

Điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy mới trong nâng/hạ tải của hệ thống cầu trục con lắc đơn hai chiều

A novel non-recursive robust adaptive for 2D cranes with load hoisting/lowering

Lưu Thị Huệ^{1*}

¹Electric power university

*Corresponding author E-mail: huelt@epu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v30i4.305>

Abstract

In this paper, the author considers the design of a non-recursive robust adaptive controller for a two-dimensional overhead crane system with varying cable lengths, to suppress swing angle during load hoisting/lowering, while tracking the load's trajectory under conditions of uncertain system parameters and external disturbances. The proposed non-recursive robust adaptive controller, with only a time-varying and updated parameter, eliminates the need to design a tool for estimating uncertain model parameters and disturbances. The controller is analyzed and proven stable according to the Lyapunov theory. The trajectory tracking error of the trolley and all parameters in the closed-loop control converge to zero and are bounded. Finally, simulations are performed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords: Single pendulum crane; adaptive control; non-recursive adaptive control; system parameters uncertainty; under-actuated systems

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
M	kg	Trọng lượng của xe con
m	kg	Khối lượng của tải trọng
l_1	m	Độ dài dây cáp
x	m	Vị trí chuyển động của xe con
$\theta(t)$	Rad	Góc dao động của tải trọng
F_x, F_l	N	Lực tác động
$\mathbf{q} = [x, l_1, \theta]^T$		Véc tơ vị trí
$\mathbf{F} = [F_x, F_l, 0]^T$		Véc tơ đầu vào điều khiển
$\mathbf{q}_a = [x, l_1]^T$		Biến trạng thái có điều khiển tác động
$\mathbf{q}_u = \theta$		Biến không được điều khiển trực tiếp

các thử nghiệm mô phỏng được tiến hành nhằm kiểm tra tính khả thi và đánh giá hiệu quả của phương pháp điều khiển đã đề xuất

1. Giới thiệu

Hệ thống cầu trục được sử dụng và nghiên cứu rộng rãi để vận chuyển hàng hóa tại các nhà máy, công trường xây dựng, cảng biển,... Hệ thống cầu trục hoạt động trong điều kiện môi trường không ổn định, dễ chịu tác động từ nhiễu bên ngoài. Bên cạnh đó, đây là một hệ thống phi tuyến có mô hình động học không hoàn toàn xác định, đồng thời tồn tại đặc điểm thiếu hụt cơ cấu điều khiển trực tiếp đối với một số biến trạng thái. Việc kiểm soát hệ thống vừa đảm bảo yêu cầu vận chuyển tải trọng tới vị trí mong muốn, vừa đảm bảo hạn chế rung lắc của tải trọng. Bên cạnh việc nghiên cứu mô hình cho hệ thống, thì điều khiển hệ thống cũng rất được quan tâm nhằm cải tiến chất lượng điều khiển giúp hệ thống cầu trục làm việc ngày một tốt hơn. Điều khiển cho hệ thống cầu trục đã được rất nhiều các nhà khoa học quan tâm và phát triển. Đầu tiên đó là bộ điều khiển truyền thẳng, như bộ điều khiển định hình đầu vào được đề xuất trong [1] và [2] nhằm giảm dao động dư và dao động tạm thời, và loại bỏ rung lắc còn lại của tải trọng vào cuối thao tác. Trong [3] trình bày phương pháp định hình đường cong Bezier đầu vào, bằng cách điều chỉnh vị trí của các điểm điều khiển. Hệ thống cầu trục được mô hình hóa dưới dạng phi tuyến và thiếu cơ cấu truyền động, khiến cho việc điều khiển vòng kín trở thành một cân nhắc thiết yếu để cải thiện việc vận chuyển tải trọng. Trong [4] trình bày phương pháp hạn chế rung lắc của tải trọng bằng cách sử dụng tuyến tính hóa phản hồi một phần. Còn điều khiển theo dõi xe con và tải trọng được thiết kế dựa trên điều khiển trượt. Bộ điều khiển trượt được trình bày trong [5], đã điều khiển giảm thiểu độ rung lắc tải trọng, theo dõi xe con đến đích mong muốn và nâng/hạ tải trọng đến chiều dài tham chiếu của

Tóm tắt

Trong bài báo này tác giả xem xét thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy cho hệ thống cầu trục con lắc đơn trong không gian hai chiều với chiều dài dây cáp thay đổi, để ngăn chặn dao động của tải trọng trong quá trình nâng và vận chuyển, đồng thời theo dõi quỹ đạo của tải trọng trong điều kiện các tham số của hệ thống là bất định, chịu tác động của nhiễu ngoài. Phương pháp điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy đề xuất, trong đó chỉ cần cập nhật một tham số duy nhất theo thời gian nhằm không cần đến thiết kế một công cụ để ước lượng cho các tham số chưa biết và nhiễu. Tính ổn định của hệ thống được đảm bảo thông qua phân tích Lyapunov. Kết quả cho thấy sai số, cũng như ước lượng nhiễu. Bộ điều khiển được phân tích và chứng minh ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov. Sai số quỹ đạo chuyển động của xe con và tất cả các tham số trong vòng điều khiển kín hội tụ về không và bị chặn. Cuối cùng,

cáp. Trong [6] đề xuất thiết kế bộ điều khiển dự báo dựa trên Lyapunov, bộ điều khiển vừa đảm bảo điều khiển bám quỹ đạo của xe con, vừa đảm bảo giới hạn của các đầu vào cũng như đầu ra của hệ thống cầu trục con lắc đôi.

Ngoài ra, để đối phó với ảnh hưởng của nhiễu ngoài, các phương pháp quan sát nhiễu đã được đưa ra, như trong [7] bộ điều khiển bền vững để định vị xe đẩy và ổn định tải trọng được thiết kế trên cơ sở ước tính nhiễu tổng dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng. Bộ điều khiển được đề xuất [8] bao gồm một bộ điều khiển đạo hàm tỷ lệ, một bộ quan sát nhiễu và một thành phần bù bao gồm một hàm ghép. Thiết kế hợp lý của hàm ghép cho phép làm giảm độ lớn của góc lắc, trong khi bộ quan sát nhiễu cho phép giảm tác động của nhiễu bên trong và bên ngoài.

Các bộ điều khiển phía trên được thiết kế dựa trên mô hình hệ thống, điều này yêu cầu một mô hình chính xác với các tham số rõ ràng. Tuy nhiên, đối với hệ thống cầu trục, tính phi tuyến mạnh mẽ của nó làm cho việc xác định mô hình và các tham số trở nên khó khăn và không hoàn toàn chính xác.

Để giải quyết vấn đề tham số bất định của hệ thống cầu trục, đã có một số nghiên cứu cho vấn đề này. Bộ điều khiển PD kết hợp sử dụng mạng nơ ron hàm cơ sở hướng tâm [9][10], những bất định của hệ thống cầu trục có thể được bù một cách hiệu quả. Bộ định hình thời gian thực được thiết kế bằng sử dụng mạng nơ ron nhân tạo được đào tạo bằng phương pháp tối ưu hóa bầy đàn [11]. Kỹ thuật đề xuất được cập nhật trực tiếp các tham số của bộ định hình theo thời gian thực để xử lý các tác động của các tham số thay đổi theo thời gian trong quá trình vận hành cần trục với việc nâng tải trọng. Phương pháp điều khiển trượt phân cấp thích nghi dựa trên mạng nơ ron hàm cơ sở hướng tâm (NNRBF) trong [12], đã xấp xỉ mô hình động lực học bất định. Bộ điều khiển đảm bảo độ rung lắc tải trọng nhỏ và sai số vị trí tiệm cận về không. Dựa trên mô hình mờ Takagi-Sugeno và bất đẳng thức ma trận tuyến tính [13] phát triển điều khiển chống rung lắc và điều khiển vị trí hệ thống cầu trục. Trong [14] đề xuất bộ điều khiển mạng nơ ron đạo hàm tỉ lệ thích nghi để điều khiển dao động của cầu trục dưới tác động của tải trọng nâng. Trong [15] bằng cách thiết lập các quy tắc mờ, chuyển đổi chế độ trượt được tạo ra một cách thích nghi và quy tắc thích nghi của mạng nơ ron RBF được suy ra thêm để phù hợp với phần động phức tạp và chưa biết của hệ thống cần trục trên cao.

Tất cả các bộ điều khiển thích nghi hay điều khiển thích nghi bền vững ở trên đều cho thấy bộ điều khiển được thiết kế phức tạp, cần có công cụ để ước lượng thành phần bất định, và yêu cầu tài nguyên tính toán lớn. Trong bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy cho hệ thống cầu trục con lắc đơn trong không gian hai chiều, nhằm theo dõi quỹ đạo vị trí và hạn chế góc lắc tải trọng trong quá trình nâng và vận chuyển. Hệ thống điều khiển được thiết kế trong điều kiện các thông số của hệ thống bất định và nhiễu ngoài đáng kể. Với các đặc điểm trên, những đóng góp chính của bài báo này có thể được tóm tắt như sau:

- Khi hệ thống cầu trục gặp phải các tham số không xác định và bị ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài, các phương pháp như bộ quan sát để ước lượng nhiễu hoặc các công cụ tiên tiến như mạng nơ-ron, logic mờ, v.v., thường được áp dụng để ước lượng các thành phần bất định. Để giải quyết đồng thời cả hai vấn đề: bất định và nhiễu ngoài, sơ đồ điều khiển không đệ quy mới cùng với bộ ước lượng một tham số được thiết kế cho các hệ thống cầu trục con lắc đơn mà không cần đến thiết kế

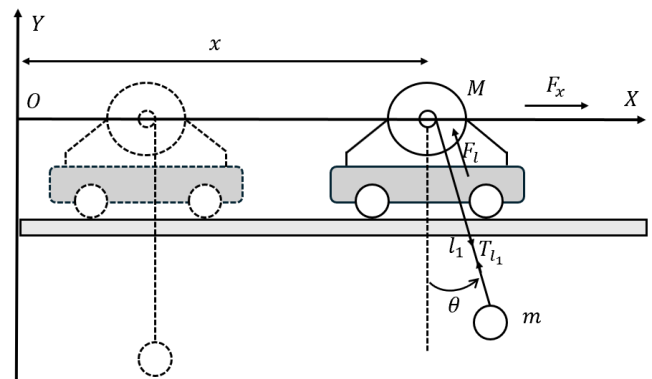
công cụ để ước lượng các tham số bất định của mô hình, ước lượng nhiễu.

- Trong hệ thống có nhiều tham số bất định, chịu tác động của nhiễu, nhưng chỉ cần ước lượng một tham số cần thiết. Do đó tài nguyên tính toán được tiết kiệm.

Phần còn lại của bài viết bao gồm 5 phần. Mô hình động lực học của hệ thống được trình bày trong Phần 2. Bộ điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy và phân tích ổn định cho hệ thống cầu trục con lắc đơn được thiết kế trong Phần 3. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Phần 4 để chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Cuối cùng, Phần 5 kết luận lại kết quả nghiên cứu của bài viết.

2. Mô hình hệ thống cầu trục con lắc 2D

Hệ thống cầu trục thiếu cơ cấu chấp hành được xem xét trong không gian 2 chiều (trong mặt phẳng tọa độ XOY), được mô tả như Hình 1. Xe đẩy được chuyển động theo trục x, với chiều dài của dây cáp được thay đổi để nâng/hạ tải. Giả thiết dây treo có khối lượng không đáng kể và không bị dãn. Trong quá trình tải trọng được vận chuyển và nâng/hạ, tải trọng bị lắc một góc θ



Hình 1: Cấu trúc hệ cầu trục được biểu diễn trong mặt phẳng hai chiều

Các ký hiệu trong Hình 1 được định nghĩa như sau: M là khối lượng của xe con; m là khối lượng của tải trọng; l_1 là chiều dài của cáp, có thể thay đổi để nâng hạ tải trọng; g là gia tốc trọng trường; $x(t)$ và $\theta(t)$ mô tả vị trí chuyển động của xe con và góc dao động của tải trọng khi vận chuyển; F_x, F_l lần lượt tác động lên xe con và tải trọng, đóng vai trò là đầu vào của hệ thống. Mục tiêu điều khiển là đưa tải trọng đến vị trí yêu cầu trong khi hạn chế tối đa dao động phát sinh trong quá trình di chuyển.

Động lực học của hệ thống được thiết lập thông qua phương pháp Euler-Lagrange như trình bày dưới đây [6]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{D} = \mathbf{F} \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{q} = [x, l_1, \theta]^T$ là véc tơ vị trí; $\mathbf{F} = [F_x, F_l, 0]^T$ biểu thị cho véc tơ lực tác dụng lên toàn hệ thống; $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ là ma trận quán tính có kích thước 3×3 ; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận ly tâm và giảm chấn có kích thước là 3×3 ; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ là véc tơ trọng trường có kích thước 3×1 ; $\mathbf{D}$ xác định nhiễu ngoài tác động lên hệ thống có kích thước 3×1 .

Các phần tử trong các ma trận $\mathbf{H}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, và véc tơ $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ như sau:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M + m & m \sin \theta & ml_1 \cos \theta \\ m \sin \theta & m_l + m & 0 \\ ml_1 \cos \theta & 0 & ml_1^2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} b_x & m\dot{\theta} \cos \theta & ml_1 \cos \theta - ml_1 \sin \theta \dot{\theta} \\ 0 & b_l & -ml_1 \dot{\theta} \\ 0 & ml_1 \dot{\theta} & ml_1 \dot{l}_1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ mg(\cos \theta) \\ mgl_1 \sin \theta \end{bmatrix}.$$

b_x, b_l biểu thị ma sát khi xe con di chuyển và nâng tải trọng.

Giả thiết 1: Véc tơ nhiễu $\mathbf{D}$ là liên tục và bị chặn. Do đó tồn tại một hằng số d_1 sao cho $\|\mathbf{D}\| \leq d_1$.

Nhận xét 1: Do bộ truyền động chỉ có thể cung cấp tín hiệu điều khiển trong một giới hạn cho phép cho hệ thống. Do đó $\|\mathbf{F}\| \leq F_{\max}$, trong đó $F_{\max}$ là hằng số dương biểu thị lực tối đa mà bộ truyền động có thể tạo ra.

Nhận xét 2: Các tham số và biến trạng thái của hệ thống bị chặn. Vì vậy ma trận $\mathbf{H}(\mathbf{q})$, các véc tơ $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ và $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ cũng bị chặn.

3. Bộ điều khiển không đệ quy cho hệ thống cầu trục 2D

Hệ thống cầu trục là một hệ thống huyệt cơ cấu chấp hành, với số biến đầu vào nhỏ hơn số biến cần điều khiển. Hệ thống cần điều khiển ba biến đầu ra x , l_1 và θ , trong khi đó chỉ có hai đầu vào điều khiển là F_x và F_l , điều này làm cho hệ thống cầu trục khó điều khiển. Để điều khiển hệ thống cầu trục được thuận lợi hơn, tác giả chia thành biến trạng thái có cơ cấu chấp hành là x và l_1 ($\mathbf{q}_a = [x, l_1]^T$) và biến trạng thái không có cơ cấu chấp hành là $\mathbf{q}_u = \theta$. Phương trình (1) được viết lại dưới dạng hai phương trình động lực học là đủ cơ cấu chấp hành và thiếu cơ cấu chấp hành:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{aa}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{aa}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{au}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u \\ + \mathbf{G}_a(\mathbf{q}) + \mathbf{D}_a = \mathbf{F}_a \end{aligned}$$

$$(2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{ua}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{H}_{uu}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{ua}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{uu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u \\ + \mathbf{G}_u(\mathbf{q}) + \mathbf{D}_u = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Với $\mathbf{H}_{aa}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$; $\mathbf{H}_{au}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} H_{13} \\ H_{23} \end{bmatrix}$ là ma trận quán tính của biến trạng thái đủ cơ cấu chấp hành, biến trạng thái thiếu cơ cấu chấp hành; $\mathbf{C}_{aa}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$,

$\mathbf{C}_{au}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} C_{13} \\ C_{23} \end{bmatrix}$ là ma trận ly tâm và giảm chấn của biến trạng thái đủ cơ cấu chấp hành, biến trạng thái thiếu cơ cấu

chấp hành; $\mathbf{G}_a(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix}$ là véc tơ lực trọng trường;

$\mathbf{D}_a \in R^{2 \times 1}$ xác định véc tơ nhiễu ngoài; $\mathbf{F}_a = [F_x, F_l]^T$ lực tác động trong phương trình động lực học đủ cơ cấu chấp hành (2). Tương tự như vậy, với phương trình động lực học thiếu cơ cấu chấp hành (3), các ma trận và véc tơ:

$$\mathbf{H}_{ua}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} H_{31} & H_{32} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{uu}(\mathbf{q}) = H_{33},$$

$$\mathbf{C}_{ua}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} C_{31} & C_{32} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{uu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = C_{33}, \mathbf{G}_u(\mathbf{q}) = G_{31},$$

$\mathbf{D}_u \in R^{1 \times 1}$ có ý nghĩa tương tự như phương trình (2).

Từ phương trình (3) viết lại dạng phương theo biến trạng thái thiếu cơ cấu chấp hành như sau:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}_u = -\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{ua}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{ua}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a \\ - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{uu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_u(\mathbf{q}) - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{D}_u \\ = \mathbf{f}_u(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (4)$$

Thay phương trình (4) vào phương trình (2), động lực học của hệ thống đủ cơ cấu chấp hành được viết lại theo biến trạng thái có cơ cấu chấp hành như sau:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{q})(\mathbf{F}_a - \mathbf{C}_{1f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{C}_{2f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u) \\ - \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_f(\mathbf{q}) - \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{D}_f = \mathbf{f}_a(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (5)$$

với

$$\mathbf{H}_f(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_{aa}(\mathbf{q}) - \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{ua}(\mathbf{q});$$

$$\mathbf{C}_{1f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_{aa}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{ua}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}});$$

$$\mathbf{C}_{2f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_{au}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{uu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}});$$

$$\mathbf{G}_f(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_a(\mathbf{q}) - \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_u(\mathbf{q});$$

$$\mathbf{D}_f = \mathbf{D}_a - \mathbf{H}_{au}(\mathbf{q})\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{D}_u.$$

Đặt biến trạng thái $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}_u$; $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}_u$; $\mathbf{x}_3 = \mathbf{q}_a$; $\mathbf{x}_4 = \dot{\mathbf{q}}_a$ khi đó động lực học ban đầu của hệ thống cầu trục con lắc đơn có thể được sắp xếp lại thành:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = -\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)(\mathbf{H}_{ua}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)\dot{\mathbf{x}}_4 + \mathbf{C}_{ua}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4)\mathbf{x}_4) \\ \quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)(\mathbf{C}_{uu}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4)\mathbf{x}_3 + \mathbf{G}_u(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)) \\ \quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)\mathbf{D}_u \\ \dot{\mathbf{x}}_3 = \mathbf{x}_4 \\ \dot{\mathbf{x}}_4 = \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)(\mathbf{F}_a - \mathbf{C}_{1f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4)\mathbf{x}_4) \\ \quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)(\mathbf{C}_{2f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4)\mathbf{x}_3 + \mathbf{G}_f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)) \\ \quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3)\mathbf{D}_f \end{cases} \quad (6)$$

Mục tiêu điều khiển của bài viết này là điều khiển chuyển động của xe con theo một quỹ đạo tới vị trí mong muốn $\mathbf{q}_{ad}$ và ngăn chặn sự rung lắc của tải trọng. Các đại lượng trạng thái mô tả hệ thống được biểu diễn theo công thức sau: $\mathbf{x}_{1d} = \mathbf{q}_{ud} = 0$ góc lắc mong muốn của tải trọng;

$\mathbf{x}_{3d} = \mathbf{q}_{ad} = [x_d \quad l_{1d}]^T$: quỹ đạo mong muốn của tải trọng; $\phi_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d}$: sai số của góc lắc; $\phi_2 = \mathbf{x}_2$: tốc độ lắc của tải trọng; $\phi_3 = \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_{3d}$: sai số vị trí của xe con; $\phi_4 = \mathbf{x}_4$: vận tốc chuyển động của xe con; $\mathbf{F}_a$: tín hiệu điều khiển. Hệ phương trình (6) được viết lại theo biến trạng thái mới như sau:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \phi_2 \\ \dot{\phi}_2 = -\mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \left(\mathbf{H}_{ua}(\phi_1, \phi_3) \dot{\phi}_4 + \mathbf{C}_{ua}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_4 \right) \\ \quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \left(\mathbf{C}_{uu}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_3 + \mathbf{G}_u(\phi_1, \phi_3) \right) \\ \quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{D}_u \\ \dot{\phi}_3 = \phi_4 - \dot{\mathbf{x}}_{3d} \\ \dot{\phi}_4 = \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{F}_a - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{C}_{1f}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_4 \\ \quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \left(\mathbf{C}_{2f}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_3 + \mathbf{G}_f(\phi_1, \phi_3) \right) \\ \quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{D}_f \end{cases} \quad (7)$$

Do sự tồn tại của các tham số chưa biết trong ma trận $\mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3)$, (7) được viết lại thành:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{I}_{2 \times 1} \phi_2 + \mathbf{f}_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \dot{\phi}_2 = \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \phi_3 + \mathbf{f}_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \dot{\phi}_3 = \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \phi_4 + \mathbf{f}_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \dot{\phi}_4 = \mathbf{H}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{F}_a + \mathbf{f}_4(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \end{cases} \quad (8)$$

$\mathbf{I}$ là ma trận đơn vị có số hàng và số cột theo chỉ số bên dưới. Các hàm $\mathbf{f}_i(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4)$ ($i=1 \div 4$) được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) &= \left(\mathbf{I}_{1 \times 2} - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{I}_{2 \times 1} \right) \phi_2 \\ \mathbf{f}_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) &= -\mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \phi_3 - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{H}_{ua}(\phi_1, \phi_3) \dot{\phi}_4 \\ &\quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{C}_{ua}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_4 \\ &\quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{C}_{uu}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_3 \\ &\quad - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{G}_u(\phi_1, \phi_3) - \mathbf{H}_{uu}^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{D}_u \\ \mathbf{f}_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) &= \left(\mathbf{I}_{2 \times 2} - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \right) \phi_4 - \dot{\mathbf{x}}_{3d} \\ \mathbf{f}_4(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) &= -\mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{C}_{1f}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_4 \\ &\quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{C}_{2f}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \phi_3 \\ &\quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{G}_f(\phi_1, \phi_3) \\ &\quad - \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{D}_f \end{aligned} \quad (9)$$

Để điều khiển vị trí của xe con bám theo một quỹ đạo đặt cho trước tới vị trí mong muốn, đồng thời ngăn chặn sự rung lắc của tải trọng. Phương pháp thiết kế điều khiển không đề quy đảm bảo hệ thống ổn định toàn cục ngay cả khi hệ thống bất định và chịu tác động của nhiễu ngoài, mà không cần sử dụng các công cụ như: xác định ma trận hồi quy, mạng nơron hay logic mờ, bộ quan sát nhiễu,... để ước lượng tham số bất định, ước lượng nhiễu.

Để thiết kế bộ điều khiển trước hết phép đổi biến được thực hiện như sau:

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\phi_1}{L}; \quad \mathbf{e}_2 = \frac{\phi_2}{L^2}; \quad \mathbf{e}_3 = \frac{\phi_3}{L^3}; \quad \mathbf{e}_4 = \frac{\phi_4}{L^4} \quad (10)$$

trong đó L là tham số thay đổi theo thời gian với điều kiện ban đầu $L(0) = 1$. Từ (10), hệ phương trình (8) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = L \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{I}_{2 \times 1} \mathbf{e}_2 \\ \quad + \frac{1}{L} \mathbf{f}_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) - \frac{\dot{L}}{L} \mathbf{e}_1 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 = L \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{e}_3 \\ \quad + \frac{1}{L^2} \mathbf{f}_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) - 2 \frac{\dot{L}}{L^2} \mathbf{e}_2 \\ \dot{\mathbf{e}}_3 = L \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{e}_4 \\ \quad + \frac{1}{L^3} \mathbf{f}_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) - 3 \frac{\dot{L}}{L^3} \mathbf{e}_3 \\ \dot{\mathbf{e}}_4 = \frac{\mathbf{H}^{-1}(\phi_1, \phi_3)}{L^4} \mathbf{F}_a + \frac{1}{L^4} \mathbf{f}_4(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \quad - 4 \frac{\dot{L}}{L^4} \mathbf{e}_4 \end{cases} \quad (11)$$

Bộ điều khiển cho hệ thống cầu trục con lắc được đề xuất như sau:

$$\mathbf{F}_a = -L^4 \mathbf{K}_1 \phi_1 - L^3 \mathbf{K}_2 \phi_2 - L^2 \mathbf{K}_3 \phi_3 - L \mathbf{K}_4 \phi_4 \quad (12)$$

Với $\mathbf{K}_i$ ($i=1 \div 4$) là ma trận hệ số xác định dương với

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} K_{11} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} K_{21} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} K_{31} & 0 \\ 0 & K_{32} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} K_{41} & 0 \\ 0 & K_{42} \end{bmatrix}; \text{ các hệ số } \mathbf{K}_i \text{ được lựa chọn sao cho ma}$$

trận $\mathbf{A}$ là ma trận Hurwitz, và $\mathbf{P}$ là ma trận đối xứng xác định dương thỏa mãn phương trình Lyapunov: $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I}_{6 \times 6}$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -\mathbf{K}_1 & -\mathbf{K}_2 & -\mathbf{K}_3 & -\mathbf{K}_4 \end{bmatrix}$$

Tham số L thay đổi theo thời gian, được cập nhật với luật cập nhật như sau:

$$\dot{L} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (13)$$

$$\text{với } \mathbf{e} = [\mathbf{e}_1^T, \mathbf{e}_2^T, \mathbf{e}_3^T, \mathbf{e}_4^T]^T$$

Hệ thống vòng kín được thiết lập ổn định, với bộ điều khiển (12), luật cập nhật tham số (13), hệ kín (11) sẽ hội tụ tiệm cận về gốc tọa độ.

Hệ (11) được viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\dot{\mathbf{e}} = L\mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L}\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e} \quad (14)$$

$$\text{với } \boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(1, 2, 3, 3, 4, 4); \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \mathbf{f}_1^T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \frac{1}{L^2} \mathbf{f}_2^T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \frac{1}{L^3} \mathbf{f}_3^T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \\ \frac{1}{L^4} \mathbf{f}_4^T(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} \\ 0 & \mathbf{E}_{22} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \end{bmatrix}$$

$$\text{Với } \mathbf{E}_{11} = \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3) \mathbf{I}_{2 \times 1}; \mathbf{E}_{22} = \mathbf{I}_{1 \times 2} \mathbf{H}_f^{-1}(\phi_1, \phi_3)$$

Hệ thống được phân tích ổn định với hàm ứng viên Lyapunov được đề xuất chọn như sau:

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (15)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov (15) có được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{P}} \mathbf{e} \\ &= \left(L\mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L}\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e} \right)^T \mathbf{P} \mathbf{e} \\ &\quad + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \left(L\mathbf{E}\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) - \frac{\dot{L}}{L}\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e} \right) \\ &= -L\mathbf{e}^T \mathbf{E} \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) - 2\frac{\dot{L}}{L} \mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} \end{aligned} \quad (16)$$

Nhận xét 3: Theo Giả thiết 1, Nhận xét 1, 2 và phương trình (9), tồn tại một hằng dương γ sao cho

$$|\mathbf{f}_i(\cdot)| \leq \gamma_i \sum_{j=1}^i |\phi_j|, \quad j \in N_{1:4}$$

Do $\dot{L} = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \geq 0$ và L có điều kiện đầu $L(0) = 1$ vì vậy tham số thay đổi theo thời gian $L(t) \geq 1$. Theo **Nhận xét 3** và (10) có được:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\mathbf{f}_k(\boldsymbol{\phi}, \phi_3)}{L^k} \right| &\leq \frac{\gamma_k}{L^k} (|\phi_1| + |\phi_k| + \dots) \\ &\leq \gamma_k (|\mathbf{e}_1| + |\mathbf{e}_k|) \\ &\leq \gamma_{\max} (|\mathbf{e}_1| + |\mathbf{e}_2| + \mathbf{I}_{1 \times 2} |\mathbf{e}_3| + \mathbf{I}_{1 \times 2} |\mathbf{e}_4|) \\ &= \gamma_{\max} [1 \quad 1 \quad \mathbf{I}_{1 \times 2} \quad \mathbf{I}_{1 \times 2}] \mathbf{e} \end{aligned} \quad (17)$$

với $k = 1, 2$

$$\begin{aligned} \left| \frac{\mathbf{f}_l(\boldsymbol{\phi}, \phi_3)}{L^l} \right| &\leq \frac{\gamma_l}{L^l} (|\phi_1| + |\phi_2| + \dots + |\phi_l|) \\ &\leq \gamma_l (|\mathbf{e}_1| + |\mathbf{e}_2| + \dots + |\mathbf{e}_l|) \\ &\leq \gamma_{\max} (\mathbf{I}_{2 \times 1} |\mathbf{e}_1| + \mathbf{I}_{2 \times 1} |\mathbf{e}_2| + |\mathbf{e}_3| + |\mathbf{e}_4|) \\ &= \gamma_{\max} [\mathbf{I}_{2 \times 1} \quad \mathbf{I}_{2 \times 1} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2}] \mathbf{e} \end{aligned} \quad (18)$$

với $\gamma_{\max} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$, do đó

$$\begin{aligned} 2\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L) &\leq 2 \|\mathbf{e}^T\| \|\mathbf{P}\| \|\mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}, L)\| \\ &\leq 2 \|\mathbf{e}^T\| \|\mathbf{P}\| \|\mathbf{B}\| \|\mathbf{e}\| \\ &\leq 8\gamma_{\max} \lambda_{\max}(\mathbf{P}) \|\mathbf{e}\|^2 \end{aligned} \quad (19)$$

$\lambda_{\max}(\mathbf{P})$ là giá trị riêng lớn nhất của ma trận $\mathbf{P}$; ma trận

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \mathbf{I}_{1 \times 2} & \mathbf{I}_{1 \times 2} \\ 1 & 1 & \mathbf{I}_{1 \times 2} & \mathbf{I}_{1 \times 2} \\ \mathbf{I}_{2 \times 1} & \mathbf{I}_{2 \times 1} & \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ \mathbf{I}_{2 \times 1} & \mathbf{I}_{2 \times 1} & \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

Nhận xét: Do $\mathbf{P}$ là ma trận đối xứng xác định dương, $\boldsymbol{\Lambda}$ là ma trận đường chéo, do đó $\mathbf{Q} = \mathbf{P}\boldsymbol{\Lambda}$ là ma trận đối xứng xác định dương.

Hơn nữa tham số thay đổi theo thời gian $L(t) \geq 1$. Vì vậy

$$-2\frac{\dot{L}}{L} \mathbf{e}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} \leq -2\frac{\dot{L}}{L} \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{e}\|^2 \leq 0 \quad (20)$$

$\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ là giá trị riêng lớn nhất của ma trận $\mathbf{Q}$. Từ phương trình (19), (20), phương trình (16) được viết lại như sau:

$$\dot{V}, - (LE_{\min} - 8\gamma_{\max} \lambda_{\max}(\mathbf{P})) \|\mathbf{e}\|^2 \quad (21)$$

trong đó $E_{\min} = \min(H_{f_{ij}}^{-1})$.

$L(t)$ là hằng số xác định dương thỏa mãn điều kiện:

$$L(t) \geq \frac{(8\gamma_{\max} \lambda_{\max}(\mathbf{P}) + 1)}{E_{\min}} \quad (22)$$

Do vậy

$$\dot{V} \leq -\mathbf{e}^T \mathbf{e} \leq 0 \quad (23)$$

Từ (15) và (23) suy ra được $\mathbf{e}$ bị chặn và $\mathbf{e} \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

Do đó, $\boldsymbol{\phi} \left(\boldsymbol{\phi} = [\phi_1^T, \phi_2^T, \phi_3^T, \phi_4^T]^T \right)$ cũng bị chặn khi $t \rightarrow \infty$.

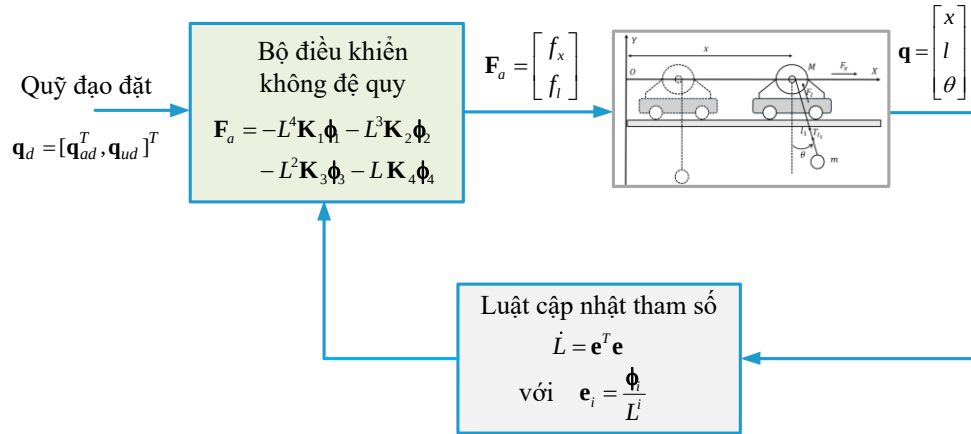
Điều này có nghĩa tất cả các tín hiệu của hệ thống vòng kín là bị chặn và $L(t)$ cũng bị chặn. Do vậy, ta có:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{\phi} = 0 \quad (24)$$

Như vậy bộ điều khiển đảm bảo sai số điều khiển vị trí sẽ hội tụ tiệm cận về không, vận tốc chuyển động của xe con sẽ hội tụ về không khi tải trọng được điều khiển để đạt tới vị trí yêu cầu.

Để minh họa rõ hơn quá trình điều khiển của bộ điều khiển thích nghi không đệ quy và bộ ước lượng tham số cho

hệ thống cầu trục con lắc đơn, sơ đồ khối của bộ điều khiển này được minh họa trong sơ đồ Hình 2.



Hình 2: Sơ đồ khối điều khiển hệ thống cầu trục con lắc đơn.

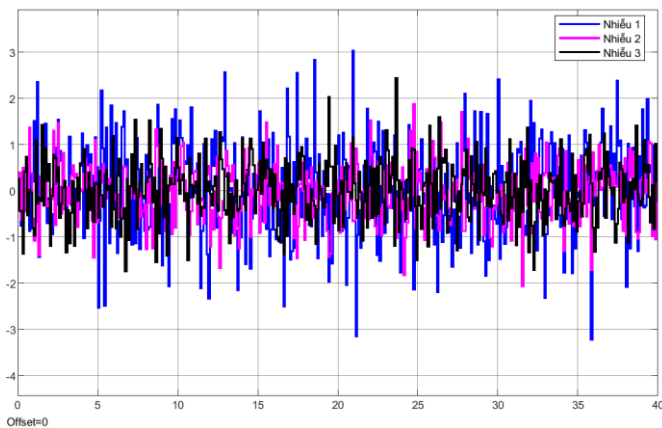
4. Kết quả mô phỏng kiểm chứng

Để kiểm tra tính khả thi của phương pháp điều khiển đã phát triển, tác giả tiến hành triển khai các kịch bản mô phỏng trong mục này. Các tham số của hệ thống được sử dụng trong mô phỏng như sau: $M = 4$ kg; $m_l = 1,5$ kg; $m = 1,7$ kg; $g = 9,81$ m/s²; $b_x = 20$ Nm/s; $b_l = 50$ Nm/s. Vị trí ban đầu của tải $[x_0; l_{10}] = [0; 1,1]$ (m). Quỹ đạo của tải trọng được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} x_d = 1,5 \\ l_{1d} = 1,1 + 1,2 \cdot \text{pimf}(t, [0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40]) \end{cases} \quad (25)$$

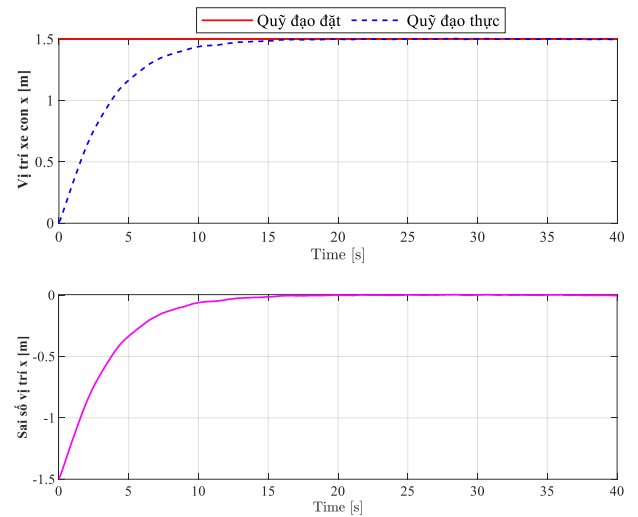
Các tham số điều khiển được chọn như sau: $K_1 = [0, 1; 0]$; $K_2 = [0, 1; 0]$; $K_3 = \text{diag}(20, 1800)$; $K_4 = \text{diag}(90, 10)$; tham số bất định, thay đổi theo thời gian được thiết kế với giá trị ban đầu $L(0) = 1$.

Hai kịch bản mô phỏng được tiến hành để minh họa cho khả năng áp dụng và hiệu quả của phương pháp đã nêu. Trong Kịch bản 1, các tham số mô hình là hằng số nhưng chịu sự tác động của nhiễu ngoài như Hình 3. Trong Kịch bản 2, hệ thống bị ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài như Hình 3 và các tham số hệ thống thay đổi.

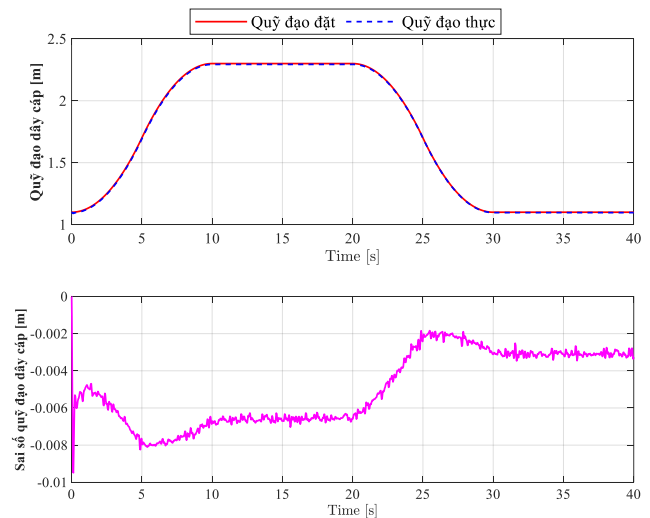


Hình 3: Nhiễu ngoài tác động lên hệ thống

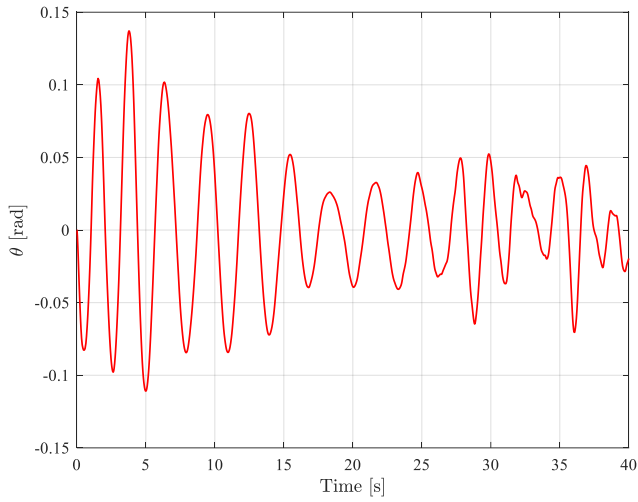
4.1 Kết quả mô phỏng kịch bản 1



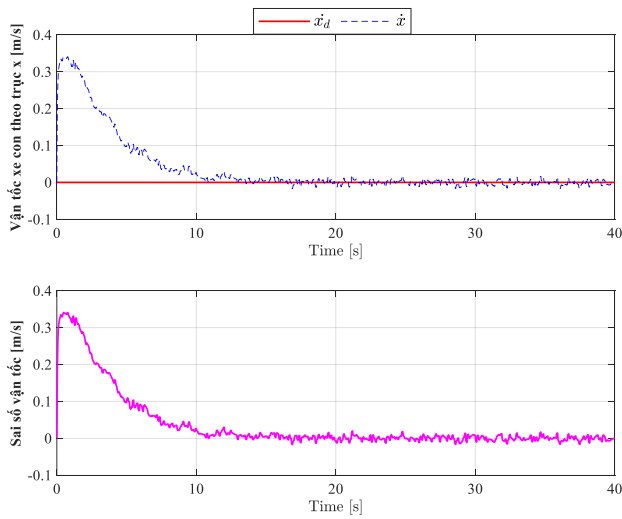
Hình 4: Quỹ đạo chuyển động của xe con theo trục x (kịch bản 1)



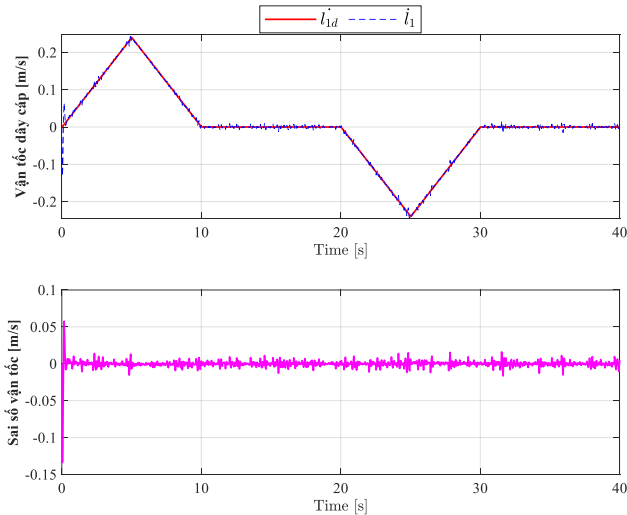
Hình 5: Quỹ đạo chuyển động của dây cáp (kịch bản 1)



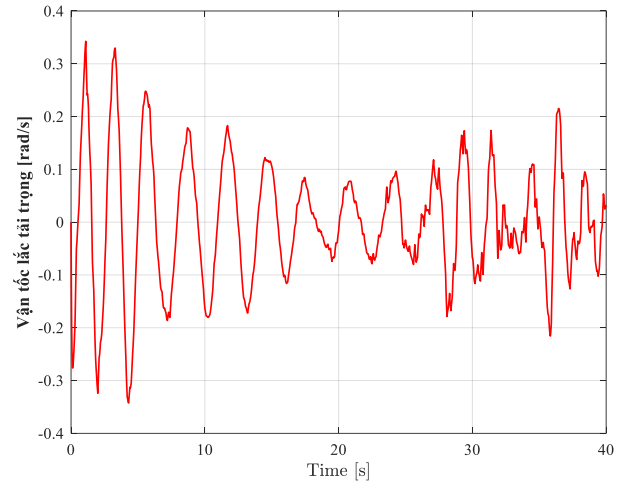
Hình 6: Góc lắc của tải trọng (kịch bản 1)



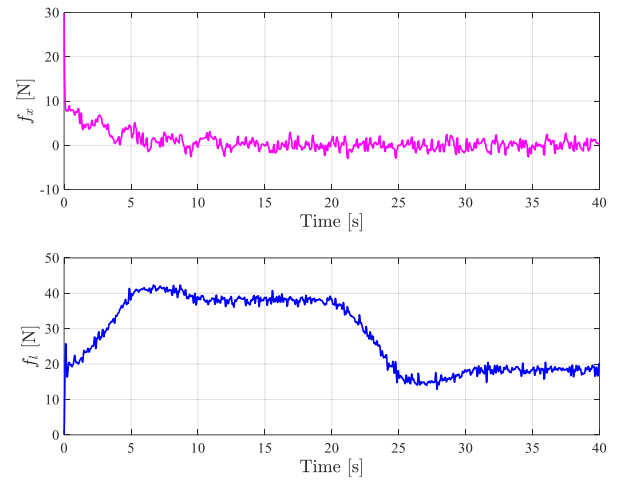
Hình 7: Vận tốc chuyển động theo trục x (kịch bản 1)



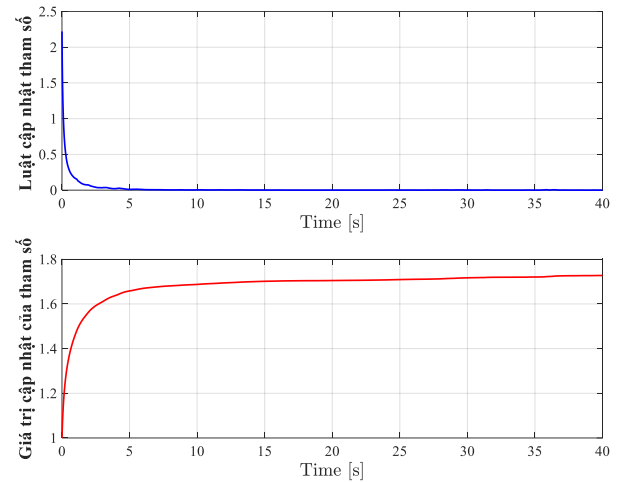
Hình 8: Vận tốc chuyển động của cáp (kịch bản 1)



Hình 9: Vận tốc lắc của tải trọng (kịch bản 1)



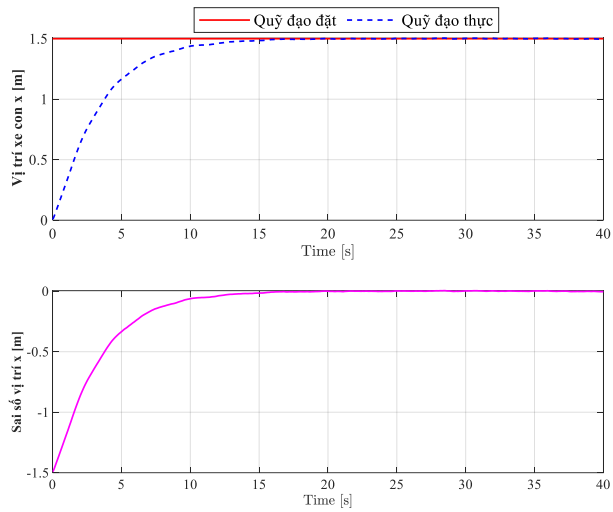
Hình 10: Lực tác động lên xe con (kịch bản 1)



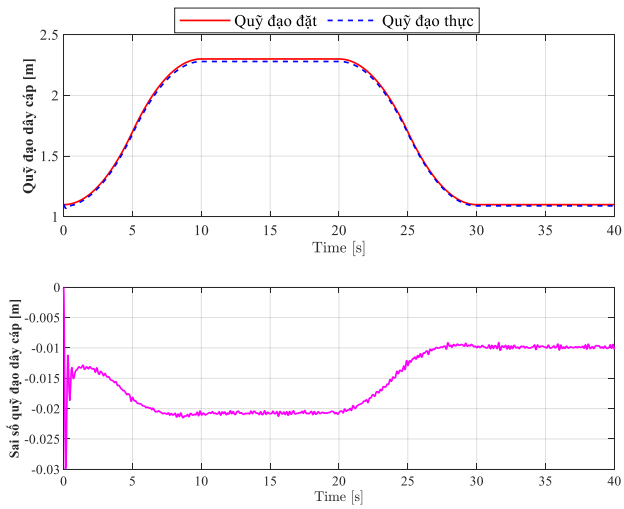
Hình 11: Luật cập nhật và giá trị cập nhật của tham số (kịch bản 1)

4.2 Kết quả mô phỏng kịch bản 2

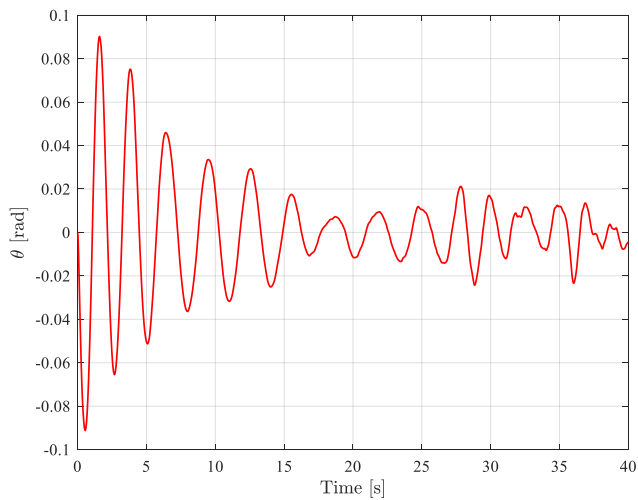
Hệ thống chịu sự tác động của nhiễu ngoài như Hình 3, đồng thời khối lượng của tải trọng thay đổi $m = 5,1 \text{ kg}$.



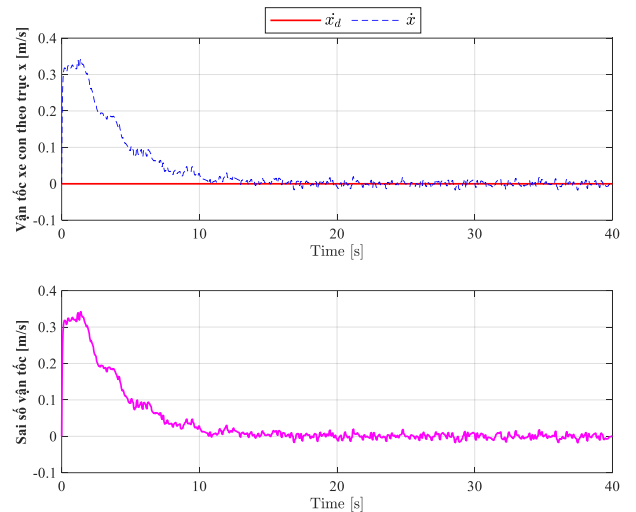
Hình 12: Quỹ đạo chuyển động của xe con theo trục x (kịch bản 2)



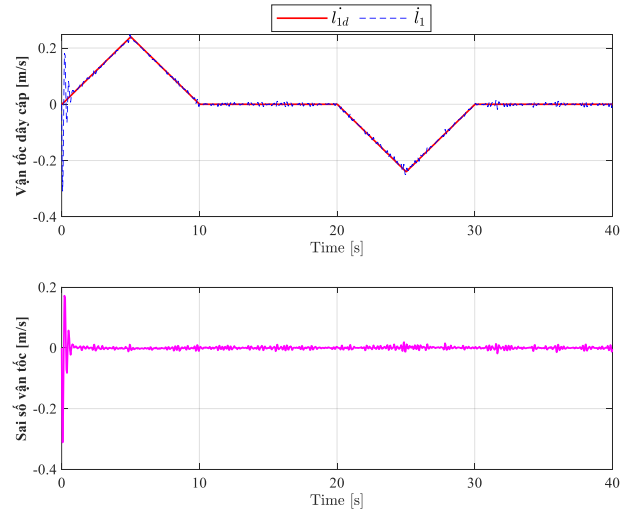
Hình 13: Quỹ đạo chuyển động của dây cáp (kịch bản 2)



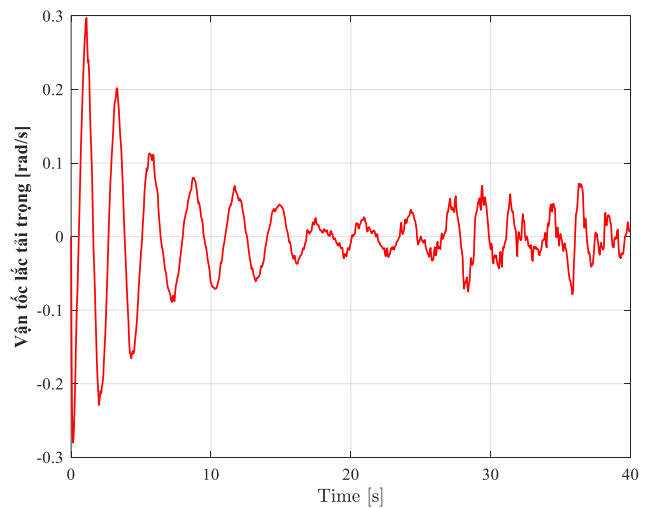
Hình 14: Góc lắc của tải trọng (kịch bản 2)



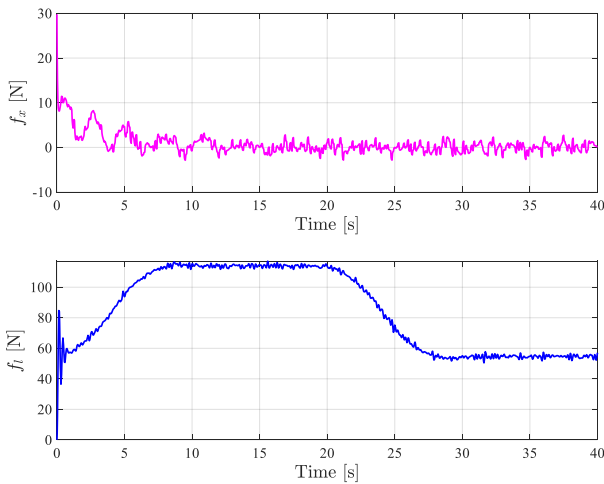
Hình 15: Vận tốc chuyển động theo trục x (kịch bản 2)



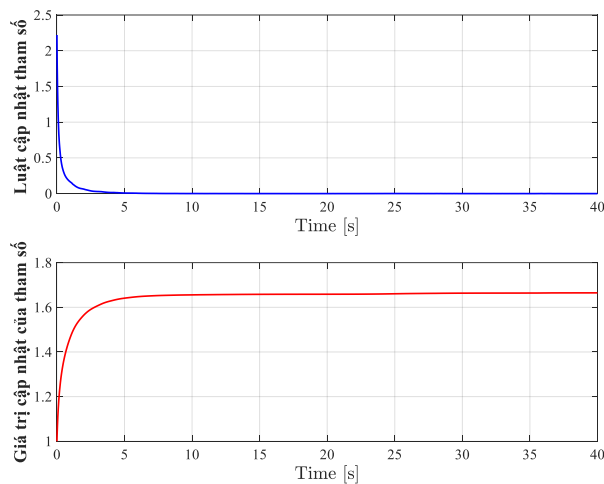
Hình 16: Vận tốc chuyển động của cáp (kịch bản 2)



Hình 17: Vận tốc lắc của tải trọng (kịch bản 2)



Hình 18: Lực tác động lên xe con (kịch bản 2)



Hình 19: Luật cập nhật và giá trị cập nhật của tham số (kịch bản 2)

Từ các kết quả mô phỏng của hai kịch bản, kết quả kịch bản 1 từ Hình 4 đến Hình 11, kết quả kịch bản 2 từ Hình 12 đến Hình 19 cho thấy: Hình 4, Hình 5, Hình 12, Hình 13 thể hiện sự bám quỹ đạo chuyển động vị trí của xe con và hội tụ của sai số quỹ đạo về không. Hình 7 đến Hình 9, Hình 15 đến Hình 17 cho thấy sự hội tụ của quỹ đạo vận tốc, sai số của quỹ đạo vận tốc cũng hội tụ về không. Góc lắc của tải trọng được thể hiện trong Hình 6, Hình 14 có giới hạn trong một khoảng nhỏ $[-0,1; 0,1]$ (rad) ($\approx 6^\circ$). Hình 10 và Hình 18 là tín hiệu lực điều khiển tác động lên xe con, tại vị trí cân bằng lực được hội tụ. Hình 11 và Hình 19 cho thấy luật cập nhật và giá trị cập nhật của tham số thay đổi theo thời gian cũng được hội tụ. Qua các kết quả mô phỏng của cả hai kịch bản thấy được rằng hệ thống cầu trục con lắc đơn trong không gian hai chiều chịu sự tác động của nhiễu ngoài, tham số của hệ thống thay đổi, với bộ điều khiển thích nghi không đệ quy được đề xuất quỹ đạo chuyển động vị trí của xe con bám theo quỹ đạo mong muốn, góc lắc của tải trọng được kiểm soát trong một khoảng nhỏ, các tín hiệu của hệ thống kín đều hội tụ. Như vậy bộ điều khiển hoạt động hiệu quả và khả thi.

5. Kết luận

Bài báo xem xét điều khiển hệ thống cầu trục con lắc đơn trong không gian hai chiều, với chiều dài dây cáp thay đổi, được xét trong điều kiện làm việc chịu tác động lớn từ nhiễu ngoài, cùng với các tham số của hệ thống là bất định. Bộ điều khiển thích nghi bền vững không đệ quy được đề xuất, được thiết kế độc lập với động lực học của hệ thống và bền vững với sự bất định của mô hình và nhiễu ngoài. Bộ điều khiển đơn giản, không cần xem xét tới các công cụ để ước lượng cho các tham số bất định của hệ thống hay ước lượng nhiễu. Thay vào đó một tham số thay đổi theo thời gian được thiết kế với giá trị được cập nhật theo luật cập nhật. Việc này không chỉ giúp giảm thiểu thời gian tính toán cho bộ điều khiển mà còn đơn giản hóa thiết kế, từ đó nâng cao khả năng ứng dụng trong thực tiễn. Bộ điều khiển cũng đảm bảo hoạt động ổn định trong hệ thống vòng kín. Những kết quả mô phỏng thực hiện đã khẳng định tính khả thi và hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Tài liệu tham khảo

- [1] Singhose, William, et al. (2000). *Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes*. Control engineering practice 8.10, 1159-1165. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00054-X)
- [2] Alghanim, Khalid, Abdullah Mohammed, and Masood Taheri Andani (2019). *An input shaping control scheme with application on overhead cranes*. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation 20.5, 561-573. doi:10.1515/ijnsns-2018-0152
- [3] Abdulaziz Alfadhli, Emad Khorshid (2021). *A Smooth Optimized Input Shaping Method for 2D Crane Systems using Bezier Curves*. Transactions of the Institute of Measurement and Control. <https://doi.org/10.1177/01423312219953>
- [4] Le, Tuan Anh, Soon-Geul Lee, and Sang-Chan Moon (2014). *Partial feedback linearization and sliding mode techniques for 2D crane control*. Transactions of the Institute of Measurement and Control. <https://doi.org/10.1177/0142331213492369>
- [5] Tuan, L. A., G. H. Kim, and S. G. Lee (2016). *Design of sliding mode controller for the 2D motion of an overhead crane with varying cable length*. Journal of Mechanism and Machine Theory. doi: 10.18178/joace.4.3.181-188
- [6] Hien, N. T., Mai, H. T., Hue, L. T., Hoa, B. T. K., Nguyen, D. H., & Lam, N. T. (2023). *Advanced Predictive Model Controller Applied to Crane Model with Double Pendulum Effect*. Journal of Measurement, Control, and Automation, 4(3), 73-78. <https://doi.org/10.64032/mca.v4i3.188>
- [7] Van, C. N., Le Xuan, H., Danh, H. N., Tung, L. N., & Luru, H. (2023). *Extended State Observer-inspired Robust Controller for Overhead Crane Payload Tracking and Anti-swinging Problems*. Journal of Measurement, Control, and Automation, 4(3), 47-53. <https://doi.org/10.64032/mca.v4i3.187>
- [8] Miranda-Colorado, Roger (2021). *Robust observer-based anti-swing control of 2D-crane systems with load hoisting-lowering*. Nonlinear Dynamics. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06443-x>
- [9] *Symposium on Neural Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] Vu, Nga Thi-Thuy (2020). *LMI based antistwing adaptive controller for uncertain overhead cranes*. International Journal of Electrical & Computer Engineering. DOI: 10.11591/ijece.v10i6.pp5793-5801
- [11] Ramli, Liyana, Z. Mohamed, and H. I. Jaafar (2018). *A neural network-based input shaping for swing suppression of an overhead crane under payload hoisting and mass variations*. Mechanical Systems and Signal Processing. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.029>
- [12] Le, Hai Xuan, et al (2019). *Adaptive hierarchical sliding mode control using neural network for uncertain 2D overhead crane*. International

- Journal of Dynamics and Control. <https://doi.org/10.1007/s40435-019-00524-x>
- [13] Shao, Xuejuan, et al (2020). *A novel anti-swing and position control method for overhead crane*. Science progress . <https://doi.org/10.1177/0036850419883539>
- [14] Syazwin, Aina, et al (2024). *Swing Control of 2D Overhead Crane Using Proportional Integral Derivative Neural Network*. 2024 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems. DOI: [10.1109/I2CACIS61270.2024.10649823](https://doi.org/10.1109/I2CACIS61270.2024.10649823)
- [15] Li, Shi-Hua, et al (2024). *RBF network dynamic sliding mode robust control for overhead cranes with uncertain parameters*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05021-7>