6,75% ÷ 13,64%, tuy nhiên các giá trị lớn nhất được đánh giá tại các thời điểm có thể lệch nhau.
- Các sai số do nhiều nguyên nhân cần được xem xét như: sự ghim tỳ chặt của giá khoan, sự rơ lỏng của khớp liên kết các khâu, rò lọt dầu thủy lực,...

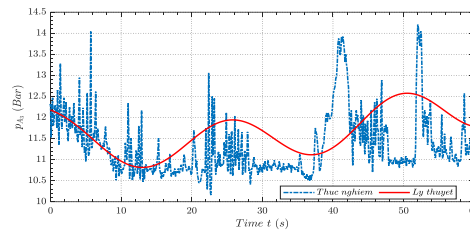
Từ Hình 8 so sánh đối chiếu có thể thấy rằng quy luật thay đổi áp suất của p_{1_LT} theo tính toán lý thuyết thay đổi từ 38,7 ÷ 42,1 (bar), trong khi đó p_{1_TN} giá trị

Bảng 4. Đánh giá kết quả thực nghiệm mẫu khoan C70

TT	Thông số	Lần đo	Đơn vị	Giá trị theo lý thuyết	Giá trị theo thực nghiệm	Sai số (%)
1	Áp suất nâng hạ cần	1	Bar	42,1	45,6	7,68
		2	Bar	41,7	45,7	8,75
		3	Bar	40,6	46,6	12,88
		4	Bar	39,9	45,1	11,53
		5	Bar	41,5	44,8	7,37
		6	Bar	39,2	45,2	13,27
		7	Bar	42	46,4	9,48
		8	Bar	42,7	44,8	7,64
		9	Bar	43,4	46,9	7,46
2	Áp suất nâng hạ giá dẫn hướng khoan	1	Bar	21,6	23,33	7,42
		2	Bar	20,7	22,45	7,80
		3	Bar	21,8	24,15	9,73
		4	Bar	20,9	24,2	13,64
		5	Bar	23,1	25,6	9,77
		6	Bar	23,5	25,2	6,75
		7	Bar	24,7	26,9	8,18
		8	Bar	22,5	25,2	9,23
		9	Bar	21,3	23,8	10,50



Hình 8. Sai số lý thuyết - thực nghiệm áp suất xi lanh nâng hạ cần



Hình 9. Sai số lý thuyết - thực nghiệm áp suất xi lanh nâng hạ giá trượt

thay đổi từ 43,8 ÷ 45,6 (bar). Sự biến động quá độ của áp suất trong xi lanh nâng hạ cần chỉ xảy ra trong 38,5s.

6. Kết luận

Từ các kết quả thu được sau khi thực nghiệm, nhóm tác giả đi đến một số kết luận sau đây:

- Xây dựng được phương án thí nghiệm và thực nghiệm phù hợp đối với máy khoan lỗ nổ mìn kiểu xoay đập do Việt Nam chế tạo.

- Xác định được các thông số động lực học và các thông số liên quan đến độ cứng, lực cản của đối tượng khoan lên hệ giá đỡ của máy khoan.

- Đã sử dụng lý thuyết xác suất thống kê để đánh giá sai số đo, xử lý số liệu thực nghiệm đưa kết quả thành các bảng thống kê, phục vụ việc hồi quy các số liệu thực nghiệm. Đã hồi quy số liệu rời rạc thành hàm ngoại lực theo phép biến đổi Fourier, thu được hàm ngoại lực $F_G(t)$ và $M_G(t)$.

- Sai số giữa tính toán lý thuyết với thực nghiệm về giá trị chuyển vị là 16,5%, áp suất khoang dưới các xi lanh là 13,64%. Kết quả so sánh một số thông số, nhận thấy phương pháp thí nghiệm, thực nghiệm là khoa học và hoàn toàn tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Cảnh, *Quy hoạch thực nghiệm*, NXB Đại học Quốc gia - HCM, 2016.
- [2] Nguyễn Phong Điền, *Kỹ thuật đo và phân tích rung cơ học*, NXB Giáo dục Việt Nam, 2015.
- [3] Bùi Văn Trâm, *Nghiên cứu động lực học thiết bị khoan xoay đập lắp trên máy đào phục vụ thi công hầm khẩu độ vừa và nhỏ*, Luận án Tiến sĩ khoa học, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2019.
- [4] Nguyễn Quốc Trung, *Xử lý tín hiệu và lọc số*, NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2006.
- [5] Nguyễn Thiệu Xuân, *Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm máy xây dựng*, NXB Xây dựng, 2014.
- [6] Jaho Seo, Jin-Sun Park, Heungsub Kim, Dae

Kyung Noh (2015), *Experimental Evaluation of Percussion Performance for Rock-Drill Drifter*, Journal of Biosystems Engineering, Vol.40, No. 1, 2015.

- [7] M. Wiercigroch, J. Wojewoda, A.M. Krivtsov, *Dynamics of ultrasonic percussive drilling of hard rocks*, Journal of Sound and Vibration 280 (2005), pp.739-757, 2005.
- [8] Vahid Vaziri, Marcin Kapitaniak, and Marian Wiercigroch, *Suppression of Drill-String Stick-Slip Vibration*, MATEC Web of Conferences 148, 16008, 2018.

Ngày nhận bài:	29/6/2021
Ngày nhận bản sửa lần 1:	06/8/2021
Ngày nhận bản sửa lần 2:	20/8/2021
Ngày duyệt đăng:	23/8/2021