

Nâng cao chất lượng điều khiển chính xác robot hàn tự động có tính đến yếu tố phi tuyến bất định

Trần Đức Chuyên^{1*}, Võ Thu Hà¹, Nguyễn Đức Điền¹, Roãn Văn Hóa¹,
Đỗ Quang Hiệp¹, Vũ Duy Hưng¹, Nguyễn Văn Hải²

¹Khoa Điện, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ Thuật Công nghiệp/Bộ Công Thương;

²Phòng Đào tạo, Trường Cao đẳng Nghề Công nghệ và Nông lâm Phú Thọ.

*Email: tdchuyen@uneti.edu.vn.

Received 04 January 2022; Revised 13 January 2022; Accepted 14 February 2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.77.2022.39-51>

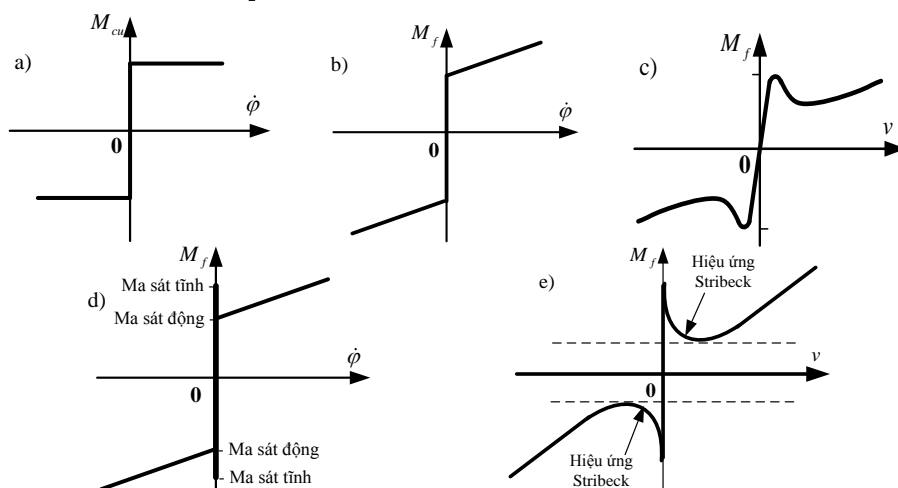
TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi kết hợp với mạng nơ ron RBF và bộ quan sát trạng thái, cho đối tượng robot công nghiệp nói chung và robot hàn nói riêng; khi có tính đến yếu tố phi tuyến bất định: ma sát, đàn hồi, động học của động cơ chấp hành, từ đó nhằm nâng cao chất lượng điều khiển chính xác cho robot.

Từ khóa: Robot hàn; Robot công nghiệp; Điều khiển thích nghi trượt; Mạng nơ ron RBF; Bộ quan sát trạng thái.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhằm nâng cao chất lượng điều khiển chính xác cho robot công nghiệp và robot hàn có kể đến các yếu tố phi tuyến bất định của hệ thống đó là: độ cứng vững, sự biến dạng của hệ, yếu tố đàn hồi, ma sát, khe hở, v.v. các yếu tố bất định của nhiều, của tải và sự thay đổi các tham số khi hệ thống làm việc. Những yếu tố này được đề cập trong các nghiên cứu gần đây và nhiều nhà khoa học trong nước và thế giới quan tâm. Mô hình động học của hệ thống khi xét đến các yếu tố bất định kể trên thường là hệ thống phi tuyến, bậc cao. Hình dạng các lực ma sát, mô men ma sát được chỉ ra trên hình 1 như sau, [1-6]:

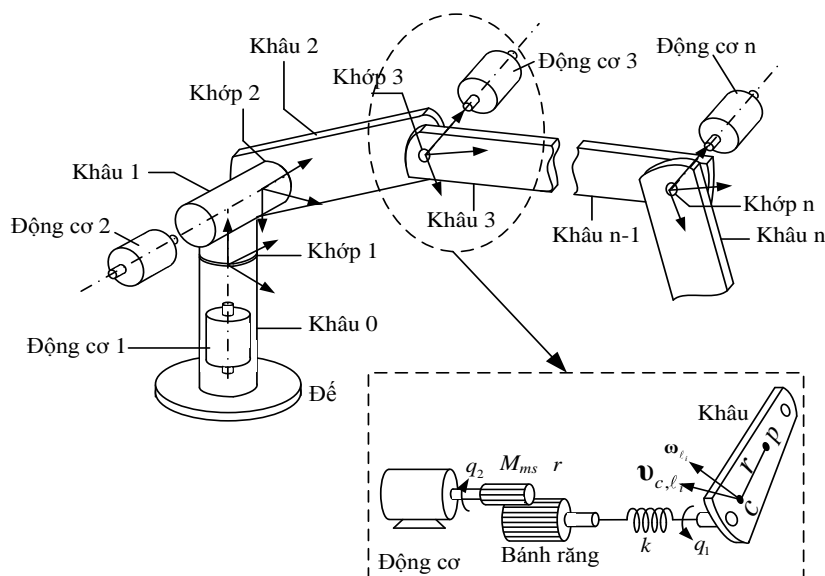


Hình 1. Mô hình mô men ma sát phụ thuộc vào tốc độ: a) Mô men ma sát Coulomb, b) Mô men ma sát Coulomb và ma sát nhớt (viscous), c) Mô hình mô men ma sát Coulomb; d) Mô men ma sát tổng hợp: ma sát Coulomb với ma sát nhớt, e) Mô men ma sát LuGre.

Mỗi một khớp của tay máy robot được gắn với một động cơ truyền động riêng biệt, khi đó, yếu tố ma sát, yếu tố đàn hồi luôn tồn tại ở ô khớp truyền động hình 2. Do đó, việc tổng hợp điều khiển cho hệ thống luôn là vấn đề khó khăn đặc biệt khi xét đến các ảnh hưởng của nhiễu loạn và bất định, trên thế giới đã có nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu [3, 5, 6-8]. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu ở [10, 11, 13, 14] chưa đánh giá đầy đủ các thành phần bất phi tuyến bất

định, hoặc còn phải sử dụng nhiều cảm biến đo và các thuật toán phức tạp, v.v nên vấn đề hoàn thiện nghiên cứu hệ bậc cao có sự đánh giá bù các thành phần phi tuyến bất định và trong điều kiện đo lường hạn chế có ý nghĩa khoa học và tính thời sự.

Trên hình 2, tay máy robot với n khớp đàn hồi và n khâu có độ cứng vững, $q_1 \in R^n$ và biến vị trí động cơ truyền động $q_2 \in R^n$, M_{ms} là thành phần mô men ma sát trên ổ khớp và bộ đổi tốc, các biến dạng đàn hồi của các khâu sẽ không tồn tại, độ đàn hồi tại khớp thứ i được mô hình hóa bởi một lò xo có độ cứng $k_i > 0$, v_{c,ℓ_i} vận tốc tịnh tiến của trọng tâm khâu thứ i ; ω_{ℓ_i} vận tốc góc của khâu thứ i .



Hình 2. Mô hình tổng quát tay máy có xét đến yếu tố đàn hồi.

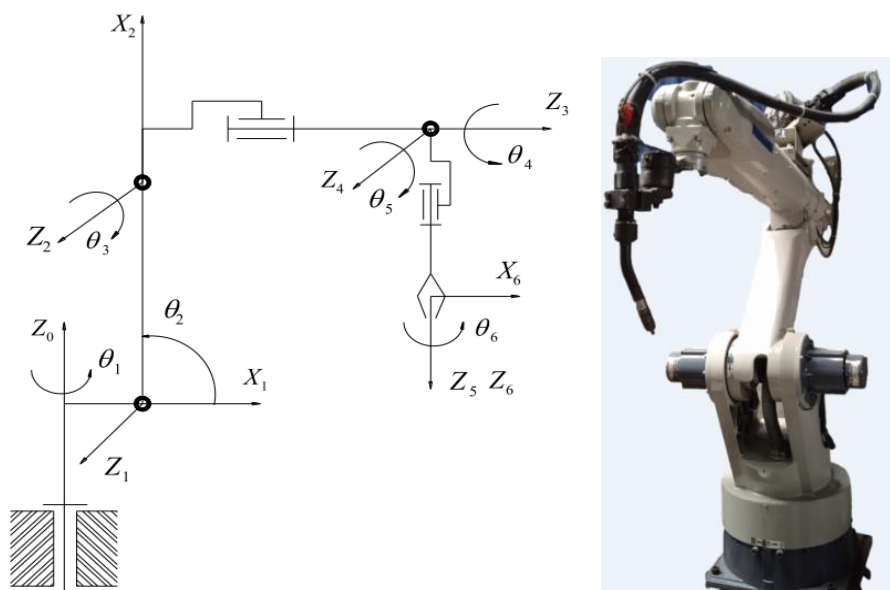
Trên hình 2, tay máy robot với n khớp đàn hồi và n khâu có độ cứng vững, xây dựng phương trình Lagrange sử dụng biến vị trí của khâu $q_1 \in R^n$ và biến vị trí động cơ truyền động $q_2 \in R^n$, M_{ms} là thành phần mô men ma sát trên ổ khớp và bộ đổi tốc, các biến dạng đàn hồi của các khâu sẽ không tồn tại, độ đàn hồi tại khớp thứ i được mô hình hóa bởi một lò xo có độ cứng $k_i > 0$, v_{c,ℓ_i} vận tốc tịnh tiến của trọng tâm khâu thứ i ; ω_{ℓ_i} vận tốc góc của khâu thứ i .

Yếu tố phi tuyến bất định ma sát, đàn hồi, v.v luôn tồn tại ở các ổ khớp của robot công nghiệp. Để giải quyết bài toán điều khiển đối tượng này ta sử dụng phương pháp điều khiển trượt thích nghi có tính đến thành phần phi tuyến này. Đây là một phương pháp điều khiển đơn giản song mang lại chất lượng điều khiển cao và đã được nhiều tác giả áp dụng thành công cho bài toán điều khiển robot [9]-[12]. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi cho đối tượng robot công nghiệp. Luật điều khiển được tổng hợp dựa trên nguyên tắc điều khiển trượt thích nghi, các thành phần phi tuyến được ước lượng bằng bộ quan sát trạng thái, được xấp xỉ bằng bằng mạng nơron RBF xấp xỉ với các trọng số được hiệu chỉnh bằng luật điều khiển thích nghi. Bộ điều khiển được áp dụng cho mô hình tay máy robot hàn sáu bậc tự do, sử dụng phần mềm Matlab Simulink, để mô phỏng và đánh giá chất lượng của bộ điều khiển.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC TAY MÁY ROBOT

Việc xây dựng và thiết lập phương trình động học robot hàn, tiến hành theo trình tự sau: Xác định các hệ tọa độ cố định $(OXYZ)_0$ là hệ tọa độ cơ bản tại điểm O_0 và $(OXYZ)_i$, ($i = 1 \div 6$) là hệ

thống tọa độ liên kết đính kèm thứ i , [2, 6, 8, 14]. Các biến khớp quay của robot là q_i . Khi ta gắn hệ tọa độ với các khâu có vai trò rất quan trọng khi thiết lập các phương trình động học của robot. Trong thực tế các trục nối khớp động của robot thường song song hoặc vuông góc với nhau, tức là rơi vào những trường hợp đặc biệt, nên có thể gây nhầm lẫn. Hơn nữa, việc xác định các hệ tọa độ cần phải phù hợp với ghép biến đổi của ma trận A_i để từ đó ta xác định được bộ thông số động học D-H (Denavit-Hartenberg) của robot. Mô hình động học của robot hàn công nghiệp Panasonic AW 005 với sáu bậc tự do được mô tả trong hình 3.



Hình 3. Vị trí ban đầu của Robot hàn Panasonic AW-005 với 6 bậc tự do.

Các thông số động học theo quy luật D-H, [4, 5, 14] được trình bày trong bảng 1. Dựa trên các thông số động học D-H, các ma trận biến đổi thuần nhất θ_i từ khớp một đến khớp 6 của robot, ($i = 1 \div 6$) có thể được xác định một cách dễ dàng.

Bảng 1. Thông số động học D-H của robot hàn 6 bậc.

Khâu	θ_i^*	d_i	a_i	α_i	Khớp robot
1	θ_1	0	a_1	$\pi/2$	R
2	θ_2	0	a_2	0	R
3	θ_3	0	a_3	$\pi/2$	R
4	θ_4	0	a_4	$-\pi/2$	R
5	θ_5	0	a_5	$\pi/2$	R
6	θ_6	0	0	0	R

Vị trí và hướng của điểm tác động cuối được xác định từ ma trận A_6 liên quan đến một hệ tọa độ cố định như đã đề cập trong [2]. Về chi tiết, ma trận đồng nhất biến đổi của điểm cuối của mô hàn được tính như sau:

$$A_6 = [H_1 H_2 H_3 H_4 H_5 H_6] \tag{1}$$

Ta xác định được $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]$ là vector tọa độ suy rộng từ khớp một đến khớp 6 của robot và $x = (x \ y \ z)^T$ là vector tọa độ điểm tác động của robot hàn. Các phương trình chuyển động của động lực học có thể được xây dựng và thực hiện như sau:

Từ mô hình động học của hệ thống chuyển động robot, trong trường hợp tổng quát robot với n bậc tự do có thể được xây dựng và xác định theo phương pháp tiếp cận Newton - Euler như sau, [2-6], [8]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u \quad (2)$$

trong đó, thành phần $q \in R^n$ là vector tọa độ suy rộng đến các khớp của robot, $M(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận quán tính, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ là ma trận hệ số Coriolis và lực hướng tâm, $G(q) \in R^n$ là thành phần trọng lực, $u \in R^n$ là thành phần mômen sinh ra từ động cơ chấp hành tại ổ khớp.

Trong quá trình điều khiển bài toán đặt ra là thiết kế bộ điều khiển trên cơ sở các phương trình động lực học của robot sao cho đảm bảo các đại lượng đầu ra bám theo giá trị mong muốn cho trước dưới điều kiện có tác động nhiễu từ bên ngoài (các yếu tố phi tuyến bất định) không biết trước. Khi đó, ta có:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) + Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = u_i \quad (3)$$

Với

$$Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)]\ddot{q}_i \right\} + \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j + [C_{ii}(q, \dot{q}) - C_i(q_i, \dot{q}_i)]\dot{q}_i \right\} + [\bar{G}_i(q) - G_i(q_i)] \quad (4)$$

Trong đó,

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = f_i(x_i) + g_i(x_i)u_i(x_i) + h_i(x_i), \\ y_i = x_i \end{cases} \quad (5)$$

trong đó, x_i là trạng thái của hệ thống con thứ i và

$$\begin{aligned} f_i(x_i) &= M_i^{-1}(q_i)[-C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_i(q_i)], \\ g_i(x_i) &= M_i^{-1}(q_i), \\ h_i(x) &= M_i^{-1}(q_i)Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}), \end{aligned} \quad (6)$$

trong đó, $h_i(x)$ là thành phần giới hạn liên kết các khớp, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ là vector trạng thái chứa tham số phi tuyến bất định và nhiễu loạn tác động của BDK đến các khớp của tay máy.

3. NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY ROBOT

Có nhiều cách tiếp cận để giải quyết bài toán trong hệ truyền động điện bám điện cơ với đối tượng robot hàn khi có xét đến các yếu tố phi tuyến bất định. Tuy nhiên, việc nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi cho robot nhằm đảm bảo tính chặt chẽ về toán học, thì khi đó, ta thực hiện luật thích nghi kết hợp bộ quan sát, mạng nơ ron, v.v. để tổng hợp điều khiển.

Ở đây, ta nghiên cứu tính toán mô phỏng với yếu tố ma sát giống như khớp đế của chuyển động robot hàn trên cơ sở thuật toán điều khiển trượt thích nghi khi tính đến yếu tố ma sát của hệ truyền động đã được trình bày kỹ ở tài liệu [12].

3.1. Điều khiển thích nghi trượt khi tính đến yếu tố phi tuyến bất định

Giả sử đối tượng điều khiển là dạng phương trình thể hiện dưới dạng không gian trạng thái hoặc như (2), từ đó ta có thể tổng hợp ngay được tín hiệu điều khiển u_i theo nguyên lý điều khiển trượt [2-4], [7]. Mục tiêu của thiết kế bộ điều khiển trượt là xác định tín hiệu điều khiển sao cho robot bám được quỹ đạo mong muốn, nghĩa là sai lệch $e_i \rightarrow 0$, $\dot{e}_i \rightarrow 0$, trong đó e_i, \dot{e}_i là các giá trị sai số về vị trí và vận tốc, hay nói một cách khác là xác định được tín hiệu điều khiển đảm bảo hệ thống kín luôn chuyển động bám theo mặt trượt được định nghĩa như sau [2]:

$$e_i = x_i - x_{id} \quad (7)$$

với mặt trượt luôn đảm bảo điều kiện bằng 0. Với mặt trượt (7), nhiệm vụ thiết kế là xác định một tín hiệu điều khiển u sao cho khi có tác động làm cho hệ rời khỏi mặt trượt thì tín hiệu điều khiển này lại kéo hệ trở về mặt trượt. Tín hiệu điều khiển trượt được thiết kế dựa trên sự tồn tại hàm Lyapunov (CLF) V_i cho hệ kín trong hệ truyền động robot.

Đối với mặt trượt (7) ta chọn hàm Lyapunov như sau [2-4, 8]:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} e_i^2, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

ta sẽ có được $\dot{V}_i = \dot{V}_{i-1} + e_i \cdot \dot{e}_i$, cụ thể là:

$$\dot{V}_1 = e_1 \cdot \dot{e}_1 = e_1(x_2 - \dot{x}_{1d}) \quad (9)$$

Để tồn tại chế độ trượt trên mặt trượt (7) đòi hỏi phải thỏa mãn điều kiện: $\dot{V}_1 < 0$, $x_2 = -k_1 e_1 + \dot{x}_{1d}$, $k_1 > 0$, khi đó, $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2$.

Để có được $x_2 = -k_1 e_1 + \dot{x}_{1d}$, ta chọn điều khiển ảo như sau:

$$x_{2d} = -k_1 e_1 + \dot{x}_{1d}, \quad (10)$$

Để nhận được $x_2 \rightarrow x_{2d}$, sử dụng định nghĩa sai số (7), ta có $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + e_2 e_1$. Cuối cùng, bằng cách chọn hàm Lyapunov theo (8) ta sẽ nhận được:

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + e_n \dot{e}_n \quad (11)$$

Tính toán và thay thế các biểu thức liên quan và lựa chọn luật điều khiển có dạng sau:

$$u = \frac{1}{b} [-f_{n-1}(x) + x_{nd} - e_{n-1} - k_n \text{sgn}(e_n)] \quad (12)$$

Khi đó, thành phần $\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \dots - k_{n-1} e_{n-1}^2 - k_n |e_n| \leq 0$.

Để có được (12), ta cần có các giá trị $f(x)$, các hàm này là bất định do đó để có được các thông tin cập nhật về bộ điều khiển ta cần phải sử dụng phương pháp đánh giá.

Với mục tiêu là thực thi luật điều khiển (12) cho phương trình không gian trạng thái thì hàm $f(x)$ và b (ma trận hệ số) là yếu tố phi tuyến bất định. Do đó, $f(x)$ có thể xấp xỉ bằng mạng nơron, b được giới hạn $b \geq \xi$ ($\xi > 0$) và b có thể ước lượng bằng luật thích nghi.

Khi đó, bộ điều khiển trượt thích nghi với ước tính thành phần phi tuyến bất định được thực hiện như sau: ta định nghĩa sai số theo (7) và chọn hàm CLF theo (8) ta có:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -k_2 e_1^2 + e_2 e_1 + e_2 (f_1(x) + x_3 - \dot{x}_{2d}) \quad (13)$$

Để nhận được $\dot{V}_2 < 0$, thì ta chọn $x_3 = e_1 - k_2 e_2 - f_1(x) + \dot{x}_{2d}$

$$\dot{V}_2 = -k_2 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad (14)$$

Để nhận được $x_3 = -e_1 - k_2 e_2 - f_1(x) + \dot{x}_{2d}$, chọn điều khiển ảo như sau:

$$x_{3d} = -e_1 - k_2 e_2 - \hat{f}_1(x) + \dot{x}_{2d} \quad (15)$$

Với $\hat{f}_1(x)$ là thành phần ước lượng của $f_1(x)$. Khi đó, để $x_3 \rightarrow x_{3d}$, định nghĩa sai số theo (7), ta chọn hàm CLF theo (8) và chọn thành phần $x_4 = -k_3 e_3 - e_2 - f_2(x) + \dot{x}_{3d}$, $k_3 > 0$

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + e_2 (f_1(x) - \hat{f}_1(x)) \quad (16)$$

Thực hiện các trình tự như trên và cuối cùng ta có thể chọn luật điều khiển có dạng:

$$u = \frac{1}{b} \left[-\hat{f}_{n-1}(x) + \dot{x}_{nd} - e_{n-1} - k_n \operatorname{sgn}(e_n) \right] \quad (17)$$

khi đó, hàm Lyapunov được viết lại như sau:

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \dots - k_n |e_n| + e_2(f_1(x) - \hat{f}_1(x)) + \dots + e_n(f_{n-1}(x) - \hat{f}_{n-1}(x))$$

Nếu $f_1(x) = \hat{f}_1(x), \dots, f_{n-1}(x) = \hat{f}_{n-1}(x)$ thì $\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \dots - k_n |e_n| \leq 0$.

Thực hiện thiết kế luật xấp xỉ yếu tố phi tuyến bất định với sai số nhỏ tùy ý, ứng dụng mạng nơ ron RBF để xấp xỉ hàm phi tuyến nói trên. Từ biểu thức (17) ta sử dụng cấu trúc mạng nơ ron hướng tâm với cấu trúc gồm ba lớp: lớp vào, lớp ra và lớp ẩn, [2, 3, 11].

$$f_i(x) = W_i^T h_j + \varepsilon_i, \quad i, j = 1 \div n-1 \quad (18)$$

Trong đó, x véc tơ đầu vào của mạng nơ ron; i số nơ ron đầu vào của lớp vào; j là số nơ ron lớp ẩn, thành phần $W_i^T, i=1 \div n-1$ là giá trị trọng số mạng nơ ron được cập nhật online, $\|W\|_F \leq W_m$ và $\|\varepsilon_i\| = \|\varepsilon_1 \ \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-1}\|^T < \varepsilon_m$ sai số sấp xỉ, $h_j = [h_1, h_2, \dots, h_n]$ là số đầu ra của lớp ẩn. Khi đó, ta định nghĩa hàm:

$$\hat{f}_i(x) = \hat{W}_i^T h_j \quad (19)$$

Trong đó, \hat{W}_i^T là giá trị trọng số ước lượng. Ta đặt thành phần Z như sau:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & W_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & W_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \hat{Z} = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \hat{W}_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \hat{W}_{n-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Với $\|Z\|_F \leq Z_M$, $\tilde{Z} = Z - \hat{Z}$. Định nghĩa hàm Lyapunov như sau:

$$V = V_n + \frac{1}{2} \operatorname{tr}(\tilde{Z}^T \Gamma^{-1} \tilde{Z}) + \frac{1}{2} \eta \tilde{b}^2 \quad (21)$$

Trong đó: $V_n = \frac{1}{2} \xi^T \xi, \eta > 0$ với $\xi = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ \dots \ e_n]^T$ và $\tilde{b} = b - \hat{b}$.

Với Γ là ma trận xác định dương có kích thước phù hợp, chọn luật thích nghi:

$$\dot{\hat{Z}} = \Gamma h \xi^T - \alpha \Gamma \|\xi\| \hat{Z} \quad (22)$$

Với $h = [0 \ h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{n-1}]^T$, α là một số dương, và $\hat{b}(0) \geq \underline{b}$. Vì phân (21), sau đó tính toán và biến đổi, khi đó ta được:

$$\dot{V} = -\xi^T K_e \xi + \xi^T \varepsilon + \alpha \|\xi\| \operatorname{tr}(\tilde{Z}^T (Z - \tilde{Z})) + \tilde{b}(e_n u - \eta \dot{\hat{b}}) \quad (23)$$

Để đảm bảo $\tilde{b}(e_n u - \eta \dot{\hat{b}}) \leq 0$, đồng thời để tránh điểm kỳ dị trong (17) và đảm bảo $\hat{b} > \underline{b}$, ta có thể xây dựng luật thích nghi cho \hat{b} như sau [2]:

$$\dot{\hat{b}} = \begin{cases} \eta^{-1} e_n u, & \text{if } e_n u > 0 \\ \eta^{-1} e_n u, & \text{if } e_n u \leq 0 \text{ and } \hat{b} > \underline{b} \\ \eta^{-1}, & \text{if } e_n u \leq 0 \text{ and } \hat{b} > \underline{b} \end{cases} \quad (24)$$

Theo bất đẳng thức Schwarz chúng ta có $tr(\tilde{Z}^T(Z - \tilde{Z})) \leq \|\tilde{Z}\|_F \|Z\|_F - \|\tilde{Z}\|_F^2$, khi $K_{\min} \|\xi\|^2 \leq \xi^T K \xi$, K_{\min} là giá trị nhỏ nhất của K. Khi đó, ta có:

$$\dot{V} \leq -K_{\min} \|\xi\|^2 + \varepsilon_N \|\xi\| + \alpha \|\xi\| \left(\|\tilde{Z}\|_F \|Z\|_F - \|\tilde{Z}\|_F^2 \right) + M \leq -\|\xi\| \left(K_{\min} \|\xi\| - \varepsilon_N + \alpha \|\tilde{Z}\|_F \left(\|\tilde{Z}\|_F \right) - Z_M \right) \quad (25)$$

Từ đó, ta có:

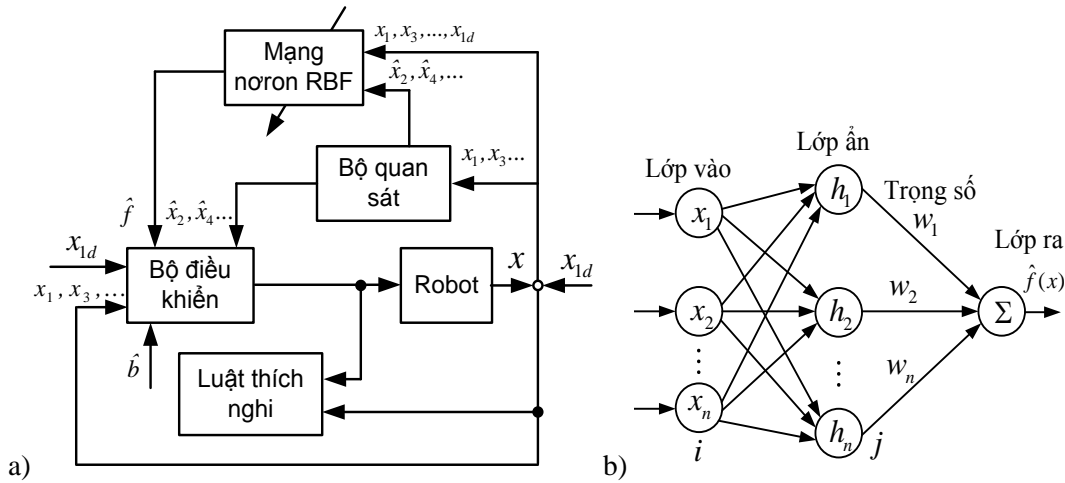
$$K_{\min} \|\xi\| - \varepsilon_N + \alpha \left(\|\tilde{Z}\|_F^2 - \|\tilde{Z}\|_F Z_M \right) = K_{\min} \|\xi\| - \varepsilon_N + \alpha \left(\|\tilde{Z}\| - \frac{1}{2} Z_M \right)^2 - \frac{n}{4} Z_M^2 \quad (26)$$

Điều này nói lên rằng, $\dot{V} < 0$ thỏa mãn với điều kiện:

$$\|\xi\| > \frac{\varepsilon_N + \frac{\alpha}{4} Z_M^2}{K_{\min}} \text{ hoặc } \|\tilde{Z}\|_F > \frac{1}{2} Z_M + \sqrt{\frac{Z_M^2}{4} + \frac{\varepsilon_N}{\alpha}} \quad (27)$$

3.2. Bộ Quan sát trạng thái

Đối với robot hàn công nghiệp, luôn là các phương trình hệ thống bậc cao. Từ phương trình động học điều khiển, được biến đổi đưa về dạng mong muốn để thiết kế bộ ước lượng. Khi đó, việc tổng hợp điều khiển ta cần nhiều thông tin về các biến trạng thái, nếu sử dụng các cảm biến (ở vị trí các khớp của robot hàn) thì sẽ gây cồng kềnh cho hệ thống và làm tăng chi phí sản xuất thiết bị. Vì vậy, để giảm thiểu đo lường có ý nghĩa quan trọng. Giả thiết là, ta chỉ đo được giá trị vị trí của hệ thống, ta cần thiết kế bộ quan sát để ước lượng giá trị vận tốc của chúng. Khi đó, sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trên kết hợp với bộ quan sát trạng thái có dạng như hình 4.



Hình 4. a) Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt thích nghi với mạng nơ ron RBF và bộ quan;
b) Cấu trúc mạng nơ ron xấp xỉ hàm phi tuyến.

Bộ quan sát trạng thái được thiết kế như sau [2, 11]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \frac{a_n}{\varepsilon} (x_1 - \hat{x}_1) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{x}}_n &= \frac{a_1}{\varepsilon^n} (x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (28)$$

Ở đây, x và \hat{x} là giá trị biến trạng thái và ước lượng của chúng, $a_i (i=1,2,\dots,n)$ được chọn như sau $s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1 = 0$ là đa thức Hurwitz.

Phương trình (28) được thỏa mãn với điều kiện sau:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \hat{x}_i = x^{(i-1)}(t), i=1,2,\dots,n \quad (29)$$

Với ε được thiết kế như sau [6]:

$$\frac{1}{\varepsilon} = R = \begin{cases} 100t^3, & 0 \leq t \leq 1 \\ 100, & t > 1 \end{cases} \quad \text{hoặc}$$

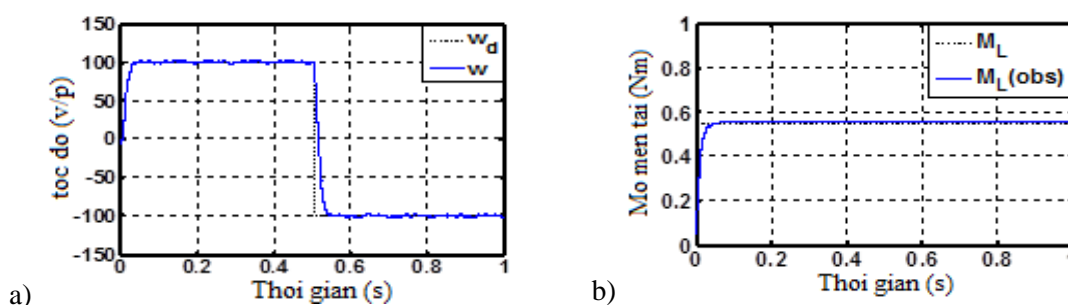
$$\frac{1}{\varepsilon} = R = \begin{cases} \mu \frac{1 - e^{-\lambda_1 t}}{1 + e^{-\lambda_2 t}}, & 0 \leq t \leq t_{\max} \\ \mu, & t > t_{\max} \end{cases}, \text{ Với } \mu, \lambda_1 \text{ và } \lambda_2 \text{ là giá trị dương}$$

Trên cơ sở thuật toán đã xây dựng luật điều khiển thích nghi dùng để huấn luyện mạng RBF là đơn giản và dễ dàng thực hiện kỹ thuật điều khiển này. Độ chính xác của phép xấp xỉ phụ thuộc vào việc lựa chọn các tham số bộ điều khiển sao cho bao phủ được hết dải biên độ của các đại lượng phi tuyến bất định.

4. NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG, ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau khi nghiên cứu tính toán, thuật toán và mô hình hóa hệ thống để điều khiển hệ thống truyền động với các thuật toán được trình bày như trên và như ở [12]. Thông số mô phỏng cho hệ thống bao gồm. Robot hàn Panasonic AW005 có sáu bậc tự do với sáu động cơ servo kích từ nam châm vĩnh cửu: khớp một (khớp đế) động cơ 1,1 kW; tốc độ 3000 vòng/phút; $p = 4$; mô men quán tính $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$; mô men ma sát nhớt 0,0001 N.m.s/rad, khớp hai và khớp ba sử dụng hai động cơ 750 W, khớp bốn sử dụng động cơ 400 W, khớp năm và khớp sáu sử dụng hai động cơ 200 W.

Trường hợp 1: Nghiên cứu tính toán mô phỏng với yếu tố ma sát với khớp đế của chuyển động robot hàn trên cơ sở thuật toán điều khiển tốc độ trượt thích nghi khi tính đến yếu tố ma sát của hệ truyền động đã được trình bày kỹ ở tài liệu [12]. Ở đây, ta nghiên cứu mô phỏng đánh giá khả năng làm việc, phản ứng của hệ thống trong quá trình khởi động và hãm, khi tốc độ thay đổi, mô men tải không đổi. Kết quả như sau:

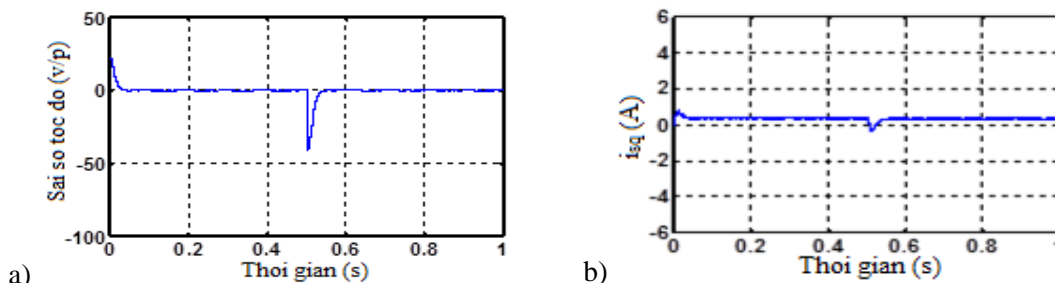


Hình 5. Đáp ứng tốc độ và mô men: a) Tốc độ đặt ω_d và tốc độ thực ω của động cơ;

b) Mô men đặt M_L và mô men ước lượng \hat{M}_L trường hợp 1.

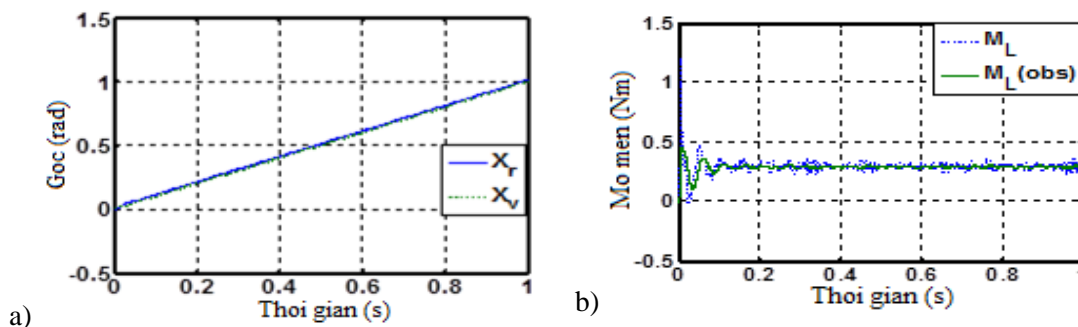
Khi tốc độ đặt ω_d bằng 100 vòng/phút tương ứng với tốc độ đặt 20.9 rad/s với thời gian đạt giá trị cân bằng $t_1 = 0.035 \text{ s}$ đến $t_2 = 0.5 \text{ s}$ thì tốc độ đảo chiều xuống -20.9 rad/s như trên cho thấy, bộ quan sát phụ tải \hat{M}_L làm việc ổn định cung cấp đầy đủ thông tin về phụ tải cho ĐBK, hình 5. Trên hình 6b sai số bám sát thể hiện rõ quá trình thay đổi tốc độ. Đáp ứng dòng điện i_{sq}

mặc dù thay đổi tại thời điểm $t_1 = 0.035$ s và $t_2 = 0.5$ s nhưng vẫn đạt giá trị cân bằng khoảng 0.5 A hình 6a. Có thể thấy, tốc độ ước lượng luôn bám sát giá trị đặt cả ở chế độ thay đổi tốc độ và ở trạng thái làm việc ổn định. Hơn nữa, ở chế độ quá độ, đáp ứng bộ quan sát cũng cho đáp ứng với thời gian khá nhanh.

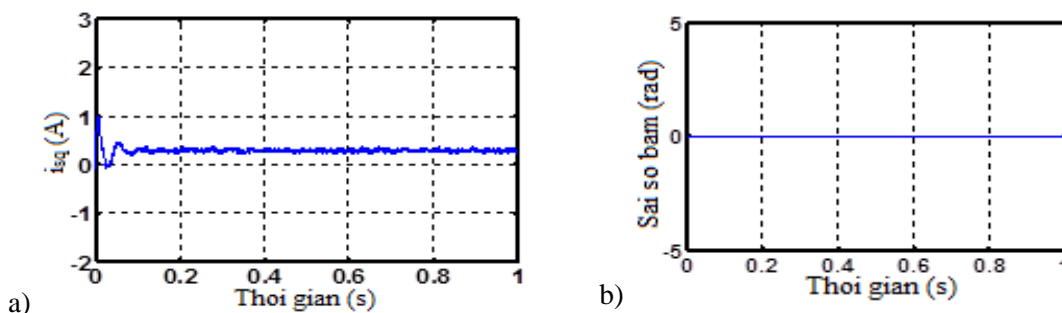


Hình 6. Giá trị sai số và dòng điện: a) Sai số bám sát theo tốc độ; b) Đáp ứng dòng điện i_{sq} trường hợp 1.

Trường hợp 2: Nghiên cứu mô phỏng với bộ điều khiển vị trí (khớp đế) theo BDK tốc độ trượt thích nghi ở vòng trong (với trường hợp 1) có tính đến yếu tố phi tuyến là ma sát. Ở đây nghiên cứu mô phỏng khi phản ứng của hệ thống với vị trí góc đặt vào thay đổi theo quy luật hàm $X_v = V.t$, ($V = 1$ rad/s) mô men tải không đổi bằng 5 Nm.



Hình 7. Đáp ứng vị trí: a) Đáp ứng vào ra theo góc, b) Bộ quan sát mô men tải M_L ; \hat{M}_L trường hợp 2.

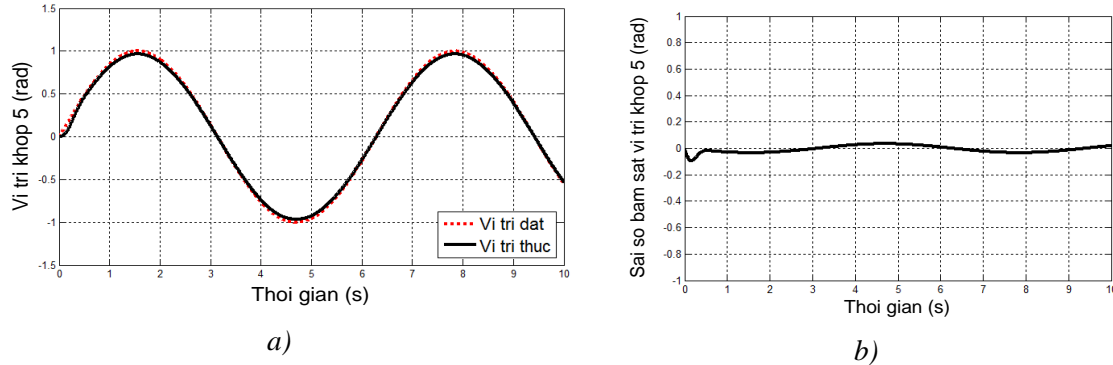


Hình 8. Giá trị dòng điện và sai số: a) Đáp ứng dòng điện BDK vị trí i_{sq} , b) Sai số bám sát theo góc ở trường hợp 2.

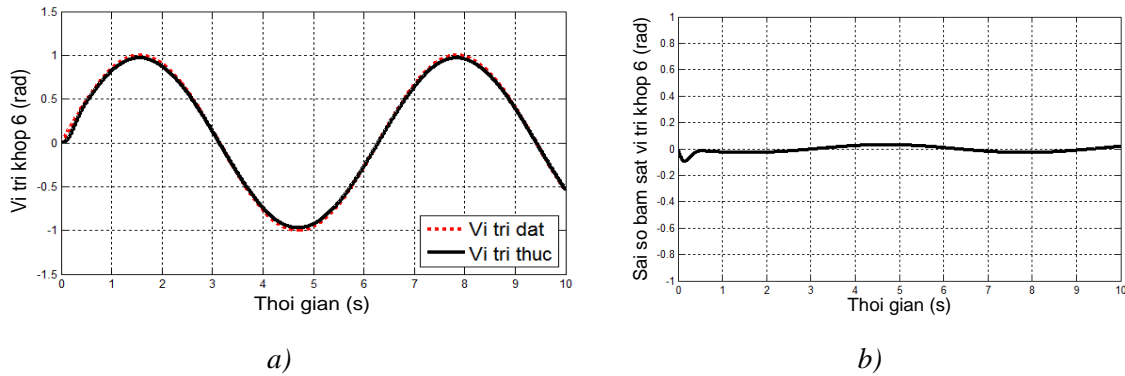
Khi góc đặt vào là $X_v = V.t$ thời gian đạt giá trị cân bằng nhỏ, sai số bám sát bằng không trong khoảng thời gian đầy đủ thông tin về phụ tải cho bộ điều khiển.

Trường hợp 3: Mô phỏng bộ điều khiển thích nghi trượt với mạng nơ ron xấp xỉ với yếu tố phi tuyến bất định là đàn hồi được nghiên cứu mô phỏng với với khớp năm và khớp sáu của

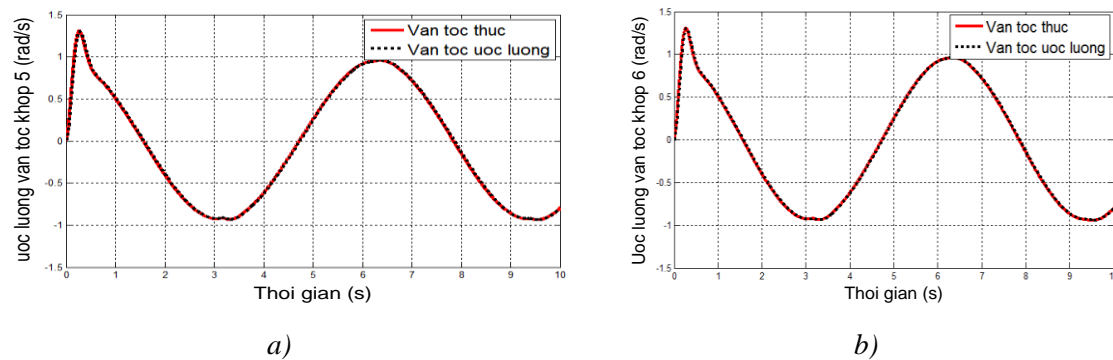
robot. Các tham số của tay máy robot sử dụng cho mô phỏng được chọn như sau: $l_5 = l_6 = 0.2(\text{m})$; $l_{c5} = l_{c6} = 0.1(\text{m})$; $m_5 = 3.2(\text{kg})$, $m_6 = 2.7(\text{kg})$, $g = 9.81(\text{m/s}^2)$ và tham số $K_{e5} = K_{e6} = 100 + 30\cos(0.5t)(\text{Nm/rad})$, $M_t = 0$.



Hình 9. Vị trí góc và sai số khớp 5 của trường hợp 3: a) Vị trí góc của khớp 5; b) Sai số bám sát vị trí khớp 5.



Hình 10. Vị trí góc và sai số khớp 6 của trường hợp 3: a) Vị trí góc của khớp 6; b) Sai số bám sát vị trí khớp 6.



Hình 11. Giá trị ước lượng khớp 5 và 6 của trường hợp 3: a) Ước lượng vận tốc khớp 5; b) Ước lượng vận tốc khớp 6.

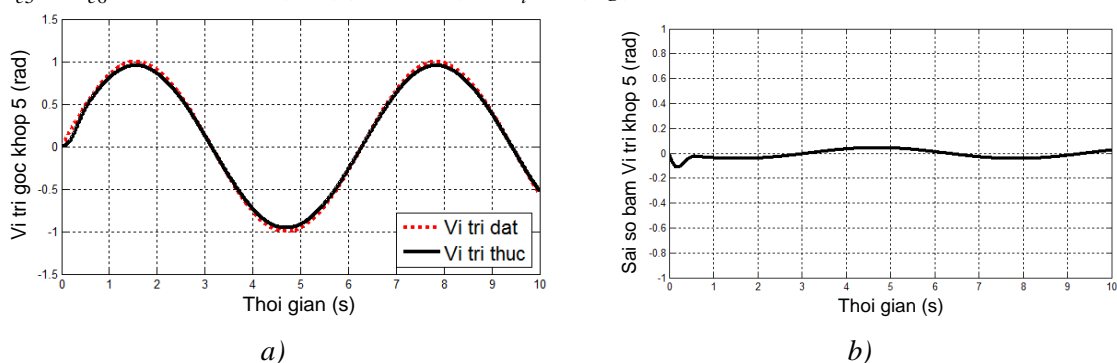
- Đối với khớp 5: Giá trị vị trí góc luôn bám sát giá trị đặt và sai số của khớp nhỏ (như hình 9). Sai số trung bình là 0.023066 (rad), sai số xác lập lớn nhất là 0.034 (rad), thời gian quá độ là 0.32s (hình 9a và hình 9b).

- Đối với khớp 6: Sai số trung bình là 0.020622 (rad), sai số xác lập lớn nhất là 0.03 (rad), thời gian quá độ là 0.19 s (hình 10a và hình 10b).

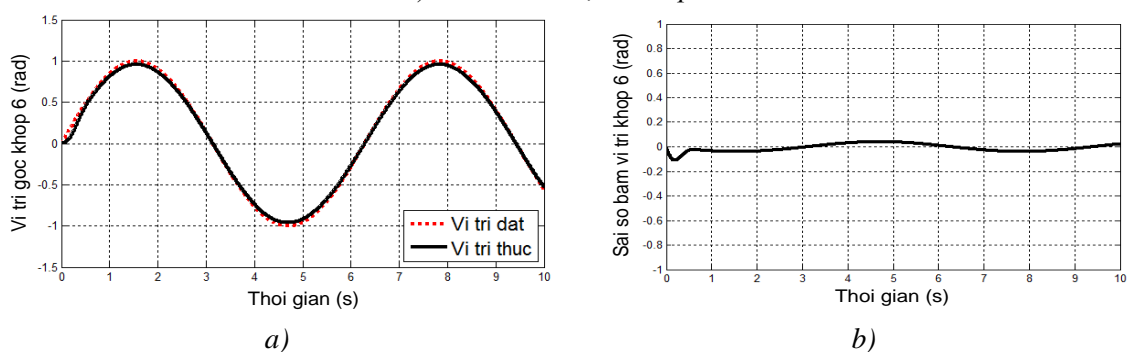
Hệ ổn định, vị trí của các khớp tay máy đã bám theo vị trí đặt sau một khoảng thời gian dưới 0.32 s.

Bộ điều khiển được mô phỏng trong ở trường hợp 3, ta nhận thấy, chất lượng điều khiển của hệ thống làm việc ổn định lượng ra bám sát lượng đặt, sự dao động của vận tốc khớp và động cơ đã giảm.

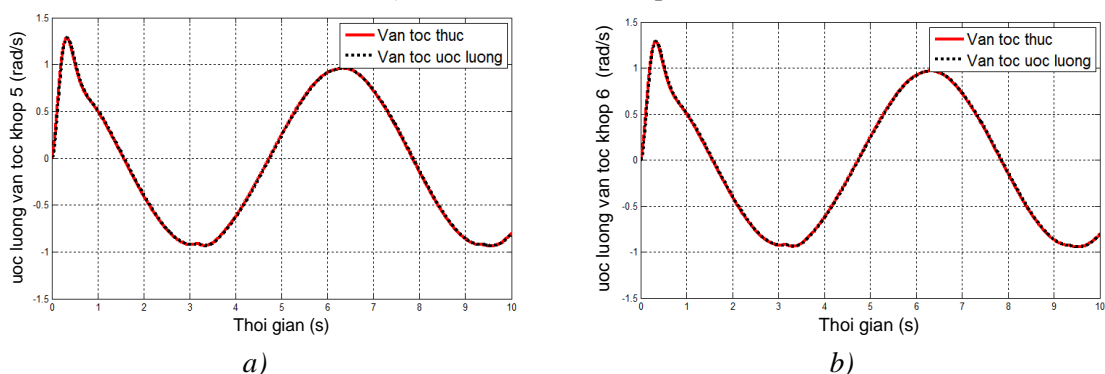
Trường hợp 4: Mô phỏng thuật toán giống như trường hợp 3 nhưng với dữ liệu như sau: $K_{e5} = K_{e6} = 100 + 30\cos(0.5t)(Nm / rad)$, $M_t = 3(Kg)$.



Hình 12. Vị trí góc và sai số khớp 5 của trường hợp 4: a) Vị trí góc của khớp 5; b) Sai số bám vị trí khớp 5.



Hình 13. Vị trí góc và sai số khớp 6 của trường hợp 4: a) Vị trí góc của khớp 6; b) Sai số bám vị trí khớp 6.



Hình 14. Giá trị ước lượng khớp 5 và 6 của trường hợp 4: a) Ước lượng vận tốc khớp 5; b) Ước lượng vận tốc khớp 6.

- Đối với khớp 5: Giá trị vị trí góc luôn bám sát giá trị đặt và sai số của khớp nhỏ (như hình 12). Sai số trung bình là 0.029563 (rad), sai số xác lập lớn nhất là 0.044 (rad), thời gian quá độ là

0.419 s (hình 12a và hình 12b).

- Đối với khớp 6: Sai số trung bình là 0.027122 (rad), sai số xác lập lớn nhất là 0.039 (rad), thời gian quá độ là 0.416 s (hình 13a và hình 13b).

Hệ ổn định, vị trí của các khớp tay máy đã bám theo vị trí đặt sau một khoảng thời gian dưới 0.419 s.

Kết quả mô phỏng thể hiện trong bốn trường hợp cho thấy, với thuật toán điều khiển trượt thích nghi được đề xuất cho chất lượng bám quỹ đạo đặt tốt, sai lệch bám nhỏ, khả năng kháng nhiễu tốt. Hơn nữa, tín hiệu góc của khớp đã bám theo giá trị đặt là tín hiệu biến thiên theo hình sin. Mặc dù bậc của hệ thống lớn nhưng hệ đã ổn định với các thuật toán được đề xuất với sai số bám sát nhỏ. Sai số bám sát vị trí chỉ xảy ra tại thời điểm chuyển đổi trạng thái của tín hiệu đặt, điều này là phù hợp với đặc tính đàn hồi của khớp; so với bộ điều khiển được đề xuất trong [13, 14], sai số này nhỏ hơn, điều đó chứng tỏ bộ điều khiển được đề xuất đã mang lại chất lượng điều khiển cao. Giá trị xấp xỉ hàm bất định, biến trạng thái của bộ điều khiển được sử dụng mạng nơ ron và bộ quan sát trạng thái. Từ đó đã ước lượng được giá trị của các hàm bất định nhằm cung cấp đầy đủ thông tin chính xác về điều khiển. Vì vậy, thuật toán tổng hợp đã mang lại sự ổn định cho hệ thống, các biến trạng thái đã bám theo giá trị đặt sau một khoảng thời gian nhất định.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu tổng hợp điều khiển bám sát cho hệ phi tuyến bất định (ma sát, đàn hồi) và nhiễu loạn trên cơ sở phương pháp kết hợp điều khiển trượt thích nghi, bù thành phần bất định dùng mạng nơ ron RBF, bộ quan sát trạng thái. Đây là một hướng nghiên cứu cho phép nâng cao chất lượng làm việc của các hệ truyền động điện bám điện cơ robot công nghiệp. Kết quả cụ thể đã xây dựng được mô hình điều khiển bám vị trí khớp quay của tay máy robot với liên kết đàn hồi của khớp có tính đến động học của động cơ chấp hành, yếu tố ma sát với robot hàn sáu bậc sử dụng động cơ servo kích từ bằng nam châm vĩnh cửu. Kết quả mô phỏng cho thấy, mặc dù bậc của hệ thống lớn, nhưng với thuật toán đã tổng hợp đảm bảo được sự hội tụ của giá trị vị trí và vận tốc của tay máy theo giá trị đặt sau một khoảng thời gian nhất định, từ đó đã nâng cao được chất lượng điều khiển chính xác cho robot ứng dụng trong sản xuất công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đào Văn Hiệp, “*Kỹ thuật Robot*”, NXB Khoa học và Kỹ Thuật 2016.
- [2]. Hoàng Quang Chính, Đào Hoa Việt, Nguyễn Anh Văn, Lê Bá Chung, “*Các hệ truyền động trong Robot*”. NXB Quân Đội Nhân Dân, 2020.
- [3]. Nguyễn Văn Khang, “*Động lực học hệ nhiều vật*”, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2018.
- [4]. Lương Hồng Sâm, Lê Công Định, Nguyễn Việt Hùng, “*Giáo trình Robot công nghiệp*”, NXB Đại học Quốc Gia Thành Phố Hồ Chí Minh, 2017.
- [5]. Nguyễn Thanh Tiên, *Ứng dụng điều khiển trượt tổng hợp điều khiển hệ điện cơ* (dùng cho đào tạo cao học), Nhà Xuất Bản Quân Đội Nhân Dân, 2013.
- [6]. Nguyễn Mạnh Tiến, “*Phân tích và điều khiển robot công nghiệp*”. NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2016.
- [7]. Nguyễn Doãn Phước, “*Lý thuyết điều khiển nâng cao*”, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật. 2018.
- [8]. Phạm Thượng Cát, “*Điều khiển rô bốt n bậc tự do có nhiễu tham số bất định trong không gian đề các*”, Tạp chí tin học và điều khiển học, 2008.
- [9]. Le Ngọc Trúc, Nguyen Van Quyen, Nguyen Phung Quang, “*The matrix form of the dynamics of robot manipulators with a novel formulation of Coriolis/centrifugal matrix*”, tr. 1-9, Hội Nghị quốc tế lần thứ 5 về Điều khiển và Tự động hoá VCCA 2019.
- [10]. M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, “*Robot Modeling and Control*”, Second Edition, Publishing by John Wiley & Sons Inc Ltd, USA, Year: 2020.
- [11]. Jinkun Liu, “*Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*”, Tsinghua University Press, Publishing by Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

- [12]. T. D. Chuyen, D. Q. Hiep, and D. H. Du, “*Research to improve the quality control for drive system tracking electromechanical takes into account nonlinear undetermined application in industrial production*”, International Conference on Engineering Research and Applications, pp. 708-723, 1/2021.
- [13]. J. Gao, A. Pashkevich and S. Caro, “*Optimization of the robot and positioner motion in a redundant fiber placement workcell*”, Mechanism and Machine Theory, vol. 114, pp. 170-189, 2017.
- [14]. Chu A. My, Duong X. Bien, Bui H Tung, Le C. Hieu, Nguyen V. Cong, Tran V. Hieu. “*Inverse kinematic control algorithm for a welding robot - positioner system to trace a 3D complex curve*”. International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2019
- [15]. Atif Iqbal, Shaikh Moinoddin, Bhimireddy Prathap Reddy, “*Electrical Machine Fundamentals with Numerical Simulation using MATLAB SIMULINK*”, Publishing by John Wiley & Sons Ltd, USA, 2021.
- [16]. Б.К Чемоданов - Следящие приводы Т1, 2.- М.: Изд. МГТУ им Баумана, 1999.
- [17]. КлючевВ.И. *Теория электропривода*, Москва энергоатомиздт, 2001.

ABSTRACT

Improving the quality of precise control automatic welding robots with nonlinear uncertainties

This article presents a research method to design an adaptive sliding controller combined with an RBF neural network and a state observer for industrial robots in general and welding robots in particular; when taking into account the uncertain nonlinear factors: friction, elasticity, kinematics of the actuator, thereby improving the quality of precise control for the robot.

Keywords: Welding robot; Industrial robot; Adaptive sliding mode control; RBF neural network; State observer.