

Bộ điều khiển trượt PID thích nghi ứng dụng trong điều khiển vị trí hệ thống thủy lực

Adaptive PID sliding mode controller application to position control of hydraulic system

Đào Thanh Liêm

Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Tác giả liên hệ: liemdt@ntt.edu.vn

Ngày nhận bài: 12/6/2023; Ngày chấp nhận đăng bài: 11/7/2023

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, một bộ điều khiển trượt kết hợp với phương pháp điều chỉnh trực tiếp thông số tỉ lệ – tích phân – vi phân (SMCPID) được đề xuất để điều khiển một hệ thống xy lanh thủy lực. Một mô hình mô phỏng sử dụng xy lanh thủy lực và bộ giảm chấn đã được thiết lập để kiểm chứng kết quả và độ chính xác của bộ điều khiển đề xuất. Trong bộ điều khiển SMCPID, bộ PID được sử dụng để tạo ra tín hiệu điều khiển kết hợp với mặt phẳng trượt theo hướng làm cho chế độ trượt ổn định và bền vững. Do tính phi tuyến của hệ thống thủy lực, đòi hỏi các hệ số của bộ điều khiển PID phải tính toán và thay đổi theo một quy luật thích nghi. Bộ điều khiển SMCPID đã được kiểm tra và so sánh với các bộ điều khiển khác như PID, bộ điều khiển mờ kết hợp PID, bộ điều khiển mờ kết hợp với PID thích nghi trong việc điều khiển vị trí của trục xy lanh của hệ thống đối với các đường mục tiêu khác nhau. Kết quả mô phỏng thực hiện nhằm kiểm tra và phân tích hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất.

Từ khóa: Hệ thống thủy lực; Bộ điều khiển PID; Bộ điều khiển trượt; Điều khiển thích nghi.

Abstract:

This study proposes a sliding mode controller combined with the direct parameter adjustment method of proportional–integral–derivative (SMCPID) to control a hydraulic cylinder system. A simulation model using a hydraulic cylinder and a damper is set up to verify the results and accuracy of the proposed controller. In the SMCPID controller, a PID controller is used to generate a control signal combined with the sliding plane to stabilize and sustain the sliding mode. Due to the hydraulic system's nonlinear nature, the PID controller's coefficients need to be calculated and adapted according to an adaptive law. The SMCPID controller has been tested and compared with other controllers such as the PID controller, fuzzy controller combined with PID, and fuzzy controller combined with adaptive PID in controlling the position of the cylinder axis for different target paths. Simulation results are performed to verify and analyze the effectiveness of the proposed controller.

Keywords: Hydraulic system; PID controller; Sliding mode control; Adaptive control.

1. Giới thiệu

Hiện nay, hệ thống thủy lực đã được coi là những lựa chọn tiềm năng cho các ngành công nghiệp hiện đại do tính bền bỉ, tỷ số giữa công suất và khối lượng khá cao, độ tin cậy của hệ thống, lực và moment xoắn tạo ra rất lớn,... [1],[2]. Trong lĩnh vực công nghiệp, hệ thống thủy lực, các thiết bị như máy ép, máy chần và các máy móc khác

đóng vai trò quan trọng trong quá trình sản xuất và hoạt động công nghiệp. Tuy nhiên, hệ thống thủy lực đồng thời mang đến những thách thức phức tạp khiến việc đảm bảo hiệu suất và độ chính xác của các thiết bị trở nên khó khăn. Vì vậy, điều khiển vị trí của một xy lanh trong hệ thống thủy lực trở thành cấp thiết. Vấn đề chính đặt ra là về sai số vị trí xuất hiện do sự biến thiên

áp suất, ma sát, không gian hẹp và các yếu tố không đều trong hệ thống. Sai số này tiềm tàng gây ra sự không ổn định và làm giảm hiệu quả sản xuất. Do đó, việc giảm thiểu sai số vị trí trong hệ thống thủy lực là mục tiêu quan trọng.

Bởi hiệu quả của nó, nhiều hệ thống thủy lực đã được phát triển thành sản phẩm thương mại và sử dụng rộng rãi trong những năm trở lại đây. Bên cạnh đó, các hệ thống thực nghiệm sử dụng các thiết bị thủy lực đã được chế tạo để nghiên cứu việc điều khiển lực hoặc áp suất với độ chính xác cao. Tuy nhiên, việc điều khiển một hệ thống với nhiều thiết bị thủy lực là rất phức tạp do tính phi tuyến tương đối cao và sự không ổn định của hệ thống. Những sự bất định này phát sinh từ các nguồn khác nhau, chẳng hạn như biến động nhiệt độ, các tác động bên ngoài, sự sai khớp mô hình và hiệu ứng ma sát [3], [4]. Ngoài ra, các hệ thống thủy lực còn có hiện tượng “hysteresis”, là hiện tượng biến thiên các thông số không giống nhau trong những quá trình thuận và nghịch, dẫn đến đặc tính phi tuyến của hệ thống rất lớn [4], [5]. Những yếu tố này đặt ra các thách thức đáng kể trong việc điều khiển hệ thống thủy lực để đạt được độ chính xác cao. Nhằm khắc phục các vấn đề điều khiển cho những hệ thống phi tuyến phức tạp, một số chiến lược điều khiển đã được đề xuất [5], [6].

Nhiều kỹ thuật điều khiển đã được phát triển để đạt được sự đáp ứng mong muốn của hệ thống thủy lực trong các điều kiện vận hành với những thông số môi trường khác nhau. Các phương pháp điều khiển dựa trên mô hình hóa hệ thống được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển bằng cách xây dựng các phương trình toán học chính xác của hệ thống. Những bộ điều khiển này được tối ưu hóa để đạt được hiệu suất mong muốn bằng cách sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa khác nhau, chẳng hạn như bộ điều khiển lượng bình phương tuyến tính (LQR), bộ điều khiển tỷ lệ – tích phân – vi phân (PID) và các bộ điều khiển thích nghi [5], [6]. Các kỹ thuật dựa trên mô hình hóa nhằm đạt được hiệu suất, nâng cao khả năng chống nhiễu và tăng độ ổn định của hệ thống. Tuy nhiên, các kỹ thuật theo mô hình toán học của hệ thống có thể tốn kém tài nguyên tính toán

của máy tính và yêu cầu mô hình hóa chính xác của hệ thống, điều này có thể không đạt được trong thực tế. Một cách tiếp cận không dựa trên mô hình toán của hệ thống đang trở nên phổ biến trong việc điều khiển hệ thống thủy lực, bởi sự đơn giản ở quá trình xây dựng và tài nguyên tính toán ở mức độ thấp. Các phương pháp không dựa trên mô hình toán học sử dụng cấu trúc và thuộc tính cố sẵn của chính hệ thống và không yêu cầu một mô hình toán học cụ thể. Những kỹ thuật này bao gồm điều khiển logic mờ, điều khiển trượt và điều khiển mạng thần kinh [6]. Điều khiển logic mờ cung cấp một phương pháp điều khiển linh hoạt và mạnh mẽ có thể xử lý các bất ổn và phi tuyến tính trong hệ thống. Điều khiển trượt là một phương pháp phổ biến khác có thể xử lý sự không ổn định trong hệ thống và nâng cao độ bền vững trong quá trình điều khiển.

Bên cạnh đó, các bộ điều khiển PID truyền thống thường được sử dụng trong ngành công nghiệp do tính đơn giản khi điều kiện hoạt động khác nhau. Tuy nhiên, các bộ điều khiển này không cho hiệu suất ổn định khi thay đổi phạm vi, điều kiện hoạt động do sử dụng các thông số cố định. Nhược điểm của bộ điều khiển PID là khả năng kém trong việc xử lý sự bất định của hệ thống, tức là biến thiên tham số và nhiễu từ bên ngoài. [4]. Để khắc phục điểm yếu này, bài báo này trình bày một bộ điều khiển vị trí cho hệ thống thủy lực sử dụng bộ điều khiển trượt kết hợp PID (PIDSMC). Trong bộ điều khiển này, các ưu điểm của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển trượt được kết hợp để cải thiện hiệu suất điều khiển [6]-[8]. Mục tiêu là đạt được tính ổn định của hệ thống đối với sự biến thiên tham số và nhiễu bên ngoài và giảm hiện tượng rung lắc hệ thống. Các thông số của PID được xác định theo quy luật và bộ điều khiển này được sử dụng để đưa ra tín hiệu điều khiển.

Bài báo tập trung vào nghiên cứu và phát triển các bộ điều khiển cho hệ thống thủy lực với mục tiêu tối ưu hóa hiệu suất và đáp ứng vị trí của các thiết bị. Tác giả thực hiện các phân tích sâu về các yếu tố phức tạp trong hệ thống và thiết lập các giá trị mục tiêu để đảm bảo rằng hệ thống đáp ứng được yêu cầu về sai số vị trí. Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày cấu trúc và các bước

thiết kế bộ điều khiển SMCPID; phần 3 trình bày sơ đồ của hệ thống thủy lực được sử dụng trong nghiên cứu này. Kết quả và phân tích đánh giá được trình bày trong phần 4. Cuối cùng, kết luận được nêu ra trong phần 5 của bài báo.

2. Thiết kế bộ điều khiển trượt kết hợp PID thích nghi

Trước hết, xem xét một hệ thống chung như sau:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1(t) = \chi_2(t) \\ \dot{\chi}_2(t) = F(\chi_1(t), \chi_2(t), u(t)) \\ y(t) = h(\chi(t)) \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, $\dot{\chi} = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)^T \in \mathfrak{R}^n$ là vector đầu vào của hệ thống, $u \in \mathfrak{R}^m$ là tín hiệu điều khiển, $F: \mathfrak{R}^{n \times m} \rightarrow \mathfrak{R}^n$, $y \in \mathfrak{R}^r$ và $h: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^r$. Giả sử e là sai số giữa vị trí mong muốn y_d và đáp ứng y của hệ thống.

$$\zeta = y_d - y \quad (2)$$

Tín hiệu tham chiếu cho hệ thống được định nghĩa như sau:

$$\dot{\chi}_r = \ddot{y}_d + K_I \dot{\zeta} + K_0 \zeta \quad (3)$$

Trong đó, K_I and K_0 được xác định sao cho các nghiệm của $s^2 + K_I s + K_0 = 0$ ở bên trái nửa mặt phẳng phức. Mặt phẳng trượt được xác định:

$$\sigma = \chi_r - \chi_2 \quad (4)$$

Khi chế độ trượt được thiết lập, σ sẽ có giá trị hội tụ về 0, điều này cho thấy sai số sẽ hội tụ về 0 khi thời gian tiến về vô cùng. Từ các biểu thức (2), (3) và (4), có thể suy ra phương trình sau:

$$\dot{\sigma} = \dot{\zeta} + K_I \zeta + K_0 \int \zeta dt \quad (5)$$

Có thể nhận thấy rằng tín hiệu tham chiếu χ_r cho phép hệ thống điều khiển độ dốc của bề mặt trượt, bộ điều khiển sẽ đạt được tính ổn định. Ngoài ra, bề mặt trượt hội tụ về 0, do đó gia tăng độ chính xác điều khiển. Tiếp theo, hàm Lyapunov được định nghĩa: $V = \frac{1}{2} \sigma^2$ (6)

Từ phương trình (6), lấy đạo hàm: $\dot{V} = \sigma \dot{\sigma}$ (7)

Để đạt được tính ổn định của hệ thống, tín hiệu đầu ra điều khiển được tạo ra sao cho phương trình sau được thỏa mãn: $\dot{\sigma} = -K \text{sgn}(\sigma)$ (8)

$$\text{Trong đó, } \text{sgn}(\sigma) = \begin{cases} 1 & \sigma > 0 \\ 0 & \sigma = 0 \\ -1 & \sigma < 0 \end{cases}$$

Sơ đồ khối tổng quát của bộ điều khiển đề xuất được thể hiện trong hình 3. Như đã thấy trong hình vẽ, tín hiệu điều khiển có thể được chia thành hai phần:

$$u = u_s + u_{eq} \quad (9)$$

Trong đó, $u_s = \alpha K \text{sign}(\sigma)$ là tín hiệu điều khiển trượt, chuyển đổi hệ thống thành mặt phẳng trượt, α là hệ số đầu vào, và là tín hiệu điều khiển tại điểm tương ứng, bộ điều khiển PID sẽ tạo ra tín hiệu điều khiển trong trường hợp có nhiễu và sự dao động:

$$u_{eq} = \alpha (\dot{\chi}_r - F) \approx u_{PID} = K_P \zeta + K_I \int \zeta dt + K_D \frac{d\zeta}{dt} \quad (10)$$

Để điều chỉnh các thông số của bộ điều khiển PID, hàm mục tiêu sau đây được chọn:

$$V_o = \frac{1}{2} (u_{eq} - u_{PID})^2 = \frac{1}{2} \zeta_o^2 \quad (11)$$

Trong đó, các quy tắc cập nhật cho các thông số của bộ điều khiển PID tuân theo phương trình:

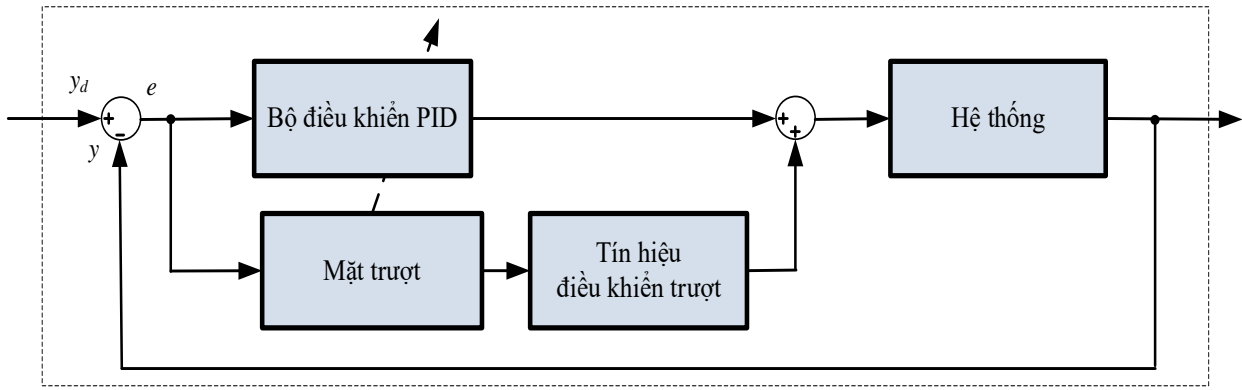
$$\begin{aligned} K_P(k+1) &= K_P(k) + \eta_1 \zeta_o \frac{d\zeta_o}{dK_P} \\ &= K_P(k) + \eta_1 \zeta_o \zeta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} K_I(k+1) &= K_I(k) + \eta_2 \zeta_o \frac{d\zeta_o}{dK_I} \\ &= K_I(k) + \eta_2 \zeta_o \int \zeta dt \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} K_D(k+1) &= K_D(k) + \eta_3 \zeta_o \frac{d\zeta_o}{dK_D} \\ &= K_D(k) + \eta_3 \zeta_o \frac{d\zeta}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

Nếu đầu ra bộ điều khiển PID $u_{PID} \rightarrow u_{eq}$, $e_0 \rightarrow 0$ thì $\sigma \rightarrow 0$. Các quy tắc cập nhật giá trị các thông số của bộ điều khiển PID được thực hiện như sau:

$$\begin{cases} K_P(k+1) = K_P(k) + \eta_1 \sigma \zeta \\ K_I(k+1) = K_I(k) + \eta_2 \sigma \int \zeta dt \\ K_D(k+1) = K_D(k) + \eta_3 \sigma \frac{d\zeta}{dt} \end{cases} \quad (15)$$



Hình 1. Sơ đồ bộ điều khiển SMCPID.

Để đạt được ổn định của hệ thống điều khiển, việc cập nhật các hệ số điều khiển của thuật toán đòi hỏi quy tắc cập nhật mang tính bền vững. Phương pháp điều khiển bền vững bao gồm hai mục tiêu chính. Mục tiêu đầu tiên đảm bảo ổn định mạnh cho hệ kín, yêu cầu các giá trị được xác thực. Mục tiêu thứ hai của nghiên cứu này liên quan đến việc đạt được giảm nhiễu trong hệ kín, được trình bày chi tiết trong tài liệu [5]. Để đạt được mục tiêu này, các hàm truyền của bộ điều khiển PID, hệ mở và hàm độ nhạy có thể được biểu diễn qua phương trình (3):

$$G_{PID} = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (16)$$

$$L(s) = P(s) \left(K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right) \quad (17)$$

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s) \left(K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right)} \quad (18)$$

Các hệ số điều khiển PID có thể được xác định dựa trên các tiêu chí của điều khiển bền vững. Để đảm bảo tính bền vững, cần duy trì một ngưỡng năng lượng của khoảng $M = 1,4$ (3 dB) cho hệ thống điều khiển kín. Hay nói cách khác:

$$\left| \frac{L(s)}{1 + L(s)} \right| \leq M = 1.4 \quad (19)$$

Để chọn hệ số trượt, cần xem xét thay thế $sgn(\sigma)$ bằng giá trị saturation $sat(\sigma/\delta)$ như sau:

$$sat\left(\frac{\sigma}{\delta}\right) = \begin{cases} 1 & \frac{\sigma}{\delta} > 1 \\ -1 & \frac{\sigma}{\delta} < -1 \\ \frac{\sigma}{\delta} & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

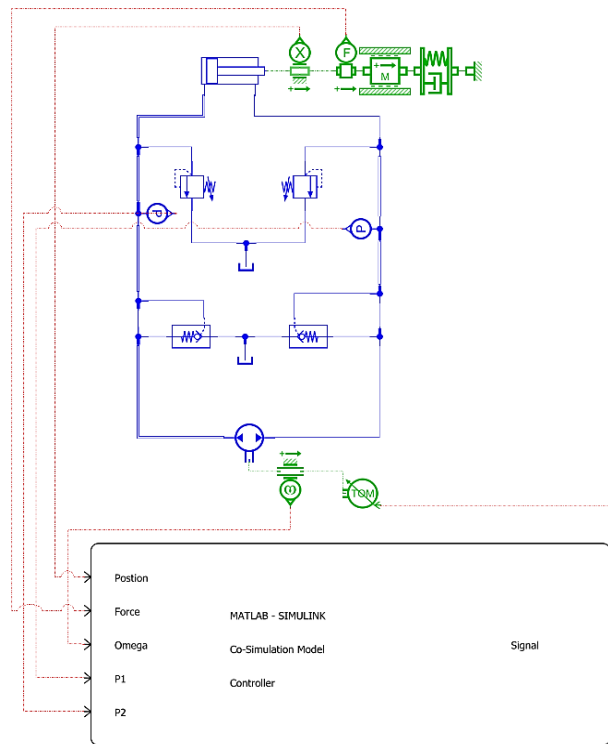
δ là chiều rộng của lớp biên giới.

Tín hiệu điều khiển trượt có thể được xác định như sau:

$$u_s = \alpha_{\max} K_{sat}\left(\frac{\sigma}{\delta}\right) = K_{\max} sat\left(\frac{\sigma}{\delta}\right) \quad (21)$$

3. Sơ đồ hệ thống thủy lực

Sơ đồ mạch của hệ thống thủy lực được mô tả trong hình 2. Trong mô hình này, xy lanh thủy lực được điều chỉnh bởi một hệ bơm và van thủy lực. Bơm thủy lực đồng thời được điều chỉnh bởi động cơ M . Tốc độ động cơ thay đổi sẽ dẫn đến lưu lượng bơm thay đổi. Do đó, sự chuyển động của xy lanh được điều chỉnh bằng tốc độ của động cơ. Để tạo ra tải cho hệ thống, một bộ giảm chấn được gắn nối tiếp vào đầu cuối của xy lanh thủy lực. Một bộ cảm biến vị trí được sử dụng để đo độ dịch chuyển của cần xy lanh. Hệ thống thủy lực được mô hình hóa trong phần mềm Amesim. Tiếp theo, phần mềm Matlab đã được thiết lập cho việc giám sát hệ thống, thu thập dữ liệu và mục đích điều khiển. Các phần mềm được giao tiếp với nhau qua chức năng co-simulation của Amesim và Matlab.

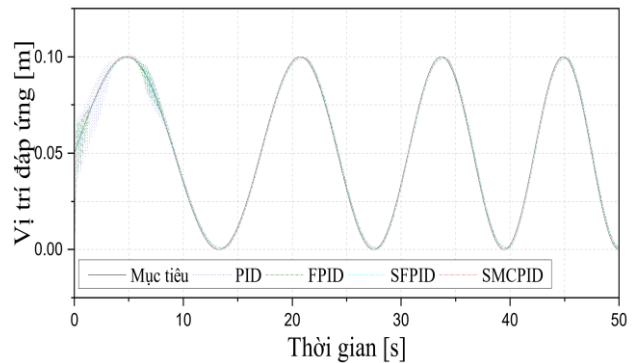


Hình 2. Sơ đồ hệ thống thủy lực.

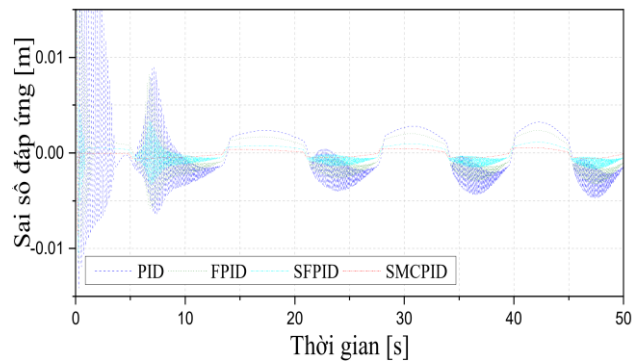
4. Kết quả thử nghiệm và đánh giá phân tích

Các mô phỏng được tiến hành và kết quả so sánh được thể hiện trong các đồ thị từ hình 3 đến hình 8. Các đồ thị này hiển thị sự thay đổi về vị trí của xy lanh tương ứng với các bộ điều khiển khác nhau trong các trường hợp nghiên cứu. Các trường hợp nghiên cứu bao gồm: Điều khiển vị trí xy lanh ứng với hàm mục tiêu là sóng Chirp (dựa trên dạng sóng hình sin có tần số thay đổi từ 0.2 Hz đến 0.1 Hz) và hình răng cưa trong thời gian 50 giây.

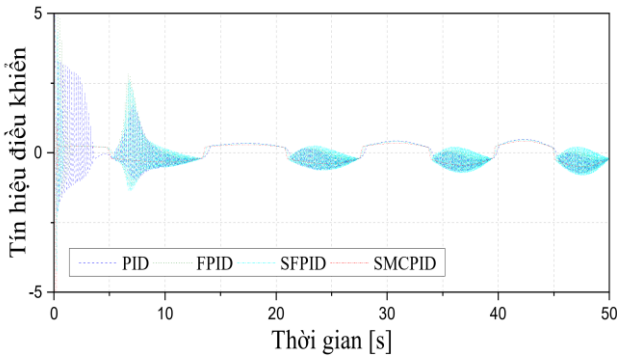
Bộ điều khiển đầu tiên được đánh giá trong nghiên cứu là bộ điều khiển PID. Các đồ thị biểu diễn kết quả của bộ điều khiển này bằng đường nét đứt màu xanh dương. Kết quả cho thấy, các phản hồi của hệ thống có sự dao động đáng kể (như trong hình 3, hình 6) sai số đáp ứng khá cao do sử dụng các hệ số cố định, được chỉ ra trong hình 4 và 7. Ngoài ra, phản hồi của hệ thống chậm và không ổn định trong các điểm hoạt động đổi chiều di chuyển của xy lanh. Tín hiệu điều khiển của PID được thể hiện trong hình 5 và 8.



Hình 3. So sánh kết quả điều khiển hệ thống của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là sóng Chirp với tần số thay đổi từ 0.2 Hz đến 0.1 Hz.

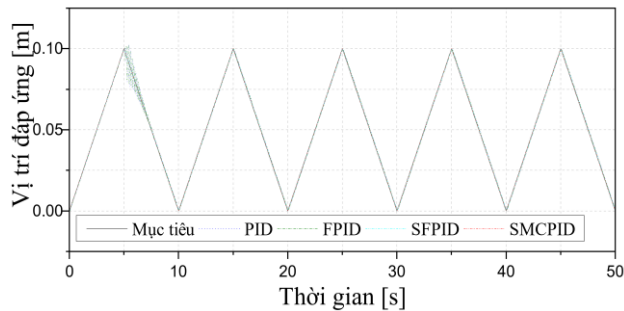


Hình 4. So sánh sai số đáp ứng của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là sóng Chirp với tần số thay đổi từ 0.2 Hz đến 0.1 Hz .

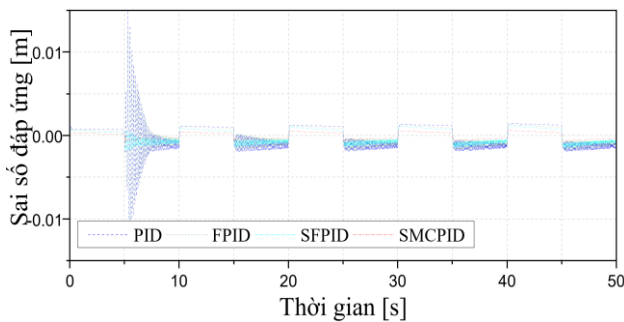


Hình 5. So sánh tín hiệu đầu ra của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là sóng Chirp với tần số thay đổi từ 0.2 Hz đến 0.1 Hz.

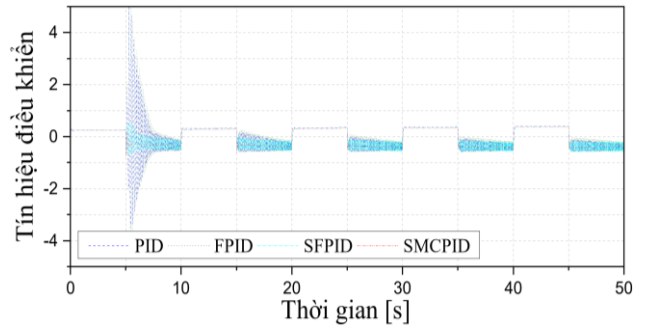
Sau đó, nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển PID mờ (FPID) (không có cơ chế điều chỉnh thông số PID trực tuyến), để cải thiện hiệu suất điều khiển. Các hàm mục tiêu giống như trong trường hợp bộ điều khiển PID đã được sử dụng để đánh giá kết quả, qua đó, cho thấy rằng đáp ứng của bộ điều khiển FPID tốt hơn so với bộ điều khiển PID, được thể hiện bằng các đường chấm gạch qua các đồ thị. Tuy nhiên, sự cải thiện chỉ đạt được mức nhỏ do khả năng của tập mờ rất hạn chế trong việc đáp ứng các điều kiện hoạt động rộng. Sai số điều khiển trong trường hợp này vẫn không đạt yêu cầu.



Hình 6. So sánh kết quả điều khiển hệ thống của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là đường răng cưa.



Hình 7. So sánh sai số đáp ứng của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là đường răng cưa.



Hình 8. So sánh tín hiệu đầu ra của các bộ điều khiển ứng với hàm mục tiêu là đường răng cưa.

Để cải thiện độ chính xác điều khiển một bước xa hơn, nghiên cứu sử dụng PID mờ với các thông số PID được điều chỉnh trực tuyến (SFPID) và tiến hành mô phỏng để đánh giá hiệu quả của nó. Như các đồ thị cho thấy bộ điều khiển SFPID hiển thị hiệu suất vượt trội so với các phương pháp trước, được minh họa qua các đường nét đứt chấm màu xanh ngọc. Tuy nhiên, dưới sự tác động của nhiễu và các điểm thay đổi chiều dịch chuyển của xy lanh, phản hồi của hệ thống vẫn có sự dao động và sai số đáp ứng vẫn còn cao.

Nhằm giải quyết các vấn đề về điều khiển đã được thảo luận phía trên, bộ điều khiển SMCPID, như được mô tả trong phần 2, đã được sử dụng để kiểm tra và phân tích. Kết quả của bộ điều khiển cũng được trình bày trong các đồ thị bằng đường màu đỏ. Các kết quả cho thấy rằng bộ điều khiển SMCPID luôn luôn cho kết quả điều khiển vượt trội. Trong trường hợp sử dụng SMCPID, phản hồi của hệ thống nhanh hơn, chính xác và ổn định hơn so với các bộ điều khiển khác. Kết quả này có thể được quy cho khả năng tổ hợp những lợi thế của cả bộ điều khiển PID với các thông số được điều chỉnh thích nghi và bộ điều khiển trượt SMC.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_d(k) - y(k))^2} \quad (22)$$

$$ARE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{|y_d(k) - y(k)|}{y_d(k)} \times 100 \right), [\%] \quad (23)$$

$$R2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_d(k) - y(k))^2}{\sum_{k=1}^n (y_d(k) - \bar{y})^2} \quad (24)$$

Bảng 1. Bảng so sánh đáp ứng của các bộ điều khiển qua các tiêu chí đánh giá.

Trường hợp/Tiêu chí đo lường		Đáp ứng hình Sin		
		RMSE	ARE	R2
Bộ điều khiển	PID	0.0036	0.0482	0.9893
	FPID	0.0028	0.0333	0.9937
	SFPID	0.0022	0.0168	0.9962
	SMCPID	0.0018	0.0085	0.9974
Trường hợp/Tiêu chí đo lường		Đáp ứng hình răng cưa		
		RMSE	ARE	R2
Bộ điều khiển	PID	0.0016	0.0258	0.9969
	FPID	0.0014	0.0219	0.9976
	SFPID	0.0008	0.0160	0.9992
	SMCPID	0.0004	0.0081	0.9998

Đáp ứng của hệ thống tương ứng với bộ điều khiển SMCPID và các bộ điều khiển khác đã được thực hiện để so sánh mức độ tối ưu và hiệu quả điều khiển dựa trên ba tiêu chí so sánh: RMSE (root mean square error), ARE (average relative error) và R2 (coefficient of determination) được định nghĩa bằng các công thức từ (22) đến (24). Bảng so sánh đáp ứng của các bộ điều khiển được trình bày trong bảng 1.

Trong bảng thống kê so sánh đáp ứng của các bộ điều khiển qua những tiêu chí đánh giá, có thể quan sát hai trường hợp: Đáp ứng hình chirp và đáp ứng hình răng cưa. Đối với đáp ứng hình chirp, kết quả cho thấy bộ điều khiển SMCPID thể hiện độ chính xác tốt nhất với giá trị RMSE thấp nhất, tiếp theo là SFPID và FPID. Trong khi đó, bộ điều khiển PID có RMSE cao nhất, cho thấy độ sai lệch lớn hơn so với các bộ khác. Theo tiêu chí ARE, bộ điều khiển SMCPID hoạt động rất tốt với tỷ lệ lỗi tuyệt đối thấp nhất, tiếp theo là SFPID và FPID. Trái lại, PID có ARE cao nhất, chỉ ra rằng nó gây ra nhiều sai lệch so với kết quả thực tế. Đối với tiêu chí R2, bộ điều khiển SMCPID vượt trội với giá trị gần 1, tiếp theo là SFPID và FPID. Mặt khác, bộ điều khiển PID có R2 thấp nhất, chỉ ra mức độ tương quan yếu với dữ liệu thực tế. Tương tự, trong trường hợp đáp

ứng hình răng cưa, các bộ điều khiển SMCPID tiếp tục cho thấy hiệu quả tốt với các tiêu chí đánh giá RMSE, ARE và R2. Tóm lại, dựa trên bảng thống kê, bộ điều khiển SMCPID cho thấy hiệu quả tốt nhất trong cả hai trường hợp đáp ứng hình chirp và hình răng cưa.

5. Kết luận

Bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển mới dựa trên mô hình hóa để đạt hiệu quả trong việc điều khiển vị trí của xy lanh trong hệ thống thủy lực. Phương pháp điều khiển SMCPID kết hợp bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển PID thích nghi, với các tham số PID tối ưu trực tuyến để giảm thiểu sai số điều khiển bằng cách sử dụng cơ chế học thông qua các quy tắc cập nhật. Hệ thống thủy lực đã được kiểm chứng bằng phần mềm Amesim và bộ điều khiển được kiểm tra thông qua phần mềm Matlab với chức năng co-simulation. Kết quả so sánh với ba bộ điều khiển khác đã chỉ ra rõ ràng rằng bộ điều khiển SMCPID cho kết quả đáng tin cậy nhất. Phương pháp này có tiềm năng trở thành một giải pháp khả thi cho việc điều khiển hệ thống thủy lực trong các ứng dụng công nghiệp.

Tài liệu tham khảo

- [1] F. Wang, Z. Lin, B. Xu, W. Fiebig; “An Electric-Hydrostatic Energy Storage System for Hydraulic Hybrid Wheel Loader”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022; 71 (7):7044–7056. DOI:10.1109/TVT.2022.3167519.
- [2] W. Wu, C. Yu; “Simulation and Experimental Analysis of Hydraulic Directional Control for Displacement Controlled System”. *IEEE Access*. 2017; 6:27993–28000. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2777958.
- [3] B. Helian, Z. Chen, B. Yao, L. Lyu, C. Li; “Accurate Motion Control of a Direct-Drive Hydraulic System With an Adaptive Nonlinear Pump Flow Compensation”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2021; 26(5):2593–2603. DOI:10.1109/TMECH.2020.3043576.
- [4] D. T. Liem, D. Q. Truong, K. K. Ahn; “Hysteresis modeling of magneto-rheological damper using self-tuning Lyapunov-based fuzzy approach”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015; 16:31–41. DOI:10.1007/s12541-015-0004-6.
- [5] D. T. Liem, D. Q. Truong, K. K. Ahn; “A torque estimator using online tuning grey fuzzy PID for applications to torque-sensorless control of DC motors”. *Mechatronics*. 2015; 26:45–63. DOI:10.1016/j.mechatronics.2015.01.004.
- [6] J. Lee, M. Jin, K. K. Ahn; “Precise tracking control of shape memory alloy actuator systems using hyperbolic tangential sliding mode control with time delay estimation”. *Mechatronics*. 2013; 23(3):310–317. DOI:10.1016/j.mechatronics.2013.01.005.
- [7] A. M. Khan, Y. Kim, B. Shin, M. H. Moghadam, N. A. Mansour; “Modeling and control analysis of an arc-shaped SMA actuator using PID, sliding and integral sliding mode controllers”, *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022; 340: 113523. DOI:10.1016/j.sna.2022.113523.
- [8] M. Vásquez, J. Yanascual, M. Herrera, A. Prado, O. Camacho; “A hybrid sliding mode control based on a nonlinear PID surface for nonlinear chemical processes”. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023; 40:101361. DOI:10.1016/j.jestch.2023.101361