

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG HIỆN TƯỢNG DÍNH - TRƯỢT TRONG XI LẠNH KHÍ NÉN

MODELING AND SIMULATION OF STICK-SLIP PHENOMENON IN PNEUMATIC CYLINDER

Nguyễn Ngọc Hải¹, Trần Xuân Bộ^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.003>

TÓM TẮT

Hiện tượng dính - trượt có thể xảy ra khi xi lanh khí nén chuyển động ở vận tốc thấp và gây khó khăn trong điều khiển vị trí/vận tốc của xi lanh. Do đó, một sự hiểu biết toàn diện về dính trượt các đặc tính trong xi lanh khí nén đóng một vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng điều khiển của hệ thống khí nén. Bài báo này khảo sát đặc tính động học của xi lanh khí nén khi xảy ra hiện tượng dính - trượt và phát triển một mô hình toán học phù hợp của hệ thống để mô phỏng hiện tượng này. Để làm được việc đó, một hệ thống thí nghiệm sắc vô khí nén được xem xét. Các đặc tính của xi lanh khi xảy ra dính - trượt như vị trí pít tông, áp suất khí trong các khoang xi lanh và lực ma sát của xi lanh được đo đạc và phân tích. Một mô hình toán học của hệ thống được đề xuất trong đó mô hình ma sát động trong xi lanh khí nén được phát triển dựa trên mô hình LuGre sửa đổi. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy mô hình toán học đề xuất có thể mô tả hiện tượng dính - trượt trong xi lanh khí nén tương đối chính xác.

Từ khóa: Dính - trượt, mô hình hóa hệ thống, mô hình ma sát, xi lanh khí nén

ABSTRACT

Stick-slip phenomenon may occur in the motion of pneumatic cylinders at low velocities and causes difficulties in controlling the position/velocity of the pneumatic cylinders. Therefore, a comprehensive understanding of stick-slip characteristics in the pneumatic cylinders plays an important role in improving the controllability of pneumatic systems. This paper investigates the dynamic characteristics of pneumatic cylinders when stick-slip occurs and develops a suitable mathematical model of the system to simulate this phenomenon. To accomplish this, an experimental setup of the pneumatic servo system is considered. The characteristics of the cylinder when slip-stick occurs including piston position, pressures in the cylinder chambers and cylinder friction force are measured and analyzed. A mathematical model of the system is proposed in which a dynamic friction model in a pneumatic cylinder is developed based on a modified LuGre model. The comparison between simulation and experiment results show that the proposed mathematical model can describe the stick-slip phenomenon in pneumatic cylinder with a relatively good accuracy.

Keywords: Friction model, pneumatic cylinder, stick-slip, system modeling.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: bo.tranxuan@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 21/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. GIỚI THIỆU

Hiện tượng dính - trượt xảy ra khi các vật chuyển động tương đối với nhau. Hiện tượng này biểu hiện bởi chuyển động không trơn, liên tục bị ngắt quãng, giật cục, thay đổi liên tục giữa trạng thái trượt và đứng yên. Dính - trượt tạo ra bởi ma sát ở vận tốc thấp. Hiện tượng dính - trượt có thể phát sinh trong quá trình chuyển động vận tốc thấp với bất kỳ thiết kế điều khiển nào [1]. Xi lanh khí nén là cơ cấu chấp hành phổ biến nhất trong hệ truyền động khí nén. Khi pít tông chuyển động ở vận tốc thấp, nó có thể di chuyển không ổn định và dính - trượt xảy ra. Bản chất hiệu ứng dính - trượt là sự xen kẽ các trạng thái ma sát từ ma sát trượt sang ma sát bám (hay ma sát tĩnh) và hậu quả là sự gián đoạn chuyển động [2]. Dính - trượt là hiện tượng không mong muốn và gây ảnh hưởng đặc biệt nghiêm trọng đến điều khiển chính xác vị trí pít tông của xi lanh khí nén. Ngoài ra, hiện tượng này làm cho quá trình mài mòn trong xi lanh tăng nhanh. Vì vậy, việc nghiên cứu trượt dính hiện tượng trong xi lanh khí nén là cần thiết.

Fujita và cộng sự [3] nghiên cứu hiện tượng dính-trượt sử dụng mạch khí nén điều khiển lưu lượng cửa ra xi lanh và họ đã chỉ ra rằng điều kiện xảy ra của dính - trượt trong xi lanh khí nén có thể biểu diễn bởi một hàm với hai tham số không thứ nguyên. Fan và cộng sự [4] nghiên cứu sự xảy ra của dính - trượt trong xi lanh khí nén bằng cách phân tích sử dụng tham số không thứ nguyên và kiểm chứng bằng thực nghiệm. Các kết quả nghiên cứu góp phần thiết thực cho việc dự đoán và tránh xảy ra dính - trượt. Zhang và cộng sự [5] sử dụng mạng nơ ron để dự đoán sự xuất hiện của dính - trượt trong xi lanh khí nén. Qian và cộng sự [6] đề xuất mô hình phi tuyến mô tả hiện tượng dính - trượt của xi lanh khí nén sử dụng mô hình ma sát LuGre cải tiến. Tran và cộng sự [7] tiến hành thực nghiệm và mô phỏng được một phần hiện tượng dính-trượt với mô hình ma sát LuGre và LuGre cải tiến.

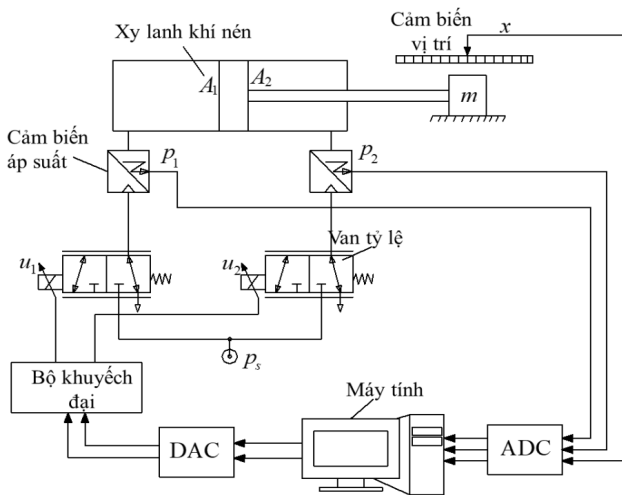
Dính - trượt là một hiện tượng phức tạp, không ổn định. Việc mô hình hóa và mô phỏng chính xác hiện tượng này là cần thiết để xây dựng các bộ điều khiển trong tương lai. Các nghiên cứu để cập ở trên đã tiến hành mô phỏng hiện tượng dính - trượt và thiết kế các bộ điều khiển nhằm giảm khả năng xảy ra hiện tượng dính - trượt tuy nhiên việc mô phỏng chưa đạt được kết quả chính xác. Vì vậy, trong nghiên cứu

này chúng tôi sẽ phát triển một mô hình toán học của hệ thống séc vô khí nén để mô phỏng chính xác hơn hiện tượng dính - trượt.

2. HỆ THỐNG SÉC VÔ KHÍ NÉN

2.1. Hệ thống thí nghiệm

Hình 1 thể hiện sơ đồ nguyên lý hệ thống séc vô khí nén được xây dựng trong nghiên cứu này. Xi lanh có đường kính trong, đường kính cần và hành trình lần lượt là 0,025m, 0,01m và 0,3m. Đầu cần pít tông được nối với tải có thể trượt trên thanh dẫn hướng. Chuyển động của pít tông được điều khiển bằng hai van điều khiển tỉ lệ lưu lượng điện - khí nén. Van 1 được nối vào khoang không có cần pít tông (khoang 1) của xi lanh và van 2 được nối với khoang có cần pít tông của xi lanh (khoang 2). Mỗi van tỉ lệ có thể cấp lưu lượng đến 720l/ph tương ứng với điện áp tối đa 5V. Nếu các đầu vào điều khiển van u_1 và u_2 thay đổi từ 2,5 đến 5V, các van sẽ cung cấp khí vào các khoang của xi lanh (van hoạt động tại vị trí ô vuông bên trái) và nếu đầu vào van thay đổi từ 0 đến 2,5V, các van sẽ xả khí từ khoang xi lanh ra ngoài khí quyển (van hoạt động vị trí ô vuông bên phải). Do đó, chuyển động vào, ra của pít tông được thực hiện bằng cách kết hợp các tín hiệu điều khiển u_1 và u_2 .



Hình 1. Sơ đồ hệ thống séc vô khí nén

Một cảm biến vị trí có độ chính xác 0,5% F.S được sử dụng để đo vị trí của pít tông của xi lanh và hai cảm biến áp suất với độ chính xác 1% F.S được sử dụng để đo áp suất p_1 và p_2 trong hai khoang của xi lanh. Áp suất nguồn khí p_3 được đặt không đổi ở mức 4bar. Các tín hiệu vị trí và áp suất được đọc vào máy tính thông qua một bộ chuyển đổi tương tự sang số 12 bit (ADC). Máy tính xuất các tín hiệu điều khiển u_1 và u_2 đến các van qua một bộ chuyển đổi số sang tương tự 12 bit (DAC). Hai bộ khuếch đại van được sử dụng để chuyển tín hiệu điện áp sang tín hiệu cường độ dòng điện. Chương trình thu thập dữ liệu được thực hiện bởi phần mềm Microsoft visual C++. Các dữ liệu vị trí x và áp suất p_1, p_2 được thu thập với khoảng thời gian lấy tín hiệu là 1,16ms. Lực ma sát F_r được tính từ phương trình chuyển động của pít tông sử dụng các giá trị đo đạc của áp suất trong các khoang xi lanh, gia tốc của pít tông và khối lượng của tải như sau:

$$F_r = p_1 A_1 - p_2 A_2 - Ma \tag{1}$$

trong đó, A_1 và A_2 tương ứng là diện tích khoang không cần và có cần của xi lanh; M là tổng khối lượng của pít tông, cần pít tông và tải; a là gia tốc của pít tông và được tính bởi đạo hàm bậc hai của tín hiệu vị trí. Nhiều trong tín hiệu gia tốc được lọc bởi bộ lọc thông thấp với tần số 30Hz.

Trong thí nghiệm, các đặc tính vị trí pít tông, áp suất trong hai khoang xi lanh và lực ma sát được đo đạc và tính toán dưới điều kiện đầu vào hai van u_1 và u_2 thích hợp sao cho hiện tượng dính - trượt xảy ra.

2.2. Mô hình toán học của hệ thống

Mục tiêu của phần này là xây dựng các phương trình toán học của toàn bộ hệ thống truyền động khí nén thí nghiệm nhằm mô phỏng chính xác hiện tượng dính - trượt trong các xi lanh khí nén. Các phương trình toán học mô hình hóa hệ thống phải thể hiện được mối quan hệ giữa các tín hiệu đầu vào (điện áp u_1, u_2) với các tín hiệu đầu ra cần khảo sát như (áp suất p_1, p_2 , vị trí x , vận tốc v , lực ma sát F_r). Hệ truyền động khí nén có tính phi tuyến cao do khả năng nén được của không khí, lực ma sát, vùng chết của van tỷ lệ,... Chính vì lý do trên, việc mô phỏng hệ thống truyền động khí nén một cách chính xác là tương đối khó khăn.

Để xây dựng các phương trình toán học của hệ thống, các giả thiết sau được sử dụng: Không khí sử dụng là khí lý tưởng, động năng của khí không đáng kể trong khoang xi lanh. Không có sự rò rỉ khí trong xi lanh. Không có sự thay đổi nhiệt độ trong xi lanh so với nguồn cấp. Áp suất và nhiệt độ đồng nhất trong mỗi khoang xi lanh. Áp suất cung cấp và xả không đổi. Quá trình biến đổi trạng thái của khí trong mỗi khoang diễn ra theo quá trình đoạn nhiệt.

Như được trình bày trong Phần 2.1: trong hệ thống thí nghiệm, van tỉ lệ lưu lượng được điều khiển bởi tín hiệu điện áp thay đổi trong khoảng 0 đến 5V. Nếu điện áp được cung cấp cho van tỉ lệ thay đổi từ 2,5 đến 5VDC, van sẽ cung cấp khí vào khoang xi lanh và nếu điện áp được cung cấp thay đổi từ 0 đến 2,5VDC, thì van sẽ xả khí từ khoang xi lanh vào khí quyển. Lưu lượng khối lượng chất khí m_j ($j = 1$ và 2) chảy vào hoặc ra từ hai khoang xi lanh tính theo đầu vào điện áp u_j và của hai van như sau [7]:

$$m_j = \begin{cases} \gamma_{jb} p_s \sqrt{\frac{k}{RT_s}} K_{V1} (u_j - u_m), & u_m \leq u_j \leq 5 \\ 0, & u_n < u_j < u_m \\ \gamma_{je} p_j \sqrt{\frac{k}{RT_s}} K_{V2} (u_j - u_n), & 0 \leq u_j < u_n \end{cases} \tag{2}$$

trong đó: p_s và p_j (N/m^2) tương ứng là áp suất khí nén của nguồn khí và áp suất khí trong khoang j của xi lanh, k là chỉ số đoạn nhiệt của chất khí, T_s (K) là nhiệt độ khí nén của nguồn, K_{V1} và K_{V2} (m^2/V) là hằng số của van trong quá trình nạp, xả khí, u_j (V) là tín hiệu điện áp điều khiển van, u_m và u_n (V) tương ứng là điện áp lớn nhất và nhỏ nhất ứng với độ chòem của van, γ_{jb}, γ_{je} là các hệ số không thứ nguyên được xác định như sau:

$$V_{jb} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{p_j}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{2k}}} \sqrt{\left(\frac{p_j}{p_s}\right)^{\frac{1-k}{k}} - 1}, & \frac{p_j}{p_s} \geq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ 0,58 & , \frac{p_j}{p_s} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{je} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{p_{atm}}{p_j}\right)^{\frac{k+1}{2k}}} \sqrt{\left(\frac{p_{atm}}{p_j}\right)^{\frac{1-k}{k}} - 1}, & \frac{p_{atm}}{p_j} \geq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ 0,58 & , \frac{p_{atm}}{p_j} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (4)$$

trong đó, p_{atm} là áp suất khí quyển.

Phương trình thể tích khí trong khoang xi lanh mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi áp suất p_1, p_2 với sự thay đổi lưu lượng khí vào/ra xi lanh m_1, m_2 được xây dựng theo [8] với quá trình nạp, xả khí đoạn nhiệt như sau:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= \frac{k}{V_1} (RT_s \dot{m}_1 - p_1 A_1 v), \dot{p}_2 \\ &= \frac{k}{V_2} (RT_s \dot{m}_2 + p_2 A_2 v) \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó: v (m/s) là vận tốc của pít tông, A_1 và A_2 (m²) là diện tích làm việc của pít tông ở khoang 1 và khoang 2; V_1 và V_2 (m³) là thể tích khí trong các khoang của xi lanh cho bởi phương trình:

$$V_1 = V_{10} + A_1 x, V_2 = V_{20} + A_2(L - x) \quad (6)$$

với L (m) là hành trình của xi lanh, x (m) là độ dịch chuyển của pít tông, V_{10} và V_{20} (m³) là thể tích chết trong các khoang 1 và 2 tương ứng của xi lanh.

Phương trình chuyển động của pít tông được xây dựng theo định luật II Newton như sau:

$$M\ddot{x} = p_1 A_1 - p_2 A_2 - p_{atm}(A_1 - A_2) - F_r \quad (7)$$

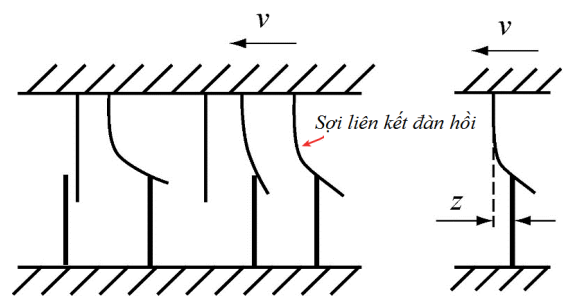
trong đó, M (kg) là tổng khối lượng của pít tông, cần pít tông và tải; \ddot{x} (m²/s) là gia tốc của pít tông; F_r (N) là tổng lực ma sát được mô hình hóa sau đây.

Lực ma sát trong xi lanh khí nén góp phần đáng kể gây ra tính phi tuyến ở hệ thống séc vô khí nén [9]. Về cơ bản, khả năng nén được của không khí và đặc tính của ma sát trong các chế độ bôi trơn theo đường cong Stribeck là lý do cơ bản của hiện tượng dính - trượt [6]. Do đó, việc mô hình hóa chính xác ma sát trong xi lanh là yếu tố quan trọng để mô phỏng chính xác hiện tượng dính - trượt trong xi lanh khí nén. Chuyển động dính - trượt trong các hệ thống vi mô đã được phân tích bởi Liu [10] xem xét năm mô hình ma sát là mô hình Coulomb, Stribeck, Dahl, LuGre và ma sát đàn hồi - dẻo. Các thí nghiệm được thực hiện bởi tác giả đã chứng minh rằng mô hình tốt nhất mô tả hiện tượng dính - trượt trong các hệ thống vi mô là mô hình LuGre.

Gần đây, có một số phiên bản sửa đổi và mở rộng của mô hình LuGre được đề xuất để nghiên cứu các hệ động lực khác nhau với ma sát trong xi lanh thủy lực và khí nén. Yunada và Sekikawa [11] đề xuất mô hình LuGre sửa đổi (mô hình MLG)

trong đó tác giả kết hợp mô hình LuGre với động học màng bôi trơn. Mô hình LuGre sửa đổi có thể khắc phục những hạn chế của mô hình LuGre như: mô phỏng sự suy giảm của lực ma sát lớn nhất quan sát được sau một chu kỳ biến thiên vận tốc pít tông hình sin với sự đảo chiều vận tốc. Tran và cộng sự [12] đã chỉ ra rằng mô hình MLG không thể mô phỏng các hành vi trễ thực sự của đường cong lực ma sát-vận tốc trong chế độ bôi trơn hoàn toàn của xi lanh thủy lực. Mô hình MLG sau đó được cải tiến bằng cách thay thế ma sát chất lỏng thông thường, tỷ lệ thuận với vận tốc, bằng hàm động lực học bậc một. Nó được gọi là mô hình LuGre sửa đổi mới (mô hình NMLG), có thể mô tả chính xác nhất của các hành vi ma sát được quan sát thấy trong xi lanh thủy lực [12] và trong xi lanh khí nén [13] trong toàn bộ chế độ trượt. Tran và cộng sự [14] đã chỉ ra rằng mô hình NMLG không thể mô phỏng các đặc tính ma sát quan sát được bằng thực nghiệm trong xi lanh khí nén khi xi lanh khí nén hoạt động ở trạng thái chuẩn bị trượt và tác giả đã đề xuất một mô hình ma sát mới bằng cách kết hợp hàm trễ vào mô hình NMLG. Mô hình này được gọi là mô hình LuGre cải tiến (mô hình RLG). Tran và cộng sự [7] đã tiến hành thực nghiệm và mô phỏng ảnh hưởng của mô hình ma sát trong mô phỏng chính xác hệ thống séc vô khí nén. Ba mô hình ma sát được sử dụng là mô hình ma sát trạng thái ổn định, LuGre và RLG. Kết quả mô phỏng cho thấy hiện tượng dính-trượt trong xi lanh khí nén không thể mô phỏng bởi mô hình ma sát trạng thái ổn định, có thể mô phỏng một phần bởi mô hình LuGre và LuGre cải tiến.

Từ những phân tích trên, nghiên cứu này phát triển mô hình ma sát dựa trên mô hình LuGre sửa đổi, sao cho mô phỏng chính xác hiện tượng dính - trượt trong xi lanh khí nén. Trong mô hình LuGre sửa đổi [11], tác giả cho rằng hai bề mặt tạo ra sự tiếp xúc ở một số điểm gồ ghề thông qua sợi liên kết đàn hồi như hình 2. Khi một lực tiếp tuyến tác dụng lên một bề mặt, sợi liên kết đàn hồi biến dạng như lò xo và khi lực đủ lớn, một số sợi liên kết đàn hồi sẽ bị gãy và sau đó trượt.



Hình 2. Mô hình biến dạng các sợi liên kết giữa hai bề mặt tiếp xúc

Độ lệch trung bình của sợi liên kết đàn hồi được ký hiệu là z và được định nghĩa là:

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 z}{g(v)} v \quad (8)$$

trong đó: σ_0 (N/m) là độ cứng của sợi liên kết đàn hồi, $g(v)$ (N) là hàm Stribeck và được định nghĩa như sau:

$$g(v, h) = F_c + [(1-h)F_s - F_c] e^{-(v/v_s)^n} \quad (9)$$

trong đó: F_s (N) là lực ma sát tĩnh, F_c (N) là lực ma sát Coulomb, v_s (m/s) là vận tốc Stribeck, n là số mũ ảnh hưởng đến độ dốc của đường cong Stribeck, v (m/s) là vận tốc tương đối tiếp tuyến giữa hai bề mặt tiếp xúc, h (m) là chiều dày màng bôi trơn không thứ nguyên và được cho bởi:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\tau_h}(h_{ss} - h) \tag{10}$$

$$\tau_h = \begin{cases} \tau_{hp} & (v \neq 0, h \leq h_{ss}) \\ \tau_{hn} & (v \neq 0, h > h_{ss}) \\ \tau_{h0} & (v = 0) \end{cases} \tag{11}$$

$$h_{ss} = \begin{cases} K_f |v|^{2/3} & (|v| \leq |v_b|) \\ K_f |v_b|^{2/3} & (|v| > |v_b|) \end{cases} \tag{12}$$

$$K_f = (1 - F_c / F_s) |v_b|^{-2/3} \tag{13}$$

trong đó: h_{ss} là tham số độ dày màng bôi trơn trạng thái ổn định không thứ nguyên, K_f là hằng số tỉ lệ thuận cho độ dày màng bôi trơn, v_b (m/s) là vận tốc mà tại đó độ dày màng bôi trơn thay đổi, τ_{hp} , τ_{hn} và τ_{h0} (s) là hằng số thời gian cho các giai đoạn tăng tốc, giảm tốc và dừng tương ứng.

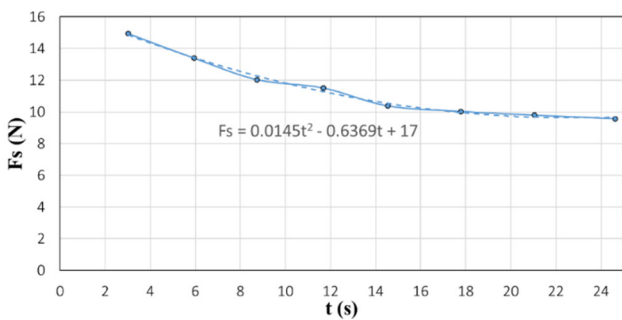
Lực ma sát được tính bởi:

$$F_r = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \tag{14}$$

trong đó: σ_1 (Ns/m) là hệ số ma sát nhớt của các sợi liên kết đàn hồi, σ_2 (Ns/m) là hệ số ma sát nhớt.

Ở trạng thái ổn định, lực ma sát được xác định bởi:

$$F_{r_{ss}} = F_c + [(1 - h_{ss})F_s - F_c] e^{-(v/v_s)^n} + \sigma_2 v \tag{15}$$



Hình 3. Lực ma sát tĩnh theo thời gian

Brian Armstrong-Hélouvy [1] chỉ ra rằng hiện tượng dính - trượt bị chi phối bởi sự phụ thuộc của ma sát tĩnh vào thời gian dừng. Hình 3 là đồ thị lực ma sát tĩnh (F_s) theo thời gian tính từ lúc pít tông bắt đầu trượt (t) trong thực nghiệm. Theo phương pháp bình phương tối thiểu, đường cong khớp nhất cho dải dữ liệu F_s theo t là đường cong hàm bậc hai. Do đó, nghiên cứu để xuất mô hình mới là sự phát triển của mô hình MGL trong đó lực ma sát tĩnh là một hàm bậc hai của thời gian, tính từ khi pít tông bắt đầu trượt như sau:

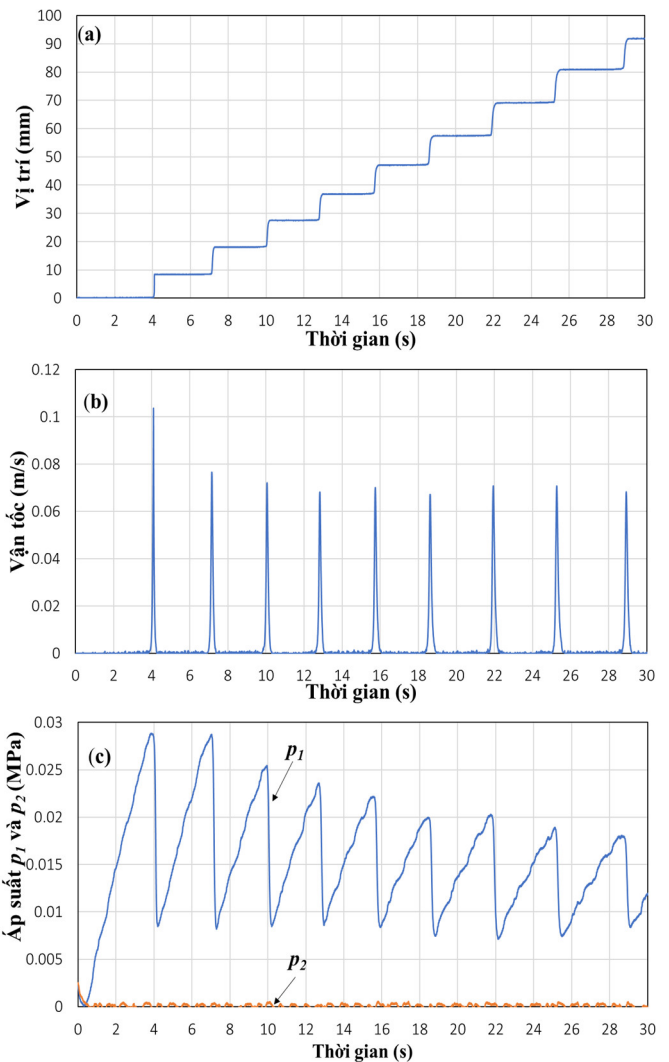
$$\begin{aligned} F_s &= F_{s\infty} \text{ (trước khi trượt)} \\ F_s &= at^2 + bt + c \text{ (khi bắt đầu trượt)} \end{aligned} \tag{16}$$

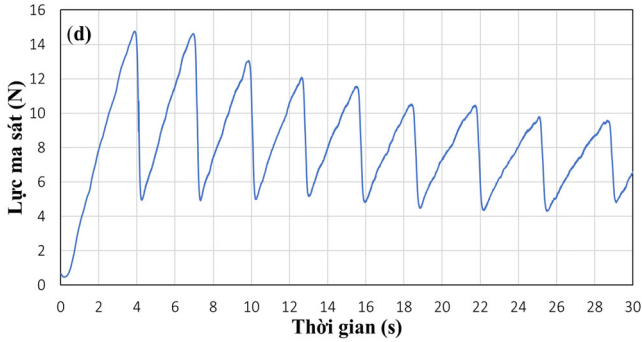
trong đó: $F_{s\infty}$ là lực ma sát tĩnh khi vật dừng trong thời gian rất lớn; a , b , c là các hằng số phụ thuộc vào bản chất và điều kiện làm việc của từng xi lanh; t là thời gian tính từ lúc pít tông bắt đầu chuyển động trượt lần đầu tiên.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thí nghiệm

Hình 4 trình bày đặc tính của xi lanh khi xảy ra hiện tượng dính - trượt với áp suất nguồn khí p_s là 4bar, tín hiệu điều khiển van u_1 và u_2 tương ứng là 2,79V và 2,21V, không có tải đặt vào hệ thống. Theo hình 4a, pít tông chuyển động với các khoảng dính - trượt xảy ra liên tiếp nhau. Ban đầu pít tông giữ ở vị trí đầu hành trình là 0mm cho tới thời gian 4,1 giây, pít tông đột ngột trượt rất nhanh sang vị trí mới 9mm và đứng yên tại vị trí này cho tới khoảng 7 giây pít tông lại trượt sang vị trí mới 18mm. Quá trình pít tông đứng yên - trượt lặp đi lặp lại liên tiếp. Đây chính là hiện tượng dính - trượt của xi lanh khí nén. Theo hình 4b, vận tốc pít tông trong lần trượt đầu tiên có giá trị lớn nhất, sau đó xu hướng giảm trong các lần dính-trượt tiếp theo. Theo hình 4c, d, áp suất p_1 và lực ma sát cũng có xu hướng giảm dần ở các chu kỳ dính - trượt sau. Trong khi đó áp suất p_2 gần bằng áp suất khí quyển khi xi lanh xảy ra dính - trượt.





Hình 4. Hiện tượng dính - trượt trong xi lanh

(a) vị trí pít tông, (b) vận tốc pít tông, (c) áp suất p_1, p_2 (d) lực ma sát

3.2. Kết quả mô phỏng

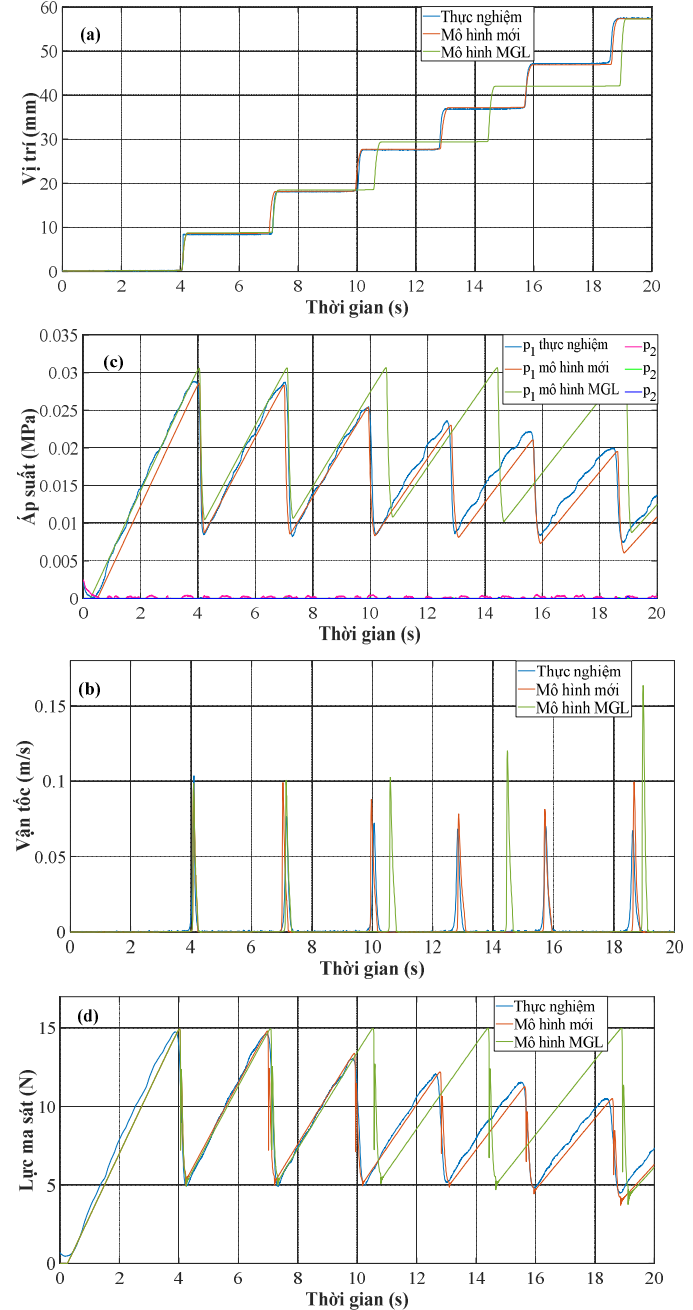
Phần này trình bày kết quả so sánh giữa các đặc tính được đo đạc và các đặc tính được mô phỏng bởi mô hình toán học được đề xuất trong phần 2.2. Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/Simulink với các điều kiện đầu vào giống thực nghiệm. Các thông số của hệ thống séc vô khí nén và các thông số của các mô hình ma sát được chỉ trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số sử dụng trong mô phỏng

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
$K_{v1} (m^2/V)$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$A_2 (m^2)$	$4,12 \cdot 10^{-4}$	$v_s (m/s)$	0,012
$K_{v2} (m^2/V)$	$1 \cdot 10^{-6}$	$V_{10} (m^3)$	$3 \cdot 10^{-5}$	$v_b (m/s)$	0,05
T (°K)	300	$V_{20} (m^3)$	$10 \cdot 10^{-5}$	n	2,5
k	1,3997	u (V)	0,29	$\sigma_2 (Ns/m)$	85
$u_m (V)$	2,65	L (m)	0,3	$\sigma_0 (N/m)$	$1,05 \cdot 10^6$
$u_n (V)$	2,5	$F_{séc} (N)$	15,45	$\sigma_1 (Ns/m)$	0,1
$p_s (N/m^2)$	$5 \cdot 10^5$	a (N/s^2)	0,0145	$\tau_{hp} (s)$	0,01
$p_{atm} (N/m^2)$	$1 \cdot 10^5$	b (N/s)	0,6369	$\tau_{hn} (s)$	0,3
M (kg)	0,75	c (N)	17	$\tau_{h0} (s)$	40
$A_1 (m^2)$	$4,91 \cdot 10^{-4}$	$F_c (N)$	4		

Hình 5 trình bày kết quả so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng với mô hình đề xuất mới, mô hình MGL. Theo hình 5a, chuyển động dính - trượt của pít tông đã có thể được mô phỏng tương đối chính xác bởi mô hình ma sát mới. Số chu kỳ dính - trượt, khoảng cách trượt được của pít tông trong một lần trượt, khoảng thời gian dừng trong một lần dính trong mô phỏng gần như trùng khớp với thực nghiệm. Trong khi đó, mô hình MGL cũng có thể mô phỏng được hiện tượng dính - trượt nhưng với số lần dính - trượt sai khác với thực nghiệm. Hình 5b, c, d cho thấy vận tốc pít tông, áp suất hai khoang xi lanh và lực ma sát đã được mô phỏng khá tốt bởi mô hình mới. Trong thực nghiệm và mô phỏng bởi mô hình mới, áp suất p_1 , lực ma sát trong chu kỳ dính - trượt đầu tiên có giá trị lớn nhất, sau đó giảm dần. Xu hướng thay đổi của vận tốc pít tông, áp suất p_1 và lực ma sát được mô phỏng bởi mô hình MGL đều có xu hướng tăng, không đúng với thực nghiệm. Áp suất p_2 trong thực nghiệm và mô phỏng đều gần bằng áp suất khí quyển. Điều này cho thấy mô hình

mới có thể mô phỏng tốt hiện tượng dính - trượt trong xi lanh khí nén, so với mô hình ma sát cũ.



Hình 5. So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng

(a) vị trí pít tông; (b) vận tốc pít tông; (c) áp suất p_1, p_2 ; (d) lực ma sát

4. KẾT LUẬN

Bài báo này khảo sát các đặc tính của xi lanh khí nén khi xảy ra hiện tượng dính - trượt và phát triển một mô hình toán học đối với hệ thống để mô phỏng hiện tượng này. Một hệ thống thí nghiệm được xây dựng, các đặc tính vị trí pít tông, vận tốc pít tông, áp suất trong hai khoang xi lanh và lực ma sát được đo đạc, tính toán và phân tích. Một mô hình toán học đầy đủ của hệ thống séc vô khí nén được đề xuất trong đó mô hình lực ma sát được phát triển dựa trên mô hình LuGre sửa đổi. Kết quả chỉ ra rằng với việc phát triển mô hình

ma sát, mô hình mô hình toán học được đề xuất có thể mô phỏng tương đối chính xác các đặc tính của xi lanh khí nén khi xảy ra hiện tượng dính - trượt so với mô hình ma sát cũ. Hướng phát triển của nghiên cứu là nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển tránh khỏi hiện tượng dính trượt và điều khiển chính xác vị trí pít tông ở vận tốc thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. Armstrong-Helouvry, *Control of machines with friction*. Springer, Boston, 1991.
- [2]. N. M. Truong, "Xác định lực ma sát trong xi lanh khí nén," Doctoral Thesis, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, 2004.
- [3]. Toshinori Fujita, Luis R. Tokashiki, Toshiharu Kagawa, "Stick-slip motion in pneumatic cylinders driven by meter-out circuit," *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2005.
- [4]. Wei Fan, Qiong Liu, Baihai Zhang, Guangzheng Peng, "Study on the Stick-Slip Criterion of Unsymmetrical Cylinder Driven by Meter-out Circuit," *IEEE International Conference on Mechatronics*, 2007.
- [5]. Bai-hai Zhang, Yan-feng Ma, Hai-feng Cheng, Guang-zheng Peng, "A new method to predict the occurrence of stick-slip in pneumatic cylinders," *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2005.
- [6]. Peng Fei Qian, Guo Liang Tao, Jian Feng Chen, Bo Lu, "Modeling and Simulation of Stick-Slip Motion for Pneumatic Cylinder Based on Meter-In Circuit," *Applied Mechanics and Materials*, p. 130–134: 775–780, 2011.
- [7]. Xuan Bo Tran, Van Lai Nguyen, Khanh Duong Tran, "Effects of friction models on simulation of pneumatic cylinder," *Mech. Sci*, pp. 10:517-28, 2019.
- [8]. Edmond Richer, Yildirim Hurmuzlu, "A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I - Nonlinear Mathematical Model," *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, p. 122(3): 416–425, 2001.
- [9]. D. Saravanakumar, B. Mohan, T. Muthuramalingam, "A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems," *Precision Engineering*, pp. 49: 481–492, 2017.
- [10]. Y. F. Liu, J. Li, Z. M. Zhang, X. H. Hu, W. J. Zhang, "Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system," *Mechanical Sciences*, vol. 6, pp. 15–28, 2015.
- [11]. Hideki Yanada, Yuta Sekikawa, "Modeling of dynamic behaviors of friction," *Mechatronics*, pp. 18:330–39, 2008.
- [12]. Xuan Bo Tran, Nur Hafizah, Hideki Yanada, "Modeling of dynamic friction behaviors of hydraulic cylinders," *Mechatronics*, pp. 22:65–75, 2012.
- [13]. X. Tran, H. Yanada, "Dynamic friction behaviors of pneumatic cylinders," *Intelligent Control and Automation*, vol. 4, pp. 180–190, 2013.
- [14]. XB Tran, HT Dao, KD Tran, "A new mathematical model of friction for pneumatic cylinders," *P. I. Mech. Eng. C-J. Mec.*, pp. 230:2399–412, 2016.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Ngoc Hai, Tran Xuan Bo

School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam