

Điều khiển xoay tải trong hệ thống cần cầu sử dụng phương pháp trượt phân cấp kết hợp tối ưu bầy đàn

Load rotation control in crane system using hierarchical sliding mode control combined with particle swarm optimization

Nguyễn Thị Thanh Nga¹, Dương Văn Thành², Trần Thanh Phương² and Dương Minh Đức^{2,*}

¹Trường Công nghệ thông tin và Truyền thông, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Corresponding author E-mail: duc.duongminh@hust.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i2.284>

Abstract

This study focuses on controlling the direction of the load in the bridge crane system, aiming to ensure accurate direction control while simultaneously damping the residual oscillation caused by the cable twist. A hierarchical sliding mode control algorithm combined with swarm optimization was proposed to achieve that goal. The stability of the system was proven based on the Lyapunov criterion. An objective function, including the settling time and residual oscillation components, was constructed to determine the controller parameters, and the swarm optimization algorithm was applied to solve the problem of optimizing the objective function. The simulation results showed that the proposed method ensured accurate load direction control with fast residual oscillation damping. Comparisons with the input signal shaping method were also made to demonstrate the superiority of the proposed method.

Keywords: Particle swarm optimization; Hierarchical sliding mode control; Input shaping; PID; Vibration suppression.

Các từ viết tắt

PSO	Particle Swarm Optimization
HSMC	Hierarchical Sliding Mode Control
SMC	Sliding Mode Control
IS	Input Shaping
PID	Proportional-Integral-Derivative

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung vào việc điều khiển hướng của tải trong hệ thống cần trục, với mục tiêu đảm bảo điều khiển hướng chính xác đồng thời dập tắt dao động dư do sự xoắn cáp gây ra. Để thực hiện mục tiêu đó, thuật toán điều khiển trượt phân cấp kết hợp với tối ưu bầy đàn đã được đề xuất. Tính ổn định của hệ thống đã được chứng minh dựa vào tiêu chuẩn Lyapunov. Để xác định thông số bộ điều khiển, hàm mục tiêu bao gồm thành phần thời gian xác lập và dao động dư đã được xây dựng và thuật toán tối ưu bầy đàn được áp dụng để giải bài toán tối ưu hàm mục tiêu. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất đã đảm bảo điều khiển hướng tải chính xác với dao động dư được dập tắt nhanh. Các so sánh với phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào cũng đã được thực hiện để chứng minh tính ưu việt của phương pháp đề xuất.

1. Lời giới thiệu

Tự động hóa và điều khiển tự động đang ngày càng trở thành xu hướng chủ đạo trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong ngành

công nghiệp sản xuất. Sự phát triển của công nghệ đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc ứng dụng các hệ thống tự động trong sản xuất, quản lý và vận hành, từ đó giúp giảm chi phí nhân công, tăng năng suất làm việc và nâng cao chất lượng sản phẩm. Các công nghệ tự động hóa không chỉ được giới hạn ở các nhà máy sản xuất công nghiệp mà còn lan tỏa mạnh mẽ trong các ngành xây dựng, giao thông vận tải, và hậu cần góp phần tạo nên những cải tiến vượt bậc trong quy trình làm việc hiện đại.

Trong số những đối tượng ứng dụng của tự động hóa, hệ thống cần cầu được xem là một thành phần quan trọng trong ngành vận tải và xây dựng, nơi việc vận chuyển tải trọng nặng, di chuyển thùng hàng và các loại vật liệu lớn đòi hỏi một giải pháp vận hành an toàn, hiệu quả. Hệ thống cần cầu, với cấu trúc linh hoạt, cho phép di chuyển tải trọng đến các vị trí khác nhau một cách nhanh chóng và chính xác. Tuy nhiên, để đạt được hiệu suất vận hành cao và đảm bảo an toàn cho người lao động cũng như thiết bị, việc điều khiển chính xác và ổn định hệ thống cần cầu là một yêu cầu bắt buộc.

Trong hệ thống cần cầu, tải trọng được treo dưới mũi trục cầu qua dây cáp linh hoạt và có cấu trúc giống mô hình con lắc. Do đó, dao động của tải trọng là không thể tránh khỏi trong quá trình vận hành. Những dao động này không chỉ ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất làm việc mà còn có thể gây ra các tác động nguy hiểm, làm mất an toàn cho quá trình vận hành và gây hư hỏng hệ thống. Trước bối cảnh đó, nhiều bộ điều khiển chống rung, chống dao động đã được phát triển nhằm tự động chuyển tải trọng đến vị trí mong muốn đồng thời giảm thiểu các rung lắc của hệ thống.

Một bài toán khác ít được đề cập đến nhưng cũng khá quan trọng đó là bài toán điều khiển hướng của tải trọng trong các ứng dụng của cần cầu có khả năng vận chuyển các tải trọng lớn kèm theo các yêu cầu về điều khiển hướng tải trọng chính xác tại điểm đến. Một ví dụ điển hình của ứng dụng loại này là việc vận chuyển thùng hàng từ tàu hàng hoặc bãi tập kết lên xe tải. Thùng hàng cần được định hướng chính xác để có thể đặt lên xe tải một cách chắc chắn. Để thực hiện việc điều khiển hướng của tải, hệ thống cần cầu thường sử dụng một thiết bị đơn giản gọi là móc quay có động cơ để xoay tải theo bất kỳ góc nào mong muốn. Tuy nhiên, dây cáp nối giữa mũi trục cầu và động cơ móc quay dễ bị xoắn khi xoay tải, tạo ra dao động xoắn của tải trong quá trình điều chỉnh góc [1, 2]. Điều này đòi hỏi phải có một bộ điều khiển chống rung chuyên biệt, có khả năng điều khiển động cơ móc quay tới góc mong muốn đồng thời triệt tiêu hoàn toàn dao động dư phát sinh trong quá trình hoạt động.

Trong những năm gần đây, các nhà nghiên cứu đã đưa ra nhiều phương pháp điều khiển khác nhau nhằm khắc phục hiện tượng dao động quay của tải trọng trong hệ thống xoay tải. Một phương án là chế tạo và điều khiển thiết bị xoay tải chuyển động [3, 4] sử dụng các xi lanh thủy lực và thuật toán điều khiển PID. Một giải pháp khác thu hút được nhiều quan tâm hơn là áp dụng các thuật toán điều khiển chống rung cho hệ xoay tải thông thường. Trong [5, 6], phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào đã được áp dụng. Tuy nhiên, phương pháp này thường gặp khó khăn khi áp dụng vào các hệ thống có tham số thay đổi, ví dụ như khi khối lượng tải hoặc chiều dài dây cáp có biến động lớn. Trong trường hợp điều khiển xoay tải cơ chế thích nghi yêu cầu cần xác định chính xác các thông số hệ thống. Một phương pháp điều khiển tiên định khác là thiết kế quỹ đạo chống rung cho hệ thống [7]. Các phương pháp điều khiển tiên định có ưu điểm đơn giản nhưng dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu và sai lệch mô hình. Do vậy, nhiều nghiên cứu tập trung vào điều khiển phản hồi như điều khiển phản hồi trạng thái [2], điều khiển PID lồng nhau (nested PID) [12], điều khiển lai tiên định - phản hồi [7], điều khiển tối ưu [13], điều khiển bền vững [14], điều khiển chuyển đổi tối ưu [15], điều khiển liên kết trạng thái tăng cường [16]. Các phương pháp điều khiển trên có nhược điểm là xem xét hệ thống dưới dạng mô hình tuyến tính và do đó hạn chế khả năng hoạt động của bộ điều khiển. Một số nghiên cứu có xem xét mô hình hệ thống ở dạng phi tuyến nhưng chưa xem xét đến tính bền vững và tối ưu của thuật toán điều khiển đề xuất.

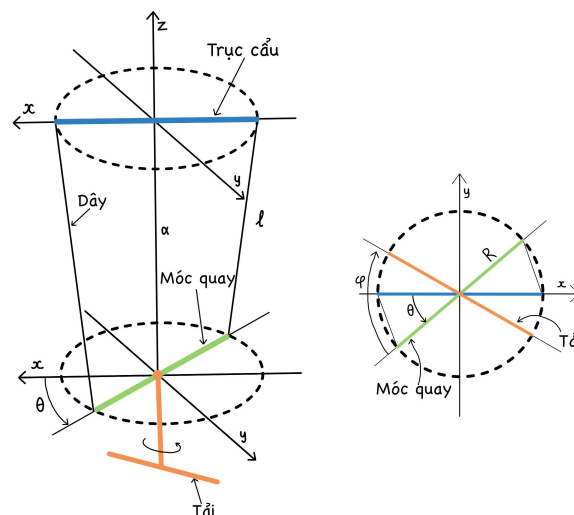
Trong những năm gần đây, Điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) được đánh giá cao nhờ khả năng xử lý các hệ thống phi tuyến một cách bền vững và khả năng chống nhiễu tốt. Điều khiển trượt đã được sử dụng trong rất nhiều ứng dụng khác nhau đem lại hiệu quả cao. Đặc biệt, khi kết hợp SMC với các thuật toán tối ưu, ta có thể tìm ra bộ thông số cho bộ điều khiển trượt có khả năng tối ưu hóa theo tiêu chuẩn mong muốn. Điều khiển trượt đã chứng minh tính hiệu quả trong rất nhiều ứng dụng khác nhau, bao gồm các bài toán về điều khiển chống rung [10, 11]. Vì lý do trên, bài báo này đề xuất bộ điều khiển trượt phân cấp kết hợp (hierarchical sliding mode - HSMC) với phương pháp tối ưu bầy đàn (particle swarm optimization - PSO) cho hệ thống xoay tải cần cầu. Bộ điều khiển trượt phân cấp được thiết kế cho hệ thống xoay tải cần cầu - một hệ thống có dạng hệt cơ cấu chấp hành đảm bảo tính ổn định và bền vững của hệ thống. Tiếp đến phương pháp tối ưu bầy đàn được sử dụng để xác định tham số bộ điều khiển trượt phân cấp với

mục tiêu tối thiểu hóa đồng thời sai lệch vị trí góc xoay, góc dao động và thời gian xoay tải. Phương pháp đề xuất cũng được so sánh với phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào để xác thực tính ưu việt của phương pháp.

2. Mô hình toán học hệ thống xoay tải

2.1. Mô tả hệ thống

Hệ thống xoay tải trong cần cầu được mô tả trong Hình 1. Hệ thống bao gồm trục cầu, dây cáp, móc quay có chứa động cơ để xoay tải. Ở trạng thái ban đầu góc giữa trục cầu là động cơ móc quay là 0° . Khi hoạt động, động cơ móc quay có phạm vi hoạt động là 180° , có vai trò xoay một góc tùy ý phù hợp với yêu cầu hướng tải tại điểm đích. Trong quá trình động cơ xoay, do tính mềm của dây cáp nên dây cáp bị xoắn, do có quán tính sẽ sinh ra dao động, tạo nên góc lệch giữa trục cầu và động cơ dây chính là góc dao động, lớn hay nhỏ tùy theo gia tốc cung cấp cho chuyển động. Bảng 1 và 2 cho biết ý nghĩa của các thông số trong hệ thống xoay tải và dải giá trị tương ứng của mô hình hệ thống xoay tải được sử dụng trong nghiên cứu này



Hình 1: Mô hình hệ thống xoay tải

Bảng 1: Thông số của hệ thống xoay tải mô phỏng

Kí hiệu	Đặc điểm	Khoảng giá trị
I_L	Quán tính tải (kgm^2)	11,1-41,89
I_H	Quán tính móc (kgm^2)	1,0-1,5
m	Khối lượng tải và móc (kg)	77,9-207,5
R	Bán kính quay của móc (m)	0,25
l	Chiều dài dây (m)	3-5
c	Hệ số ma sát (Ns/rad)	0,1-0,5
g	Gia tốc trọng trường (m/s^2)	9,81

Bảng 2: Kí hiệu các góc trong hệ thống móc quay

Kí hiệu	Đặc điểm
$\varphi(t)$	Góc giữa tải và móc (rad)
$\gamma(t)$	Góc giữa tải và trục x (rad)
$\theta(t)$	Góc nghiêng móc quay và trục x (rad)
$a(t)$	Khoảng cách giữa trục cầu và móc quay (m)

2.2. Mô hình toán học

Tổng động năng của hệ thống được xác định như sau:

$$T = \frac{1}{2}I_L(\dot{\phi} - \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}I_H\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{a}^2 \quad (1)$$

Tổng thế năng của hệ được xác định bằng công thức $V = -mga$, do đó hàm Lagrange L của hệ thống được xác định như sau:

$$L = T - V = \frac{1}{2}I_L(\dot{\phi} - \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}I_H\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{a}^2 + mga. \quad (2)$$

Mối quan hệ ràng buộc giữa khoảng cách trục cầu-móc xoay và chiều dài dây:

$$a^2 = l^2 - 2R^2(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

Thêm vào đó, năng lượng tiêu hao do ma sát nhớt gây ra là $D = (1/2)c\dot{\theta}^2$.

Áp dụng phương trình Euler-Lagrange cho biến $\theta(t)$ ta có:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} = 0. \quad (4)$$

Giả thiết rằng chiều dài dây là không đổi, dây không bị biến dạng ($\dot{l} = \ddot{l} = 0$), mô hình toán học phi tuyến của hệ thống móc xoay sẽ được biểu diễn như sau:

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + b(\theta)u \quad (5)$$

Trong đó:

$$f(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{I_L + I_H + \frac{mR^4 \sin^2 \theta}{a^2}} \times \left[-\frac{mR^2 \sin \theta}{a} \left(\frac{R^4 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta}{a^2} + \frac{R^2}{a} \dot{\theta}^2 \cos \theta + g \right) - c\dot{\theta} \right] \quad (6)$$

$$b(\theta) = \frac{I_L}{I_L + I_H + \frac{mR^4 \sin^2 \theta}{a^2}} \quad (7)$$

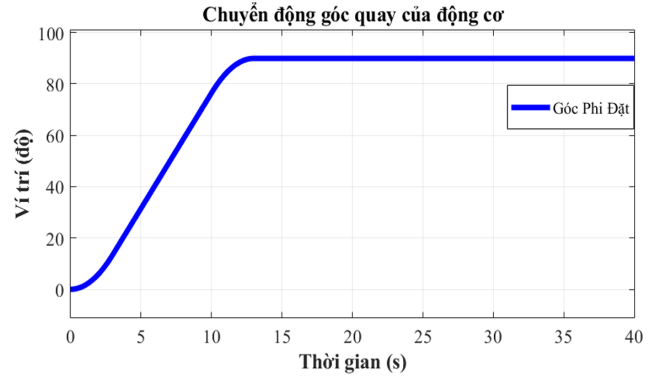
$$u = \ddot{\phi} \quad (8)$$

Hệ thống chỉ có một đầu vào điều khiển là gia tốc $\ddot{\phi}(t)$ được tạo ra bởi một động cơ servo và có hai đầu ra cần điều khiển $\phi \rightarrow \phi_d$ và $\theta \rightarrow 0$, trong đó ϕ_d là góc lệnh tham chiếu của trọng tải.

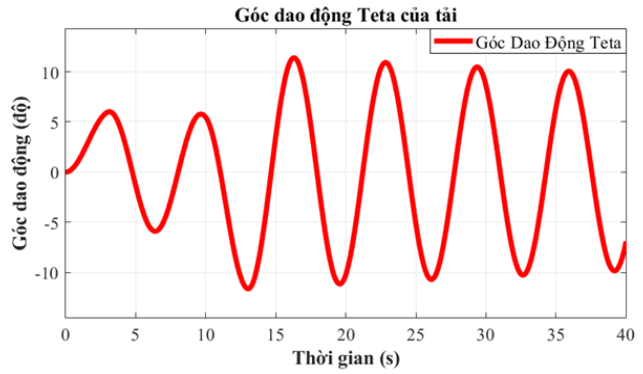
2.3. Mô phỏng hệ thống

Khi cầu trục hoạt động momen quay động cơ làm móc chuyển động từ 0° đến vị trí đặt 90° (Hình 2), quán tính khi xoay tải sinh sự xoắn dây gây ra dao động với góc dao động lớn trong phạm vi $(-12^\circ; 12^\circ)$ như trong Hình 3. Điều này hoàn toàn phù hợp đáp ứng của tải trong thực tế. Như vậy mô hình được xây dựng là phù hợp, phản ánh được bản chất vật lý của hệ thống.

Có thể thấy nếu không có thuật toán điều khiển thích hợp, dao động của tải sẽ không tồn tại rất lâu và việc cố định hướng tải để hạ tải xuống vị trí mong muốn là không thể thực hiện được. Do đó việc xây dựng một thuật toán có khả năng điều khiển hướng tải chính xác đồng thời dập được dao động của tải là yêu cầu tất yếu.



Hình 2: Góc ϕ động cơ quay



Hình 3: Góc dao động của tải khi chưa có bộ điều khiển

3. Thiết kế điều khiển

3.1. Thiết kế bộ điều khiển trượt phân cấp (HSMC)

Hệ thống với một tín hiệu điều khiển tương ứng với gia tốc của động cơ móc quay $\ddot{\phi} = u$ điều khiển quay động cơ móc quay. Tín hiệu đầu ra là góc quay của tải cũng là góc quay của động cơ móc quay ϕ , và góc dao động của dây cáp trọng tải θ . Bộ điều khiển trượt phân cấp được thiết kế có mục đích đưa góc tải $\phi \rightarrow \phi_d$ và góc dao động gây ra do quán tính $\theta \rightarrow 0$ trong thời gian ngắn nhất.

Đặt các biến điều khiển $x_1 = \theta, x_2 = \dot{x}_1, x_3 = \phi, x_4 = \dot{x}_3$. Khi đó mô hình toán học của hệ thống có thể biểu diễn dưới dạng phương trình trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\theta, \dot{\theta}) + b(\theta)u \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = u \end{cases} \quad (9)$$

Các giá trị đặt của hệ thống lần lượt là $x_{1d} = 0$ và $x_{3d} = \phi_d$. Định nghĩa các sai lệch như sau:

$$e_1 = x_1 - x_{1d}$$

$$e_3 = x_3 - x_{3d}$$

Khi đó

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1,$$

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_{3d},$$

$$\ddot{e}_1 = \ddot{x}_1$$

$$\ddot{e}_3 = \ddot{x}_3 - \ddot{x}_{3d}$$

Để thiết kế bộ điều khiển trượt ta lựa chọn mặt trượt phân cấp như sau.

$$S = \alpha S_1 + \beta S_2 = \alpha(\dot{e}_1 + \lambda_1 e_1) + \beta(\dot{e}_3 + \lambda_3 e_3) \quad (10)$$

Khi đó, đạo hàm mặt trượt được tính như sau:

$$\dot{S} = \alpha(\ddot{e}_1 + \lambda_1 \dot{e}_1) + \beta(\ddot{e}_3 + \lambda_3 \dot{e}_3) \quad (11)$$

Sử dụng luật điều khiển tiếp cận hằng số [9]:

$$\dot{S} = -K \text{sign}(S) \quad (12)$$

Ta rút ra tín hiệu điều khiển:

$$u = \frac{\alpha f(\theta, \dot{\theta}) + \alpha \lambda_1 \dot{\theta} - \beta \dot{\phi}_d + \beta \lambda_3 (\dot{\phi} - \dot{\phi}_d) + K \text{sign}(S)}{\alpha + \beta b(\theta)} \quad (13)$$

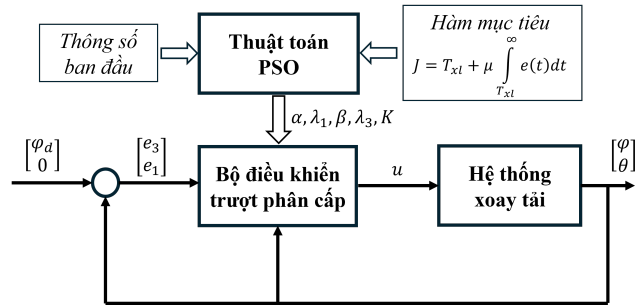
trong đó S là mặt trượt và được viết tường minh dưới dạng hàm của các đại lượng vật lý θ và ϕ :

$$S = \alpha(\dot{\theta} + \lambda_1 \theta) + \beta[(\dot{\phi} - \dot{\phi}_d) + \lambda_3 (\phi - \phi_d)] \quad (14)$$

Để giảm bớt hiện tượng chattering của bộ điều khiển trượt, chúng ta có thể thay thế hàm dấu $\text{sign}(S)$ bằng hàm $\text{sat}(S)$ trong công thức tính toán tín hiệu điều khiển $u(t)$ với

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } \frac{S}{\varepsilon} > 1 \\ -1 & \text{nếu } \frac{S}{\varepsilon} < -1 \\ \frac{S}{\varepsilon} & \text{nếu } \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

Hình 4 mô tả cấu trúc hệ thống với bộ điều khiển đề xuất. Các thông số của bộ điều khiển sẽ được xác định bằng cách tối thiểu hóa sai lệch hệ thống và thời gian xác lập của hệ thống. Bài toán tối ưu này sẽ được giải bằng phương pháp tối ưu bầy đàn ESO và sẽ được trình bày ở phần sau.



Hình 4: Góc dao động của tải khi chưa có bộ điều khiển

3.2. Phân tích tính ổn định

Để xét tính ổn định của hệ thống với bộ điều khiển được đề xuất, xét hàm Lyapunov V có công thức

$$V = \frac{1}{2} S^2 \geq 0 \quad (16)$$

Khi đó,

$$\dot{V} = S\dot{S} = -K S \text{sign}(S) = -K|S| \leq -cV^{1/2} \leq 0 \quad (17)$$

với $c \leq \sqrt{2}K$. Theo tài liệu [17], với điều kiện của hàm Lyapunov thỏa mãn bất phương trình (17), ta có thể kết luận $V(t)$ và $S(t)$ hội tụ về 0 trong một khoảng thời gian hữu hạn. Thêm vào đó, theo [18], $S = 0$ sẽ dẫn tới $e_1 = e_3 = 0$, nghĩa là hệ ổn định tại điểm cân bằng $\theta = 0$ và $\phi = \phi_d$.

3.3. Tối ưu tham số bộ điều khiển trượt phân cấp (HSMC) bằng phương pháp tối ưu bầy đàn(PSO)

Thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong việc thiết kế tối ưu các bộ điều khiển [19] trong đó quỹ đạo của mỗi cá thể trong không gian tìm kiếm được hiệu chỉnh bằng cách thay đổi vận tốc của từng cá thể, thông qua kinh nghiệm bay của nó và kinh nghiệm bay của những cá thể khác trong không gian tìm kiếm. Giả sử véc-tơ vị trí và véc-tơ vận tốc của một cá thể thứ i trong không gian đa chiều là:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (18)$$

Tại mỗi lần lặp, vận tốc của một phần tử được xác định bởi cả kinh nghiệm cá nhân cũng như kinh nghiệm của cả nhóm:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 (Pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 (Gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (19)$$

Vị trí của mỗi phần tử được xác định từ vị trí trước đó và vận tốc hiện tại của phần tử:

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (20)$$

Trong đó:

v_{id}^k là vector vận tốc của cá thể thứ id tại vòng lặp thứ k .

x_{id}^k là vị trí của cá thể thứ id tại vòng lặp thứ k .

ω là khối lượng quán tính.

$Pbest_{id}^k$ là chỉ số tối ưu cục bộ của cá thể.

$Gbest_{id}^k$ là chỉ số tối ưu toàn cục của bầy đàn.

c_1, c_2 là các hệ số học tập.

r_1, r_2 là hai số ngẫu nhiên trong khoảng $[0, 1]$.

Thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) được mô tả trong Hình 5 gồm các bước sau:

- Khởi tạo ngẫu nhiên một quần thể gồm P phần tử trong không gian D chiều, với D biểu diễn số phần tử của bộ tham số cần tối ưu.
- Tính giá trị của hàm mục tiêu ứng với mỗi phần tử trong quần thể.
- Các phần tử di chuyển hướng tới giải pháp tốt nhất.
- Quay lại bước 2 đến khi điều kiện hội tụ thỏa mãn.

Trong bài báo này, phương pháp tối ưu bầy đàn được sử dụng để xác định các thông số $\alpha, \lambda_1, \beta, \lambda_3, K$ của bộ điều khiển trượt phân cấp với mục tiêu là thời gian xác lập ngắn nhất và dao động dư sau thời điểm xác lập là nhỏ nhất. Để đạt được mục tiêu trên, ta chọn hàm mục tiêu J có công thức như sau:

$$J = T_{xl} + \mu \int_{T_{xl}}^{\infty} e dt \quad (21)$$

Trong đó:

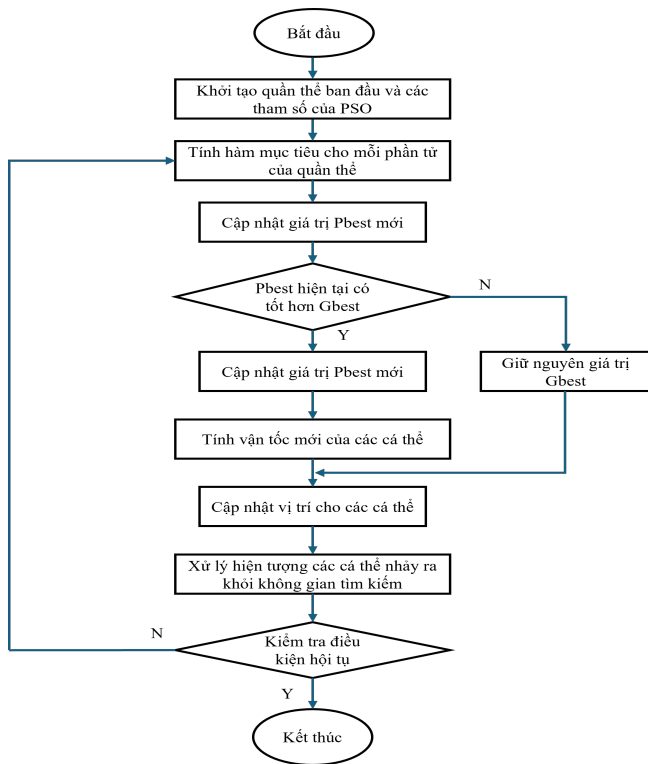
T_{xl} : Thời gian xác lập của hệ thống.

$e = |\theta(t)|$: giá trị tuyệt đối của góc lắc θ .

μ : Hệ số thể hiện mức độ ưu tiên của dao động dư so với thời gian xác lập trong hàm mục tiêu.

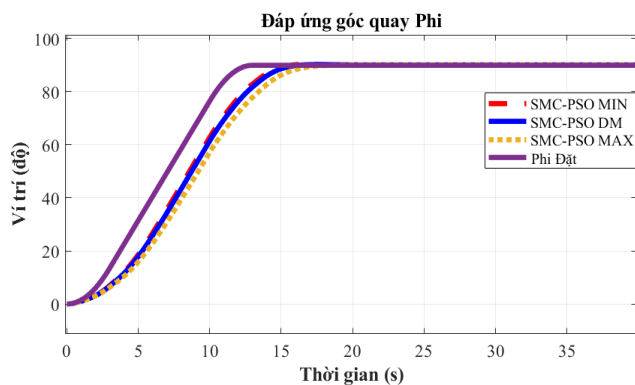
3.4. Kết quả mô phỏng

Để kiểm chứng tính đúng đắn và hiệu quả của thuật toán đề xuất, mô phỏng đã được thực hiện trên môi trường Matlab Simulink. Các thông số mô phỏng của mô hình như ở trong Bảng 1. Để thiết kế bộ điều khiển trượt phân cấp sử dụng



Hình 5: Lưu đồ thuật toán tối ưu bầy đàn

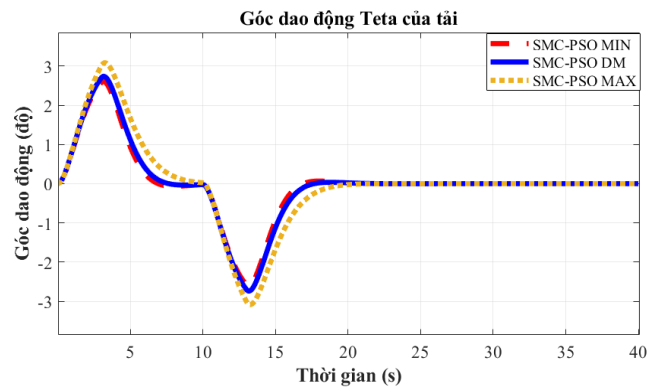
phương pháp tối ưu bầy đàn (PSO), các thông số mô hình được lựa chọn là các thông số định mức (giá trị trung bình của giá trị tối thiểu và giá trị tối đa của dải giá trị). Kịch bản mô phỏng là tải được điều khiển để xoay một góc 90° . Do thuật toán điều khiển cần đạo hàm cấp 2 của tín hiệu đặt, dạng quỹ đạo của tín hiệu đặt được chọn là dạng 2-1-2 (trapezoidal velocity profile - vận tốc dạng hình thang). Thông số bộ điều khiển trượt phân cấp được tìm ra là $\alpha = 2.65$, $\beta = 2231.8$, $\lambda_1 = 1375.5$, $\lambda_3 = 0.001$, $K = 10$.



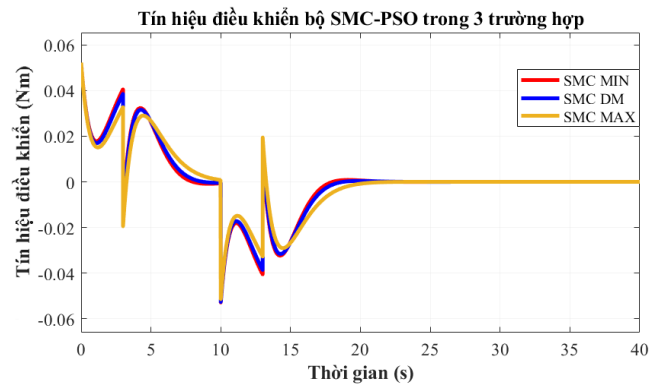
Hình 6: Kết quả mô phỏng góc φ của tải (SMC-PSO)

Bộ điều khiển với tham số được xác định như trên được áp dụng cho 3 trường hợp với các thông số mô hình là thông số định mức (DM), thông số có giá trị nhỏ nhất trong dải (MIN), và thông số có giá trị lớn nhất trong dải (MAX).

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong hình 6-8 cho thấy trong cả 3 trường hợp hệ thống đều ổn định, góc tải tại điểm đến bằng giá trị đặt và dao động dư hoàn toàn được triệt tiêu. Biên độ dao động trong quá trình xoay tải nhỏ, chỉ vào khoảng $2,8^\circ - 3^\circ$. Biên độ dao động lớn nhất với trường hợp tải lớn nhất, tuy nhiên độ tăng góc dao động là không đáng kể, chỉ



Hình 7: Kết quả mô phỏng góc θ của tải (SMC-PSO)



Hình 8: Kết quả mô phỏng tín hiệu điều khiển SMC-PSO

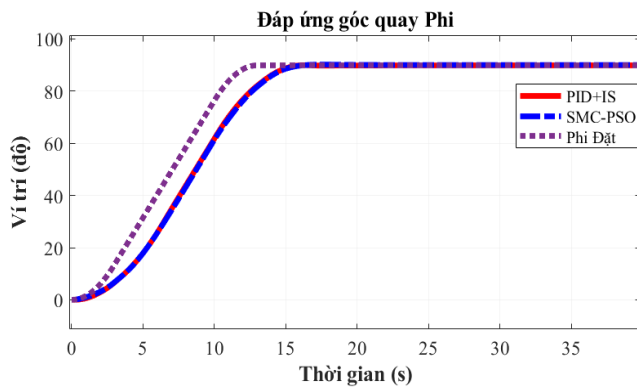
$0,2^\circ$ (khoảng 7%) so với tải nhỏ nhất, trong khi mức độ thay đổi tải là 2,66 lần. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy tính bền vững của thuật toán đề xuất. Khi thông số mô hình thay đổi trong dải giá trị, hệ thống vẫn ổn định, chất lượng điều khiển có suy giảm nhưng không nhiều. Tín hiệu điều khiển vẫn trong dải cho phép.

Cần chú ý do hạn chế về gia tốc tăng tốc và giảm tốc nên đáp ứng góc quay của tải bị trễ khoảng 1,2 giây. Tuy nhiên, điều này là chấp nhận được khi thời gian xoay tải dài. Thêm vào đó, có thể thấy tín hiệu điều khiển thay đổi đột ngột tại các thời điểm gia tốc tín hiệu đặt thay đổi đột ngột. Điều này cho thấy sự phụ thuộc của tín hiệu điều khiển vào tín hiệu đặt. Để tín hiệu điều khiển trơn và có tính khả thi trong thực tế, tín hiệu đặt cần được thiết kế một cách cẩn thận.

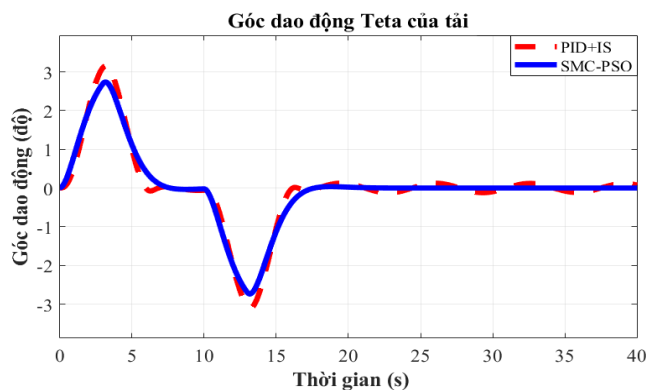
4. So sánh các bộ điều khiển tạo dạng tín hiệu đầu vào

Để xác thực tính ưu việt của thuật toán đề xuất, ta tiến hành so sánh đáp ứng của hệ thống khi áp dụng thuật toán đề xuất và khi áp dụng phương pháp tạo dạng tín hiệu đầu vào Input Shaping (IS). Phương pháp IS là phương pháp điều khiển tiên định trong đó vị trí của động cơ xoay tải được điều khiển bằng bộ điều khiển PID, còn dao động của tải được dập sử dụng một bộ lọc dạng xung [8]. Các kết quả mô phỏng so sánh ứng với trường hợp tải ở giá trị định mức được trình bày trong các hình 9-11.

Có thể thấy đáp ứng góc xoay động cơ của 2 thuật toán điều khiển là như nhau, tuy nhiên góc dao động trong giai đoạn xoay tải của phương pháp IS cao hơn so với phương pháp đề xuất mặc dù tín hiệu điều khiển nhỏ hơn. Đặc biệt, phương pháp



Hình 9: Kết quả mô phỏng góc φ của hai bộ điều khiển



Hình 10: Kết quả mô phỏng góc θ của tải của hai bộ điều khiển

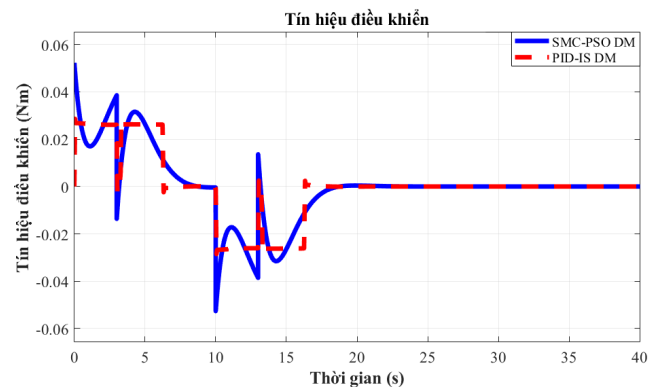
đề xuất có thể dập tắt hoàn toàn dao động dư nhưng phương pháp IS thì dao động dư vẫn còn với biên độ khoảng 0.2° . Điều này đã chứng tỏ tính ưu việt của phương pháp đề xuất so với phương pháp IS. Bảng 3 tổng kết kết quả so sánh giữa hai phương pháp.

Từ bảng so sánh và kết quả mô phỏng có một số kết luận:

- Bộ điều khiển PID kết hợp bộ tạo dạng tín hiệu đầu vào không loại bỏ được sai lệch tĩnh, không triệt tiêu hoàn toàn được dao động và kém bền vững với hệ thống có tham số thay đổi.
- Bộ điều khiển trượt phân cấp, giúp hệ thống hoạt động ổn định bền vững với các trường hợp hệ thống tham số thay đổi. Đáp ứng hệ thống tiến đến giá trị đặt, dao động hệ thống được triệt tiêu hoàn toàn, thời gian đáp ứng

Bảng 3: Bảng so sánh bộ điều khiển PID+IS và SMC-PSO

	PID+IS	SMC-PSO
Mức độ đáp ứng góc xoay động cơ φ	Bị trễ trong quá trình quá độ	Bị trễ trong quá trình quá độ
Khả năng dập dao động θ	Không dập tắt hoàn toàn	Dập tắt hoàn toàn
Biên độ góc dao động khi quá độ	3.2°	2.8°
Thời gian xác lập	15 giây	15 giây
Khả năng chống nhiễu	Kém, tồn tại sai lệch tĩnh	Tốt, triệt tiêu sai lệch tĩnh



Hình 11: Kết quả mô phỏng tín hiệu điều khiển của hai bộ điều khiển

Cần chú ý rằng, bộ điều khiển tạo dạng tín hiệu đầu vào với số xung nhiều hơn có thể được áp dụng để loại bỏ dao động dư tốt hơn cho hệ thống. Tuy nhiên, việc tăng số xung của bộ tạo tín hiệu đầu vào làm cho thời gian xoay tải sẽ bị dài ra và dao động cũng không hoàn toàn bị dập tắt như phương pháp đề xuất.

Kết luận

Bài báo đã đề xuất thuật toán điều khiển trượt phân cấp cho hệ thống xoay tải trong cần cẩu có các thông số bộ điều khiển được xác định bằng việc tối ưu một hàm mục tiêu sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn. Thuật toán đề xuất đã cho phép điều khiển chính xác góc tải và dập tắt dao động dư nhanh chóng. Việc sử dụng hàm mục tiêu là kết hợp của thời gian xác lập hệ thống và tổng dao động dư cho phép xác định thông số hệ thống đảm bảo được khả năng tác động nhanh. Các kết quả mô phỏng đã thể hiện sự ưu việt của thuật toán đề xuất so với thuật toán tạo dạng tín hiệu đầu vào.

Trong tương lai, việc triển khai và đánh giá thuật toán đề xuất trên các hệ thống thực tế sẽ được thực hiện. Các phương án tăng khả năng thích nghi của hệ thống với sự thay đổi lớn của các thông số mô hình cũng được xem xét. Việc thiết kế quỹ đạo đặt phù hợp hoặc sử dụng các bộ lọc tiền định cho tín hiệu đặt để tránh hiện tượng biến thiên đột ngột của tín hiệu điều khiển cũng được xem xét để đảm bảo khả năng triển khai của thuật toán đề xuất trong thực tế.

Tài liệu

- [1] L. Morrish, M. P. Cartmell, and A. J. Taylor, "Geometry and kinematics of multicable spreader lifting gear," *Proc. Inst. of Mech. Eng., Part C: J. of Mech. Eng. Sci.*, vol. 211, no. 3, pp. 185-194, 1997.
- [2] Thomas Gustafsson, "Modelling and Control of rotary crane system," PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 1993.
- [3] Ngo, Q. H., Hong, K.-S., Kim, K. H., Shin, Y. J., and Choi, S.-H. (2008). Skew control of a container crane. In *International conference on control, automation and systems*, 2008. ICCAS 2008. (pp. 1490-1494). <http://dx.doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694378>.
- [4] Arena A., Casalotti A., Lacarbonara W., Cartmell M.P. "Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification," *International Journal of Mechanical Sciences*, 93 (2015), pp. 8-21, 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.024
- [5] A. Tzes and S. Yurkovich, "An adaptive input shaping control scheme for vibration suppression in slewing flexible structures," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 114-121, Jun 1993.
- [6] Hieu N.Q., Hong K.S. "Skew control of a quay container crane," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23 (12) (2009), pp. 3332-3339, 10.1007/s12206-009-1020-1
- [7] Ulf Schaper, Christina Ditttrich, Eckhard Arnold, Klaus Schneider, Oliver Sawodny, "2-DOF skew control of boom cranes including state estimation and reference trajectory generation," *Control Engineering*

- Practice, Volume 33, 2014, Pages 63-75, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.09.009>.
- [8] M. D. Duong, Q. T. Dao, T. H. Do, "Settling Time Optimization of a Critically Damped System with Input Shaping for Vibration Suppression Control," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, Volume 12, Issue 5, Pages: 9388-9394, 2022. <https://doi.org/10.48084/etasr.5242>.
 - [9] N. D. Phước, "Điều khiển trượt cơ bản và trượt bậc cao," 2014.
 - [10] Zhang, J., Wu, W. and Huang, X. Robust sliding-mode control for a gantry crane system subject to external disturbance. *Nonlinear Dyn* 112, 4599–4615 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09294-4>
 - [11] Thi-Ly Tong, Minh-Trung Ho , Hoang-Hiep Dao, Vu-Khanh Pham , Minh Duc Duong , Quy-Thinh Dao, "Parameter Optimization of Sliding Mode Controller for Tower Crane Using Particle Swarm Optimization Algorithm" Website: <https://mca-journal.org> ISSN 1859-0551, 2024
 - [12] Ke Chen, Huixing Zhou, Xiaowei Shan, "Rotation-control device for construction cranes with nested PID control," *Automation in Construction*, Volume 146, 2023, 104704, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104704>.
 - [13] H. Duc Tho, R. Tasaki, T. Miyoshi and K. Terashima, "Optimal Control of Payload's Skew Rotation in Crane Systems with State and Control Input Constraints," 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, Denmark, 2018, pp. 729-735, doi: 10.1109/CCTA.2018.8511443.
 - [14] Ho, Tho Duc, and Kazuhiko Terashima. "Robust control designs of payload's skew rotation in a boom crane system." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 27.4 (2018): 1608-1621.
 - [15] Tho Ho, Kensuke Suzuki, Mitsuo Tsume, Ryosuke Tasaki, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, "A switched optimal control approach to reduce transferring time, energy consumption, and residual vibration of payload's skew rotation in crane systems," *Control Engineering Practice*, Volume 84, 2019, Pages 247-260, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.11.018>.
 - [16] Liu, Rui, Biao Lu, Jinyang Dong, and Weili Ding. "Slewing Control of Overhead Crane Based on State-enhance Coupling Method." In 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC), pp. 676-681. IEEE, 2024.
 - [17] S. Mobayen, "Adaptive global terminal sliding mode control scheme with improved dynamic surface for uncertain nonlinear systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 1692-1700, 2018
 - [18] Qian D, Yi J, "Hierarchical Sliding Mode Control for Under-actuated Cranes". Heidelberg, Berlin: Springer, 2016
 - [19] Amiri, R., Tahmouresi, A., Momenaei Kermani, V. et al. Tower crane location optimization problem: a comprehensive metaheuristic algorithm approach. *Evol. Intel.* 18, 44 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12065-025-01021-1>