

Tổng hợp hệ thống điều khiển thích nghi cho một lớp đối tượng phi tuyến có nhiễu bất định

Synthesis of an adaptive control system for a class of nonlinear plants with uncertain disturbances

Ngô Trí Nam Cường^{1*} and Lê Văn Chương²

¹Viện Kỹ thuật điện và Tự động hóa

²Trường Đại học Vinh

*Corresponding author email: ncuong792000@gmail.com

Abstract

This paper presents a method for synthesizing an adaptive control system for a class of nonlinear plants with uncertainty disturbances. With these control plants, we propose an adaptive identified law based on the RBF neural network for the uncertain disturbances component. From the recognition results of uncertain components, the controller for the plant is synthesized based on the sliding mode control principle for the system to track the desired state. The paper's results are rigorously proven by mathematics; the correctness, reliability, and efficiency are confirmed by simulation on Matlab Simulink software. The control system proposed by the article is simple, easy to implement in engineering, has high control quality, and has good adaptability and disturbance resistance. The research results of the paper provide a new approach to designing control systems for nonlinear plants having the impact of uncertainty disturbances commonly encountered in practical applications such as ships, robots, and many other production systems suitable for industry.

Keywords: Adaptive control; Nonlinear plants; Uncertain disturbances; Radial basis function; Sliding mode control.

Các từ viết tắt

AD	Adaptive control
LQR	Linear quadratic regulator
PID	Proportional integral derivative
RBF	Radial basis function
RNN	Recurrent neural network
SMC	Sliding mode control

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp tổng hợp hệ thống điều khiển thích nghi cho một lớp đối tượng phi tuyến có nhiễu bất định. Với lớp đối tượng điều khiển trên, bài báo đề xuất một phương pháp nhận dạng nhiễu bất định trên cơ sở lý thuyết điều khiển thích nghi và mạng nơron RBF. Bộ điều khiển được tổng hợp trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt. Luật điều khiển thu được đảm bảo hệ thống luôn bám chặt theo trạng thái mong muốn. Các kết quả của bài báo được chứng minh chặt chẽ bằng giải tích toán học; tính đúng đắn, độ tin cậy và hiệu quả được minh chứng bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink. Hệ thống điều khiển do bài báo đề xuất đơn giản do đó dễ dàng thực hiện trong kỹ thuật, chất lượng điều khiển cao và khả năng thích nghi, kháng nhiễu tốt. Các kết quả nghiên cứu của bài báo có

thể áp dụng vào việc thiết kế hệ thống điều khiển cho các đối tượng phi tuyến có tác động của nhiễu bất định thường gặp trong các ứng dụng thực tế như tàu thủy, robot và nhiều hệ thống sản xuất khác phù hợp trong công nghiệp.

1. Đặt vấn đề

Trong thực tế hầu hết các đối tượng điều khiển đều tồn tại đặc tính phi tuyến và các thành phần động học bất định, trong nhiều trường hợp có tác động không biết trước của nhiễu từ bên ngoài [1–3]. Chính vì vậy, một trong những yêu cầu quan trọng đối với các hệ thống điều khiển tự động đó là phải ứng phó được với sự tồn tại của những yếu tố bất định của đối tượng và đồng thời duy trì được chất lượng điều khiển cao. Các phương pháp điều khiển truyền thống như PID, LQR, gán điểm cực,... chỉ có thể mang lại hiệu quả khi các yếu tố bất định trong động học đối tượng là không đáng kể, mức độ phi tuyến không lớn. Trong trường hợp đối tượng có đặc tính phi tuyến mạnh, các yếu tố bất định lớn, và/hoặc có nhiễu tác động từ bên ngoài thì việc sử dụng các bộ điều khiển truyền thống sẽ không mang lại hiệu quả mong muốn, thậm chí không đảm bảo tính ổn định. Trong trường hợp này, cần thiết phải sử dụng các công cụ của lý thuyết điều khiển hiện đại mới có thể đáp ứng được những yêu

cầu khẩn khe của các quá trình công nghệ phức tạp. Các nghiên cứu trong những năm gần đây cho thấy phương pháp điều khiển thích nghi, phương pháp điều khiển trượt và phương pháp điều khiển thích nghi trên cơ sở logic mờ hoặc mạng nơron nhân tạo có thể mang lại hiệu quả cho lớp đối tượng phi tuyến có nhiều bất định. Tuy vậy, bên cạnh các kết quả tốt đẹp, các phương pháp này vẫn còn tồn tại một số vấn đề chưa được giải quyết một cách thỏa đáng. Trong các công trình [3,4], thuật toán điều khiển thích nghi còn khá phức tạp với khối lượng tính toán lớn, cùng với đó khi thiết kế các luật điều khiển thích nghi cần có các yêu cầu về giả thiết và thông tin chính xác của hệ thống và môi trường vận hành. Để tổng hợp bộ điều khiển bền vững trên cơ sở điều khiển trượt [5–8] phải biết trước giới hạn của các thành phần bất định, trong nhiều trường hợp không thể trực tiếp xác định được giới hạn này. Bên cạnh đó, hạn chế cơ bản của các bộ điều khiển trượt đó là tồn tại hiện tượng chattering gây ra những bất lợi cho hệ thống. Việc thiết kế luật điều khiển thích nghi mờ [9–12] phụ thuộc vào phân tích hệ thống và tri thức chuyên gia, do vậy việc ứng dụng các bộ điều khiển này vào vùng không có tri thức chuyên gia sẽ gặp nhiều khó khăn. Trong các nghiên cứu [13, 14], thuật toán huấn luyện mạng nơron RNN đòi hỏi khối lượng tính toán lớn, bên cạnh đó thời gian hội tụ của thuật toán còn phụ thuộc vào các yếu tố như các trọng số khởi tạo, các hệ số học,... Luật học của mạng nơron [15] phụ thuộc trực tiếp vào sai số hệ thống do đó quá trình nhận dạng các thành phần bất định trong động học của đối tượng liên tục xảy ra, ngay cả khi các thành phần này không thay đổi và đã được nhận dạng ở thời điểm trước đó. Bên cạnh đó, trong các công trình này luật học của mạng nơron còn khá phức tạp làm cho việc thể hiện kỹ thuật của bộ điều khiển sẽ gặp nhiều khó khăn. Trong bài báo này trình bày phương pháp tổng hợp hệ thống điều khiển thích nghi cho một lớp đối tượng phi tuyến có tác động của nhiễu bất định. Hệ thống điều khiển được tổng hợp trên cơ sở điều khiển thích nghi, mạng nơron RBF và điều khiển trượt, đảm bảo cho hệ thống có chất lượng điều khiển cao, khả năng kháng nhiễu tốt. Trong các phần tiếp theo bài báo lần lượt trình bày các nội dung: phần 2 thực hiện đặt bài toán cho nội dung nghiên cứu và nêu cách tiếp cận; phần 3 trình bày phương pháp tổng hợp luật nhận dạng thích nghi thành phần nhiễu bất định; phần 4 trình bày phương pháp tổng hợp luật điều khiển trượt cho đối tượng; kết quả mô phỏng kiểm chứng được thể hiện ở phần 5 và cuối cùng là phần kết luận.

2. Đặt bài toán

Giả sử động học của đối tượng điều khiển được mô tả bằng hệ phương trình:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u + d(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ là vectơ trạng thái; $u \in \mathbb{R}$ là đầu vào điều khiển; $f(\mathbf{x}) \neq 0$, $b(\mathbf{x}) \neq 0$ là các hàm phi tuyến đã biết; $d(\mathbf{x})$ là thành phần nhiễu bất định và bị chặn $|d(\mathbf{x})| < d_{\max}$.

Vấn đề đặt ra là phải tổng hợp được hệ thống điều khiển có chất lượng điều khiển cao, khả năng thích nghi và kháng nhiễu tốt cho đối tượng (1).

Không mất tính tổng quát, ta phân tích nhiễu $d(\mathbf{x})$ thành các thành phần:

$$d(\mathbf{x}) = -a_1x_1 - a_2x_2 - \dots - a_nx_n + d^*(\mathbf{x}), \quad (2)$$

với $d^*(\mathbf{x})$ là thành phần bất định; các hệ số a_1, a_2, \dots, a_n được chọn sao cho đa thức $p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1$ là Hurwitz. Thay (2) vào (1) ta được:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = -a_1x_1 - a_2x_2 - \dots - a_nx_n + f(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u + d^*(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3)$$

Hệ phương trình (3) được viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})u + \mathbf{d}^*(\mathbf{x}), \quad (4)$$

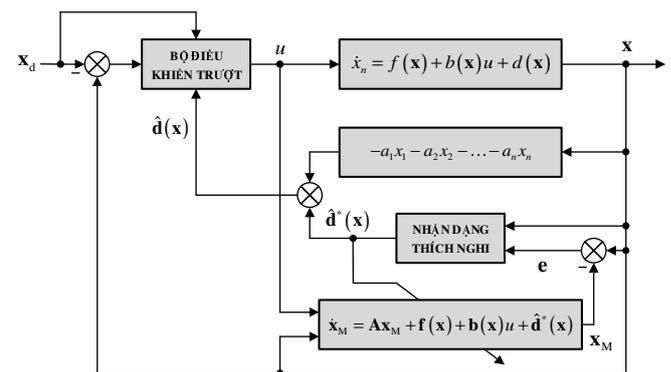
trong đó:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_1 & -a_2 & \dots & a_n \end{bmatrix}_{n \times n}; \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f(\mathbf{x}) \end{bmatrix}_{n \times 1};$$

$$\mathbf{b}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b(\mathbf{x}) \end{bmatrix}_{n \times 1}; \mathbf{d}^*(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ d^*(\mathbf{x}) \end{bmatrix}_{n \times 1}.$$

Từ phương trình (4), bài báo đề xuất phương pháp tổng hợp hệ thống điều khiển cho đối tượng (1) như sau: Tổng hợp luật nhận dạng thích nghi thành phần bất định $d^*(\mathbf{x})$ trên cơ sở mạng nơron RBF; kết quả nhận dạng $\hat{d}^*(\mathbf{x})$ được đưa tới (2) để xác định thành phần nhiễu $d(\mathbf{x})$ và từ đó tổng hợp bộ điều khiển cho đối tượng (1) trên cơ sở điều khiển trượt.

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển cho đối tượng (1) được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển cho lớp đối tượng phi tuyến có nhiễu bất định (1).

Trong các phần tiếp theo, bài báo lần lượt giải quyết các vấn đề theo cách tiếp cận nói trên.

3. Tổng hợp luật nhận dạng thích nghi

Mô hình nhận dạng thành phần bất định $d^*(\mathbf{x})$ trong phương trình (4) như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{Ax}_M + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})u + \hat{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}), \quad (5)$$

trong đó $\mathbf{x}_M = [x_{M1}, \dots, x_{Mn}]^T$ là vectơ trạng thái của mô hình; $\hat{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}) = [0, \dots, \hat{d}^*(\mathbf{x})]^T$ là vectơ nhận dạng của $\mathbf{d}^*(\mathbf{x})$. Từ phương trình (4) và phương trình (5) ta có phương trình sai lệch:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}), \quad (6)$$

trong đó

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M, \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}) = \mathbf{d}^*(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}). \quad (8)$$

Thành phần nhiễu $\mathbf{d}^*(\mathbf{x})$ được nhận dạng bằng mạng nơron RBF. Ta biểu diễn $\mathbf{d}^*(\mathbf{x})$ thông qua hàm cơ sở $\Psi_i(\mathbf{x})$ và các trọng số lý tưởng w_i^* như sau:

$$d^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m w_i^* \Psi_i(\mathbf{x}); \quad (9)$$

$w_i^* = \text{const}$, $i = \overline{1, m}$ với m là số lượng hàm cơ sở. Hàm cơ sở được chọn dưới dạng [1]:

$$\Psi_i(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \bar{\mathbf{c}}_i\|^2}{2\sigma_i}\right); \quad (10)$$

trong đó $\bar{\mathbf{c}}_i$ và σ_i lần lượt là tâm và độ trải rộng của hàm cơ sở thứ i .

Thành phần nhận dạng $\hat{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x})$ của $\mathbf{d}^*(\mathbf{x})$ được biểu diễn thông qua hàm cơ sở (10) với trọng số hiệu chỉnh \hat{w}_i :

$$\hat{d}^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \hat{w}_i \Psi_i(\mathbf{x}). \quad (11)$$

Quá trình nhận dạng chính là quá trình hiệu chỉnh \hat{w}_i so với w_i^* :

$$\tilde{w}_i = w_i^* - \hat{w}_i \quad (12)$$

Quá trình nhận dạng sẽ hội tụ khi $\tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}) \rightarrow 0$, $\hat{d}^*(\mathbf{x}) \rightarrow d^*(\mathbf{x}) \Leftrightarrow \tilde{w}_i \rightarrow 0$, $\mathbf{e} \rightarrow 0$, có nghĩa là hệ (6) ổn định.

Thuật toán nhận dạng thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$ được bài báo đề xuất ở định lý sau:

Định lý: Thuật toán nhận dạng thích nghi thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$ trong đối tượng (1):

$$\hat{d}(\mathbf{x}) = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dots - a_n x_n + \sum_{i=0}^m \hat{w}_i \Psi_i(\mathbf{x}); \quad (13)$$

với luật cập nhật trọng số:

$$\dot{\hat{w}}_i = \mathbf{P}_n \mathbf{e} \Psi_i(\mathbf{x}); \quad (14)$$

\mathbf{P}_n là ma trận hàng thứ n của ma trận đối xứng xác định dương \mathbf{P} ; a_1, a_2, \dots, a_n là các hệ số chọn, sao cho đa thức $p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1$ là Hurwitz.

Chứng minh:

Đối với hệ (6) ta chọn hàm Lyapunov dưới dạng:

$$V_1 = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \sum_{i=0}^m \tilde{w}_i^2. \quad (15)$$

trong đó \mathbf{P} là ma trận đối xứng xác định dương có kích thước $n \times n$.

Lấy đạo hàm hai vế (15) ta được:

$$\dot{V}_1 = \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{e}} + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i. \quad (16)$$

Tiếp tục thay (6) vào (16):

$$\dot{V}_1 = (\mathbf{e}^T \mathbf{A}^T + \tilde{\mathbf{d}}^{*T}) \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} (\mathbf{A} \mathbf{e} + \tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x})) + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i. \quad (17)$$

Biến đổi (17) ta có:

$$\dot{V}_1 = \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} + 2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}) + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i \quad (18)$$

Hệ (6) sẽ ổn định nếu $\dot{V}_1 < 0$. Từ (18) ta rút điều kiện để $\dot{V}_1 < 0$ như sau:

$$\mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} < 0; \quad (19)$$

$$2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{d}}^*(\mathbf{x}) + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i = 0. \quad (20)$$

Quay lại bất phương trình (19), vì \mathbf{A} là ma trận Hurwitz nên:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}; \quad (21)$$

với \mathbf{Q} là ma trận xác định dương.

Thay (21) vào (19) ta có $-\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} < 0$, do vậy (19) luôn thỏa mãn.

Từ (8),(9),(11),(12) và (20) ta có:

$$2 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_{i=0}^m \tilde{w}_i \Psi_i(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i = 0. \quad (22)$$

Giải phương trình (22) ta được:

$$\dot{\tilde{w}}_i = -\mathbf{P}_n \mathbf{e} \Psi_i(\mathbf{x}); \quad (23)$$

trong đó \mathbf{P}_n là ma trận hàng thứ n của ma trận \mathbf{P} .

Lấy đạo hàm hai vế của (12):

$$\dot{\tilde{w}} = \dot{w}^* - \dot{\hat{w}}. \quad (24)$$

Thay (24) vào (23), chú ý $w^* = \text{const} \Rightarrow \dot{w}^* = 0$, ta có luật cập nhật trọng số của mạng nơron cho luật nhận dạng $\hat{d}^*(\mathbf{x})$ như sau:

$$\dot{\hat{w}}_i = \mathbf{P}_n \mathbf{e} \Psi_i(\mathbf{x}). \quad (25)$$

Từ các biểu thức (2), (11), (25) được đưa tới (14) và (13) của Định lý biểu diễn luật nhận dạng thích nghi thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$ của (1).

Định lý được chứng minh.

Kết quả nhận dạng thành phần nhiễu $\hat{d}(\mathbf{x})$ của Định lý được sử dụng để tổng hợp bộ điều khiển cho đối tượng (1) được trình bày trong phần tiếp theo.

4. Tổng hợp luật điều khiển

Luật điều khiển cho lớp đối tượng (1) được tổng hợp trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt.

Từ kết quả nhận dạng (13) của $d(\mathbf{x})$ được đưa tới (1), ta viết lại hệ phương trình (1) dưới dạng:

$$\dot{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})u + \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}). \quad (26)$$

với $\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = [x_2, \dots, x_n, f(x)]^T$; $\mathbf{b}(\mathbf{x}) = [0, \dots, b(\mathbf{x})]^T$; $\hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) = [0, \dots, \hat{d}(\mathbf{x})]^T$.

Sai lệch giữa vectơ trạng thái đặt \mathbf{x}_d và vectơ trạng thái \mathbf{x} của đối tượng (1):

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d. \quad (27)$$

Ta chọn mặt trượt [16, 17]:

$$s = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}, \quad (28)$$

trong đó $\mathbf{C} = [c_n, c_{n-1}, \dots, c_1]$ là ma trận tham số mặt trượt được chọn sao đa thức $p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_{n-1} p + c_n$ là Hurwitz.

Đối với mặt trượt (28) ta chọn hàm Lyapunov [16, 17]:

$$V_2 = \frac{1}{2}s^2. \quad (29)$$

Để tồn tại chế độ trượt đòi hỏi phải thỏa mãn điều kiện [17, 18]:

$$\dot{V}_2 = s\dot{s} < 0. \quad (30)$$

Từ biểu thức (30) ta có:

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s). \quad (31)$$

trong đó k là hệ số dương nhỏ. Mặt khác từ (28) ta có:

$$\dot{s} = \mathbf{C}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}. \quad (32)$$

Lấy đạo hàm hai vế (27) và thay vào biểu thức (32) ta được:

$$\mathbf{C}(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d) = -k \operatorname{sgn}(s). \quad (33)$$

Tiếp tục thay (26) vào (33) ta có:

$$\mathbf{C}[\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})u + \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) - \dot{\mathbf{x}}_d] = -k \operatorname{sgn}(s). \quad (34)$$

Từ (34) ta thu được luật điều khiển trượt:

$$u = [\mathbf{C}\mathbf{b}(\mathbf{x})]^{-1} [-\mathbf{C}\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_d - k \operatorname{sgn}(s)]. \quad (35)$$

Để giảm thiểu hiệu ứng chattering do hàm lấy dấu $\operatorname{sgn}(s)$ ta có thể thay thế bằng hàm gần đúng $\operatorname{sgn}(s) \approx \frac{s}{|s| + \alpha}$, với α là hệ số dương nhỏ.

Như vậy, bài báo đã đề xuất Định lý về luật nhận dạng thành phần nhiễu không biết trước và tổng hợp được luật điều khiển trượt cho đối tượng (1). Các biểu thức (13), (14) và (35) cho thấy hệ thống điều khiển do bài báo đề xuất là đơn giản do đó dễ thể hiện kỹ thuật.

Để minh chứng tính đúng đắn, độ tin cậy và hiệu quả của thuật toán điều khiển đã đề xuất, trong phần tiếp theo bài báo thực hiện mô phỏng các kết quả thu được bằng phần mềm Matlab Simulink.

5. Kết quả mô phỏng

Xét mô hình hệ con lắc ngược trên Hình 2 có phương trình động học [16]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u + d(\mathbf{x}) \end{cases}; \quad (36)$$

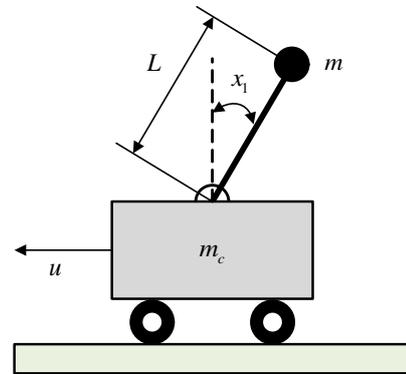
trong đó x_1 là góc giữa con lắc ngược và phương thẳng đứng [rad]; x_2 là vận tốc góc [rad/s]; $m_c = 1.0$ [kg] là khối lượng xe; $m = 0.1$ [kg] là khối lượng của con lắc; $l = 0.5$ [m] là nửa chiều dài của con lắc; $g = 9.81$ [m/s²] là gia tốc trọng trường; u [N] là lực tác động vào xe.

$$f(\mathbf{x}) = \frac{g \sin x_1 - m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1 / (m_c + m)}{l (4/3 - m \cos^2 x_1 / (m_c + m))}; \quad (37)$$

$$b(\mathbf{x}) = \frac{\cos x_1 / (m_c + m)}{l (4/3 - m \cos^2 x_1 / (m_c + m))}; \quad (38)$$

Thành phần nhiễu bất định được giả sử như sau:

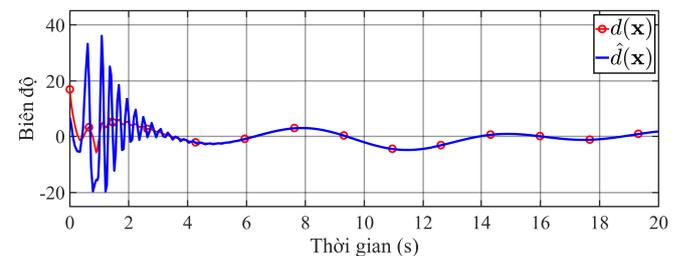
$$\begin{aligned} d(\mathbf{x}) = & +0.8x_1^2 + 0.2 \sin x_2^2 + 0.5 \sin x_1 \cos x_2 + \\ & + 2.2 \sin(t) + 1.5 \sin(0.8t + \pi/3) + \\ & + 1.8 \sin(0.3t + \pi/6). \end{aligned} \quad (39)$$



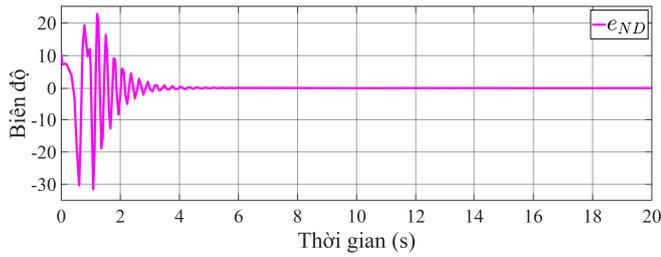
Hình 2. Mô hình hệ con lắc ngược.

Thực hiện mô phỏng hệ thống điều khiển cho con lắc ngược (36) trên phần mềm Matlab Simulink.

Sử dụng thuật toán nhận dạng thích nghi (13), (14) của Định lý, kết quả nhận dạng thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$ và sai số nhận dạng được thể hiện trên Hình 3, Hình 4.



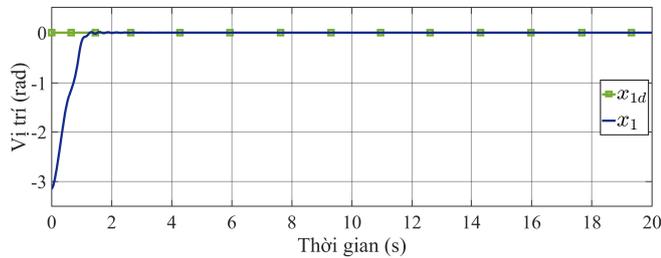
Hình 3. Kết quả nhận dạng thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$.



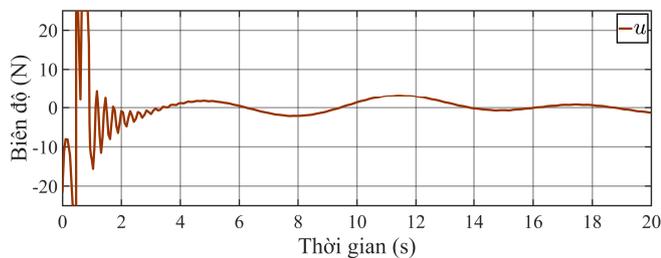
Hình 4. Sai số nhận dạng thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$.

Kết quả trên Hình 3 cho thấy rằng thành phần nhiễu bất định $d(\mathbf{x})$ đã được nhận dạng theo đúng thuật toán đã đề xuất với độ chính xác cao, sai số nhận dạng đã tiệm cận giá trị 0 thể hiện trên Hình 4.

Với vị trí ban đầu của con lắc tại $\mathbf{x}_0 = [-\pi, 0]^T$, thực hiện mô phỏng với vị trí đặt của con lắc tại $x_{1d} = 0$ [rad], kết quả đáp ứng vị trí của con lắc được thể hiện trên Hình 5, tác động điều khiển u (35) thể hiện trên Hình 6.



Hình 5. Đáp ứng vị trí của con lắc (36) so với vị trí đặt $x_{1d} = 0$ [rad].



Hình 6. Luật điều khiển trượt u (35).

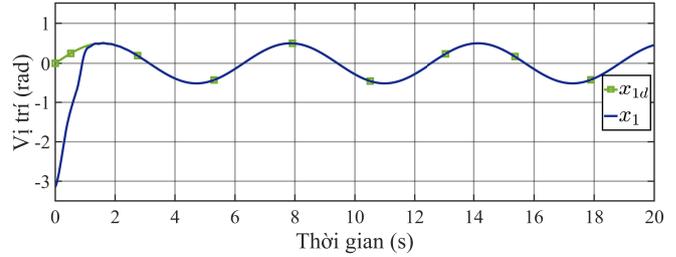
Từ kết quả mô phỏng trên Hình 5 cho thấy vị trí của con lắc x_1 đã nhanh chóng tiến tới vị trí đặt $x_{1d} = 0$ [rad] với hiện tượng chattering trong luật điều khiển trượt được giảm xuống mức tối thiểu thể hiện trên Hình 6.

Tiếp tục mô phỏng với vị trí đặt của con lắc [16]:

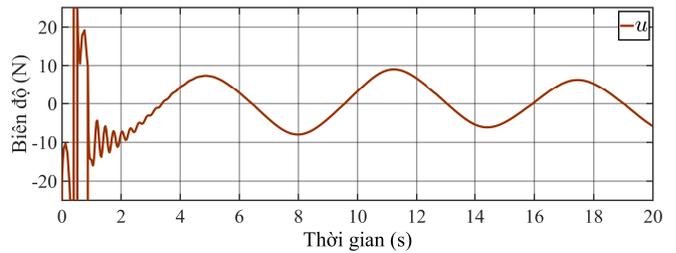
$$x_{1d} = 0.1 \sin(t) \text{ [rad]}.$$

Kết quả bám vị trí đặt của hệ (36) thể hiện trên Hình 7, tác động điều khiển u (35) thể hiện trên Hình 8.

Các kết quả mô phỏng trên Hình 7 cho thấy rằng với tác động điều khiển u (35) do bài báo đề xuất vị trí của con lắc x_1 đã nhanh chóng bám chặt theo quỹ đạo vị trí đặt $x_{1d} = 0.1 \sin(t)$ [rad], cùng với đó Hình 8 cho thấy hiện tượng chattering của luật điều khiển trượt (35) vẫn là không đáng kể. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink cho đối tượng con lắc ngược (36) một lần nữa đã minh chứng tính đúng đắn, độ tin cậy và hiệu quả của phương pháp tổng hợp hệ thống điều khiển cho lớp đối tượng phi tuyến có nhiễu bất định (1) do bài báo đã đề xuất.



Hình 7. Đáp ứng vị trí của con lắc (36) so với vị trí đặt $x_{1d} = 0.1 \sin(t)$ [rad].



Hình 8. Luật điều khiển trượt u (35).

6. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp được luật điều khiển thích nghi cho một lớp đối tượng phi tuyến có nhiễu bất định (1). Đã đề xuất và chứng minh được Định lý về luật nhận dạng thành phần nhiễu bất định. Từ kết quả nhận dạng, luật điều khiển cho lớp hệ (1) được tổng hợp trên cơ sở điều khiển trượt với hiện tượng chattering được giảm xuống tối thiểu. Các thuật toán điều khiển thu được đơn giản, do đó dễ dàng thực hiện trong kỹ thuật. Hệ thống điều khiển bài báo đề xuất có chất lượng điều khiển cao, khả năng thích nghi và kháng nhiễu tốt. Kết quả mô phỏng một lần nữa đã minh chứng tính đúng đắn và hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ngô Trí Nam Cường, Lê Văn Chương (2021), "Tổng hợp hệ điều khiển thích nghi cho một lớp đối tượng phi tuyến có tham số thay đổi trong dải rộng", *Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*, số. 73, tr. 40-47.
- [2] Cuong, N. T. N., Chuong, L. V., Anh, M. T. (2022), "Robust Adaptive Controller for a Class of Uncertain Nonlinear Systems with Disturbances", *In Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the ICNDA 2022*, Springer International Publishing, pp. 695-706.
- [3] Slotine, J. J. E., Li, W. (1991), *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [4] Zheng, X., Li, P., Li, H., Ding, D. (2015), "Adaptive backstepping-based NTSM control for unmatched uncertain nonlinear systems", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 557-564.
- [5] Yu, X., Feng, Y., Man, Z. (2020), "Terminal sliding mode control—an overview", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp. 36-52.
- [6] Feng, Y., Yu, X., Han, F. (2013), "On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems", *Automatica*, vol. 49, no. 6, 1715-1722.
- [7] Feng, Y., Han, F., Yu, X. (2014), "Chattering free full-order sliding-mode control", *Automatica*, vol. 50, no. 4, pp. 1310-1314.
- [8] Gambhire, S. J., Kishore, D. R., Londhe, P. S., Pawar, S. N. (2021), "Review of sliding mode based control techniques for control system applications", *International Journal of dynamics and control*, vol. 9, pp. 363-378.
- [9] Zhang, F., Li, Y., Hua, J. (2018), "Direct adaptive fuzzy control of SISO nonlinear systems with input-output nonlinear relationship", *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 20, pp. 1069-1078.
- [10] Wen, S., Chen, M. Z., Zeng, Z., Huang, T., Li, C. (2017), "Adaptive neural-fuzzy sliding-mode fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 8, pp. 2268-2278.

- [11] Rouhani, E., Erfanian, A. (2018), "A finite-time adaptive fuzzy terminal sliding mode control for uncertain nonlinear systems", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, pp. 1938-1950.
- [12] Razzaghian, A., Kardehi Moghaddam, R., Pariz, N. (2022), "Adaptive fuzzy fractional-order fast terminal sliding mode control for a class of uncertain nonlinear systems", *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, vol. 5, no. 1, pp. 77-87.
- [13] Chen, S. B., Beigi, A., Yousefpour, A., Rajaei, F., Jahanshahi, H., Bekiros, S., ... & Chu, Y. (2020), "Recurrent neural network-based robust nonsingular sliding mode control with input saturation for a non-holonomic spherical robot", *IEEE access*, vol. 8, pp. 188441-188453.
- [14] Pérez-Cruz, J. H., Chairez, I., de Jesús Rubio, J., Pacheco, J. (2014), "Identification and control of class of non-linear systems with non-symmetric deadzone using recurrent neural networks", *IET Control Theory & Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 183-192.
- [15] Huang, S. N., Tan, K. K., Lee, T. H. (2001), "A combined PID/adaptive controller for a class of nonlinear systems", *Automatica*, vol. 37, no. 4, pp. 611-618.
- [16] Jinkun Liu (2013), *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*, Springer Venlag.
- [17] Utkin, V. I. (1992), *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [18] Edwards, C., Spurgeon, S. (1998), *Sliding mode control: theory and applications*, Crc Press.