

# THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG THÍCH NGHI TRÊN CƠ SỞ MẠNG NƠ RÔN ĐIỀU KHIỂN CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

## DESIGN OF ADAPTIVE ROBUST CONTROLLER BASED ON NEURAL NETWORKS CONTROL FOR INDUSTRIAL ROBOT MANIPULATOR

Vũ Thị Yến, Bùi Văn Huy, Phùng Thị Vân

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

havi2203@gmail.com; bvhuy.hau@gmail.com; phungvan.hau@gmail.com

**Tóm tắt** - Bài báo này đề xuất một bộ điều khiển bền vững thích nghi trên cơ sở mạng nơ ron cho robot công nghiệp. Trong thực tế robot là một hệ thống phi tuyến và trong quá trình làm việc, chúng thường phải chịu đựng ma sát phi tuyến, sự thay đổi của tải và nhiễu bên ngoài tác động, ... Để giải quyết vấn đề này, một bộ điều khiển thông minh đã được thiết kế trên cơ sở kế thừa ưu điểm của bộ điều khiển thích nghi nơ ron và SMC để điều khiển vị trí của một robot công nghiệp. Trong bộ điều khiển đưa ra, NNs sử dụng để xấp xỉ động lực học chưa rõ của hệ thống robot công nghiệp. Luật thích nghi của các tham số mạng được thiết lập bằng thuyết ổn định Lyapunov, ổn định và bền vững của toàn bộ hệ thống điều khiển đã đạt được. Cuối cùng, kết quả mô phỏng được thực hiện trên robot 3 bậc tự do được đưa ra và so sánh với bộ điều khiển AFC và BPC từ đó chứng minh bộ điều khiển NNs có khả năng bám chính xác và khả năng bền vững cao hơn.

**Từ khóa** - Điều khiển bền vững thích nghi; điều khiển trượt; mạng nơ ron; robot người máy.

### 1. Giới thiệu chung

Ngày nay, robot công nghiệp đóng một vai trò quan trọng trong các dây chuyền sản xuất công nghiệp. Tuy nhiên, trong quá trình làm việc robot công nghiệp luôn chịu ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài, trọng lượng tải thay đổi và ma sát phi tuyến... Vấn đề được đặt ra là làm thế nào để thiết kế được một bộ điều khiển phù hợp để đáp ứng được yêu cầu ngày càng cao của quá trình sản xuất. Để giải quyết vấn đề này đã có rất nhiều các phương án điều khiển đã được nghiên cứu và đưa ra như điều khiển PID, điều khiển thích nghi, điều khiển cuộn chiếu, điều khiển trượt, ... đã được đưa ra trong các tài liệu [1-6]. Ngày nay, các bộ điều khiển thông minh trên cơ sở của điều khiển mờ và mạng nơ ron đã được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển robot công nghiệp. Bộ điều khiển mờ là một công cụ hiệu quả trong việc xấp xỉ hệ thống phi tuyến [7-10]. Trong [8], một bộ điều khiển thích nghi trên cơ sở logic mờ đã được ứng dụng để điều khiển hệ thống phi tuyến với cấu trúc bất định và có sự xuất hiện của nhiễu bên ngoài trong quá trình điều khiển. Ở đây logic mờ được sử dụng để xấp xỉ động lực học chưa rõ của hệ thống phi tuyến. Bộ điều khiển đã đảm bảo được hiệu quả bám và hiệu suất yêu cầu. Tuy nhiên, bộ điều khiển được xây dựng trên cơ sở của logic mờ thì các luật điều khiển mờ thường được xây dựng dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế. Vì thế, bằng những kiến thức kinh nghiệm đó nhiều khi không đủ và rất khó để xây dựng được luật điều khiển tối ưu. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đã đưa ra bộ điều khiển thích nghi bền vững trượt sử dụng mạng nơ ron để điều khiển cho robot công nghiệp, bằng việc kết hợp những ưu điểm của bộ điều khiển thích nghi trượt và khả năng học online của bộ điều khiển nơ ron. Do đó khi áp dụng bộ điều khiển này vào điều khiển robot thì hiệu quả bám, tốc độ hội tụ đã được cải thiện đáng kể.

**Abstract** - This article proposes an adaptive robust controller based on neural networks for industrial robot manipulators (IRM). In fact, robot manipulators are a nonlinear system and in the working process, they usually bear nonlinear friction, payload variation, external disturbance, etc. To deal with these problems, an intelligent controller designed based on inheriting the advantages of the robust adaptive NN and the SMC scheme to control the positions of industrial robot manipulators. In the proposed controller, the NN is used to approximate the unknown dynamic of the IRMs system. The adaptation laws of network parameters are established based on the Lyapunov stability theory as well as the guaranteed stability and robustness of the entire control system. Finally, simulations performed on a three link robot industrial manipulator are provided in comparison with Adaptive Fuzzy Control (AFC) and Backstepping Control (BPC) to demonstrate superior tracking precision and robustness of the proposed control methodology

**Key words** - Sliding mode control; robust adaptive control; neural network; robot manipulators.

### 2. Động lực học robot



Hình 1. Robot công nghiệp

Xét phương trình động lực học của robot công nghiệp được đưa ra trong Hình 1 [11]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

Với,  $(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{n \times 1}$  là vị trí, vận tốc và gia tốc của robot;

$M(q) \in R^{n \times n}$  là ma trận khối lượng suy rộng ;

$C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$  là ma trận lực ly tâm và ma trận gia tốc coriolis ;

$G(q) \in R^{n \times 1}$  là một véc tơ mô tả thành phần trọng lượng;

$\tau \in R^{n \times 1}$  là mô men điều khiển.

Để thiết kế bộ điều khiển tes giả đưa ra một số tính chất

cho (1) như sau [4]:

**Tính chất 1:** Ma trận khối lượng suy rộng  $M(q)$  là một ma trận đối xứng và xác định dương

$$M(q) \leq m_0 I \tag{2}$$

với  $m_0 > 0$  và  $m_0 \in R$

**Tính chất 2:**  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  là ma trận đối xứng lệch cho véc tơ  $x$  bất kỳ:

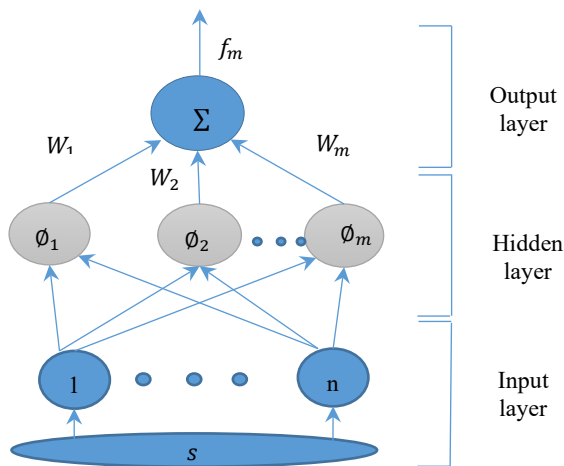
$$x^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] x = 0 \tag{3}$$

**Tính chất 3:**  $C(q, \dot{q})\dot{q}$ ,  $F(\dot{q})$  được giới hạn theo:

$$\|C(q, \dot{q})\dot{q}\| \leq C_k \|\dot{q}\|^2 \tag{4}$$

với  $C_k$  là hằng số dương.

### 3. Cấu trúc bộ điều khiển NNs



Hình 2. Cấu trúc của NNs

Cấu trúc bộ điều khiển NNs gồm có 3 lớp [12]:

- Lớp 1 là lớp đầu vào (Input layer): gồm các biến đầu vào  $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$ .
- Lớp thứ 2 là lớp ẩn (The hidden layer): đầu ra của lớp ẩn được tính toán theo công thức sau:

$$\phi_j(s) = \exp \left[ -(s - c_j)^2 / (2d_j^2) \right] \tag{5}$$

Trong đó,  $m$  là số nơ ron lớp ẩn và  $c_j = c_{j1}, \dots, c_{jn}$  là véc tơ trung tâm của mạng.  $d_j$  là độ lệch chuẩn của hàm xuyên tâm thứ  $j$ ,  $d = [d_1, \dots, d_m]^T$ .  $\phi_j$  là hàm Gaussian của mạng nơ ron  $j$ .

Lớp 3 là lớp đầu ra (output layer), đầu ra của mạng nơ ron được tính toán như sau:

$$f_j(s) = \sum_{j=1}^m W_{ji} \phi_j(s), j = 1, \dots, m \tag{6}$$

Trong đó,  $W_{ji}$  là trọng số kết nối giữa nơ ron lớp ẩn thứ  $j$  và nơ ron đầu ra thứ  $i$ ,  $n$  là số đầu vào.

Công thức (6) có thể viết lại như sau :

$$f(s) = W\phi(s) \tag{7}$$

Trong đó,  $W$  là trọng số của mạng nơ ron,  $\phi(s) = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$

Ở đây ta sử dụng mạng nơ ron để xấp xỉ, do đó nó sẽ tồn tại một hàm nơ ron tối ưu như sau:

$$f(s) = W^*\phi(s) + \varepsilon \tag{8}$$

Trong đó,  $W^*$  là giá trị trọng số tối ưu, và  $\varepsilon$  là véc tơ sai lệch xấp xỉ.

**Giả thiết:** sai lệch xấp xỉ được giới hạn:

$$\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_0 \tag{9}$$

với  $\varepsilon_0$  là giá trị thực dương.

Đầu ra của bộ điều khiển NNs là giá trị xấp xỉ và được tính theo công thức sau:

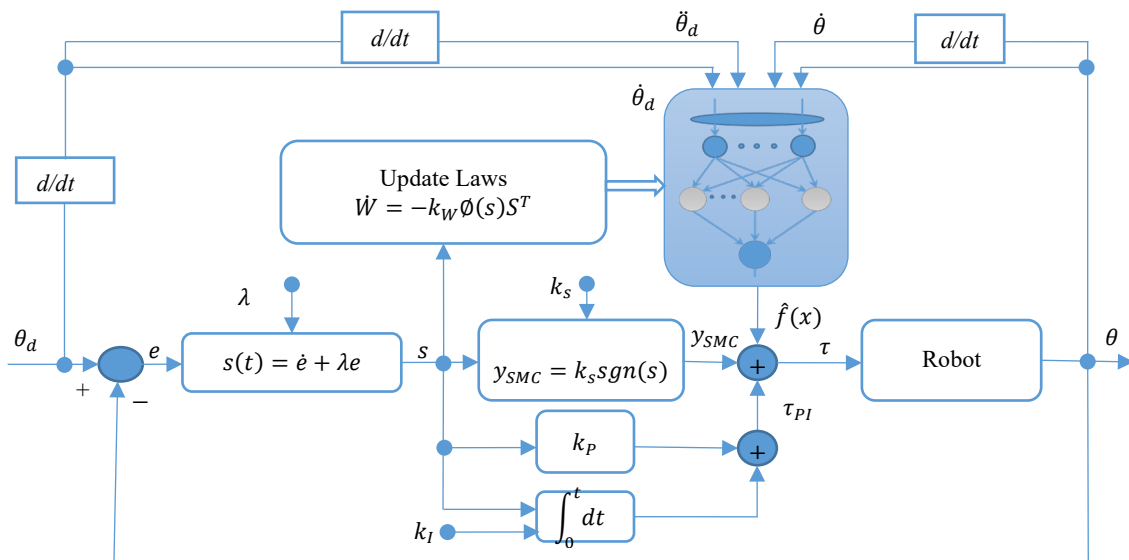
$$\hat{f}(s) = \hat{W}^T \phi(s) \tag{10}$$

Trong đó,  $\hat{f}, \hat{W}$  là giá trị xấp xỉ của  $f^*, W^*$ ,

$$W^T = [W_1^T, W_2^T, \dots, W_m^T]$$

### 4. Thiết kế bộ điều khiển NNs

Robot dưới sự tác động của lực  $\tau$  thì bộ điều khiển được thiết kế sao cho sai lệch bám giữa vị trí mong muốn của các khớp  $q_d$  với véc tơ vị trí thực tế của robot  $q$  có thể được hội tụ về 0 khi  $t \rightarrow \infty$ . Cấu trúc của bộ điều khiển được thiết kế như Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc hệ thống điều khiển robot công nghiệp

$e(t)$ ,  $\dot{e}(t)$  tương ứng là sai lệch vị trí và sai lệch tốc độ. Luật thích nghi sẽ được xác định như sau :

$$e(t) = q_d - q \quad (11)$$

$$s(t) = \dot{e} + \lambda e \quad (12)$$

Ở đây,  $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  là ma trận khuếch đại hằng số dương.

Từ công thức (1) có thể viết lại như sau:

$$M(q) * (\ddot{q}_d - \ddot{e}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d - \dot{e}) + G(q) = \tau$$

$$M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e} - \dot{s}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d + \lambda e - s) + G(q) = \tau$$

$$M\dot{s} + Cs = M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d + \lambda e) + G(q) - \tau \quad (13)$$

$$M\dot{s} + Cs = y - \tau \quad (14)$$

Với,  $f = M(q) * (\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q}) * (\dot{q}_d + \lambda e) + G(q)$

Từ sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển Hình 3 ta có:

$$\tau = \hat{f} + y_{SMC} + \tau_{PI} \quad (15)$$

Trong đó,  $\hat{f}$  tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển NNs,  $y_{SMC}$  là bộ điều khiển trượt (SMC) và  $\tau_{PI}$  là tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển khuếch đại tích phân.

Ở đây bộ điều khiển trượt được chọn như sau:

$$y_{SMC} = k_s \text{sgn}(s) \quad (16)$$

Bộ điều khiển khuếch đại tích phân được tính toán như sau:

$$\tau_{PI} = k_p s + k_I \int_0^t s dt \quad (17)$$

Thay (15) vào (14) ta thu được:

$$M\dot{s} = \tilde{f} - Cs - y_{SMC} - \tau_{PI} + \varepsilon \quad (18)$$

Trong đó,  $\tilde{f} = f - \hat{f}$ .

Luật học thích nghi của bộ điều khiển sẽ được chọn như sau:

$$\dot{\hat{W}} = k_W \sigma(s) s^T \quad (19)$$

### Chứng minh tính ổn định của hệ thống

Xét robot công nghiệp có phương trình động học như phương trình (1) và bộ điều khiển NNs có luật thích nghi như công thức (19). Phân tích tính ổn định của hệ thống theo thuyết Lyapunov.

Xét hàm Lyapunov có phương trình như sau:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \left( \int_0^t s dt \right)^T k_I \left( \int_0^t s dt \right) + (\tilde{W}^T k_W^{-1} \tilde{W}) \quad (20)$$

Đạo hàm bậc nhất  $V(t)$  theo thời gian ta thu được phương trình như sau:

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T M \dot{s} + s^T k_I \int_0^t s dt + \frac{1}{K_W} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) \quad (21)$$

Thay (18) vào (21) ta có:

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T k_I \int_0^t s dt \quad (22)$$

$$+ s^T (\tilde{f} - Cs - y_{SMC} - \tau_{PI} + \varepsilon) + \frac{1}{k_W} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}})$$

Áp dụng tính chất 2 và thay thế  $\dot{\tilde{W}} = -\dot{\tilde{W}}$  vào (22):

$$\dot{V}(t) = s^T k_I \int_0^t s dt + s^T (\tilde{f} - y_{SMC} - \tau_{PI} + \varepsilon) - \frac{1}{k_W} (\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) \quad (23)$$

Thay (16), (17) và (19) vào (23) ta có:

$$\dot{V}(t) = s^T (-k_s \text{sgn}(s) - k_p s + \varepsilon) \quad (24)$$

Sử dụng công thức (9) vào (24) ta:

$$\dot{V}(t) \leq -s^T k_p s - s^T k_s \text{sgn}(s) + \varepsilon_0 \quad (25)$$

Do đó,  $\dot{V}(t) \leq 0$

Từ kết quả cho thấy, hệ thống được ổn định không phụ thuộc vào  $s$ .

### 5. Kết quả mô phỏng

Phương trình động học của robot như sau:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = m_2 \left( l_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos(q_2) \right)^2 + \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + \frac{1}{2} m_3 (l_1 + l_3 \cos(q_2 + q_3)) + l_2 \cos(q_2^2)$$

$$M_{22} = \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + \frac{1}{12} m_1 l_3^2 + \frac{1}{4} m_3 l_2^2 + \frac{1}{12} m_1 l_3^2 \cos(q_2 + q_3)^2 + \frac{1}{12} m_1 l_2^2 \cos(q_2^2)$$

$$M_{23} = M_{32} = \frac{1}{12} m_1 l_3^2 + \frac{1}{4} m_3 l_2 l_3 \cos(q_3)$$

$$M_{33} = \left( \frac{1}{12} m_1 + \frac{1}{4} m_3 \right) l_3^2$$

$$M_{12} = M_{13} = M_{21} = M_{31} = 0$$

$$C_{11} = -2(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 - 2m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$C_{12} = -(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2) - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 - 2m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) \dot{q}_3$$

$$C_{13} = -m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) \dot{q}_3$$

$$C_{21} = -(m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2 - m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) - 2m_3 l_2 l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$+ (m_2 + m_3) l_1 l_2 \sin(q_2) (\dot{q}_2 + \dot{q}_1) + m_3 l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) (\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3)$$

$$C_{22} = -2m_3l_2l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$C_{23} = -m_3l_2l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$C_{31} = -m_3l_1l_3 \sin(q_2 + q_3)(\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ - m_3l_2l_3 \sin(q_3) \dot{q}_3 \\ + m_3l_1l_3 \sin(q_2 + q_3)(\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3) \\ + m_3l_2l_3 \sin(q_2 + q_3)(2\dot{q}_2 + \dot{q}_1 + \dot{q}_3)$$

$$C_{32} = m_3l_2l_3 \sin(q_3) \dot{q}_2$$

$$C_{33} = 0;$$

$$G_1 = (m_1 + m_2 + m_3)gl_1 \sin(q_1) \\ + (m_2 + m_3)gl_2 \sin(q_1 + q_2) \\ + m_3gl_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)$$

$$G_2 = (m_2 + m_3)gl_2 \sin(q_1 + q_2) \\ + m_3gl_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)$$

$$G_3 = m_3gl_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3)$$

Trong đó,

$m_1, m_2, m_3$  là khối lượng của bậc 1, bậc 2 và bậc 3 tương ứng;

$l_1, l_2, l_3$ , là chiều dài của bậc 1, bậc 2 và bậc 3 tương ứng.  $g = 9.8 \left(\frac{m}{s}\right)$  giá trị của gia tốc trọng trường;

$q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$  vị trí của bậc 1, bậc 2 và bậc 3.

Chọn giá trị của vị trí mẫu cho bậc 1 và bậc 2

$$q_d = [q_{1d} \ q_{2d} \ q_{3d}]^T \\ = [0.5 \sin(\pi t) \ 0.5 \sin(\pi t) \ 0.5 \sin(\pi t)]^T$$

Để ghi lại hiệu suất điều khiển tương ứng, sai lệch bình phương trung bình (MSE) theo vị trí được xác định như sau [13]:

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [q(t) - q_d(t)]^2 \quad (26)$$

Ở đây,  $T$  là chu kỳ. Giá trị của MSE để đánh giá hiệu suất điều khiển của bộ điều khiển.

NMSE là giá trị sai lệch bình phương trung bình tiêu chuẩn của phản hồi vị trí tính trên 1 rad để đánh giá hiệu suất điều khiển.

**Bảng 1.** thông số của robot

| Bậc   | Khối lượng (kg) | Chiều dài (m) |
|-------|-----------------|---------------|
| Bậc 1 | 2               | 0,8           |
| Bậc 2 | 1               | 1             |
| Bậc 3 | 0,8             | 0,5           |

### Thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab.

Bước 1: Cài đặt các thông số của mạng nơ ron, các hệ số khuếch đại trong luật thích nghi:  $n, m, k_w, \lambda, k_p, k_i, k_s$ ;

Bước 2: Khởi tạo các giá trị ban đầu của bộ điều khiển NNs với giá trị ngẫu nhiên;

Bước 3: Cập nhật tín hiệu vào của bộ điều khiển NNs, và trọng số của bộ điều khiển NNs, tính toán  $s(t)$  theo công thức (12);

Bước 4: Tính toán đầu ra của bộ điều khiển NNs theo (10);

Bước 5: Điều chỉnh các giá trị trọng số của bộ điều khiển NNs theo công thức (19);

Bước 6: Đưa ra các trọng số của bộ điều khiển NNs và quay lại bước 3.

**Bảng 2.** So sánh hiệu suất mô phỏng của bộ điều khiển NNs, BPC và AFC trong trường hợp 1

| NMSE     | Đơn vị: rad            |                        |                        |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|
|          | Bậc 1                  | Bậc 2                  | Bậc 3                  |
| NNs      | $5,156 \times 10^{-4}$ | $5,254 \times 10^{-4}$ | $4,972 \times 10^{-4}$ |
| AFC [15] | $1,434 \times 10^{-3}$ | $1,876 \times 10^{-3}$ | $1,034 \times 10^{-3}$ |
| BPC [14] | $2,575 \times 10^{-3}$ | $2,934 \times 10^{-3}$ | $2,065 \times 10^{-3}$ |

**Trường hợp 1:** Nhiễu được chọn có dạng như sau:

$$\tau_0 = \begin{bmatrix} 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \\ 2\sin(t) \end{bmatrix}$$

Hệ số khuếch đại trong luật thích nghi (19)

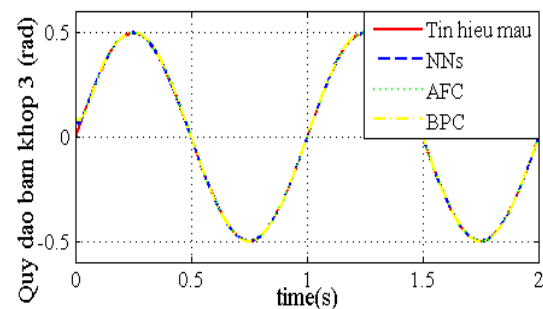
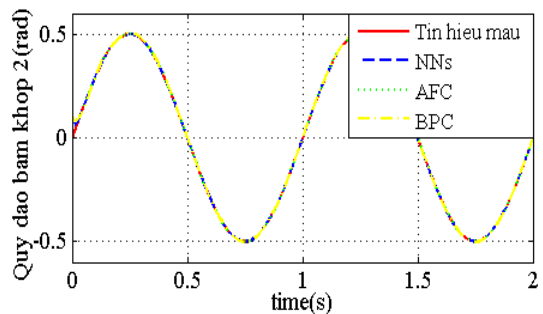
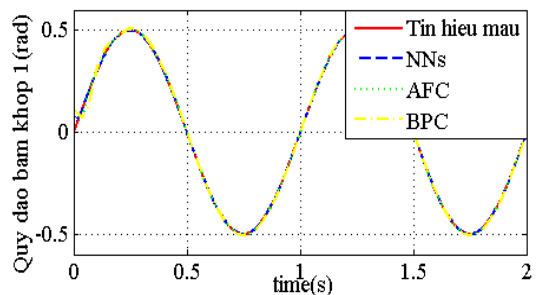
$$k_w = \lambda = \text{diag}[5, 5, 5]; k_p = \text{diag}[45, 45, 45];$$

$$k_i = \text{diag}[80, 80, 80]; k_s = \text{diag}[0.1, 0.1, 0.1]$$

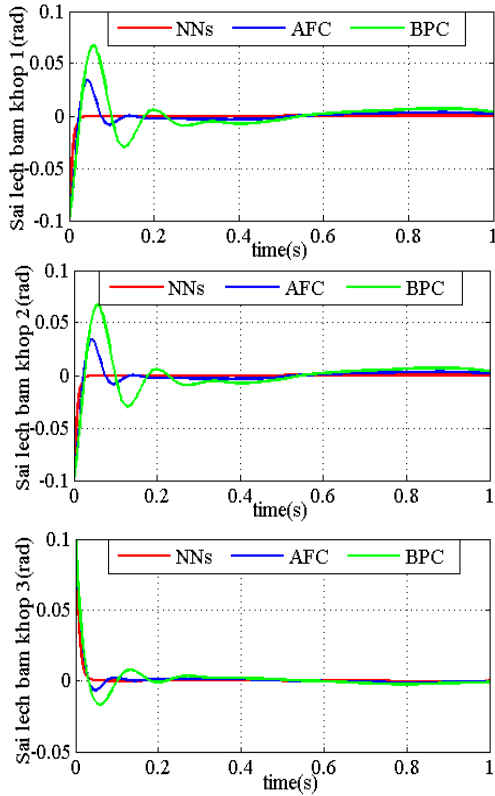
Cấu trúc của bộ điều khiển NNs với  $n = 6, m = 6$ .

**Trường hợp 2:** Hệ thống đang làm việc sau thời gian 0,5s ta đưa thêm nhiễu có dạng như sau:

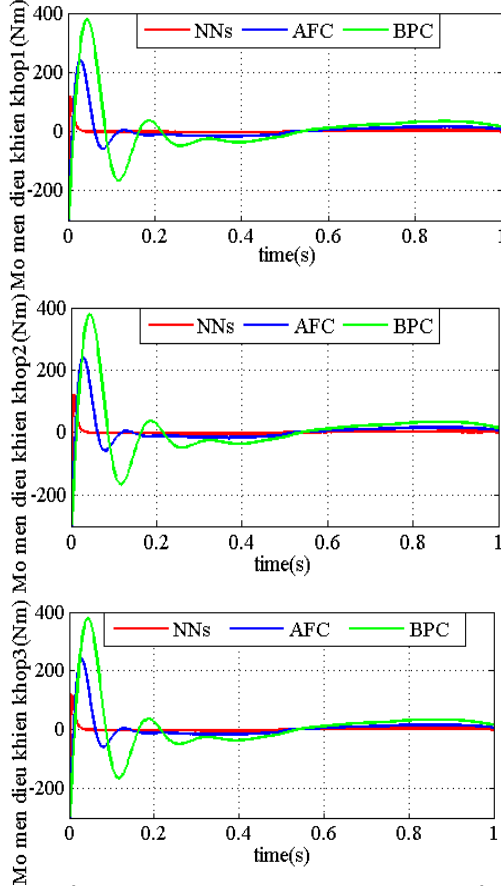
$$d_e(t) = [40 \sin(20t) \ 40 \sin(20t) \ 40 \sin(20t)]^T$$



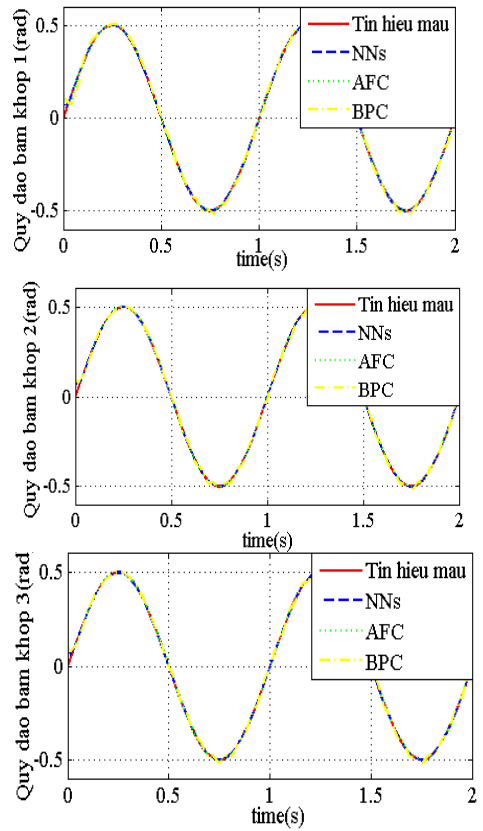
**Hình 4.** Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Vị trí của robot tương ứng với bộ điều khiển nơ ron (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)



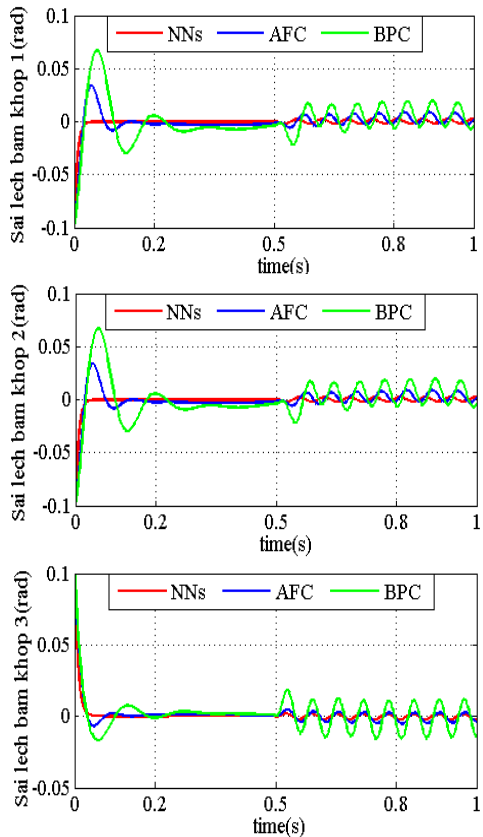
**Hình 5.** Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Sai lệch bám của robot tương ứng với bộ điều khiển mờ (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)



**Hình 6.** Kết quả mô phỏng trường hợp 1: Mô men điều khiển của robot tương ứng với bộ điều khiển mờ (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)

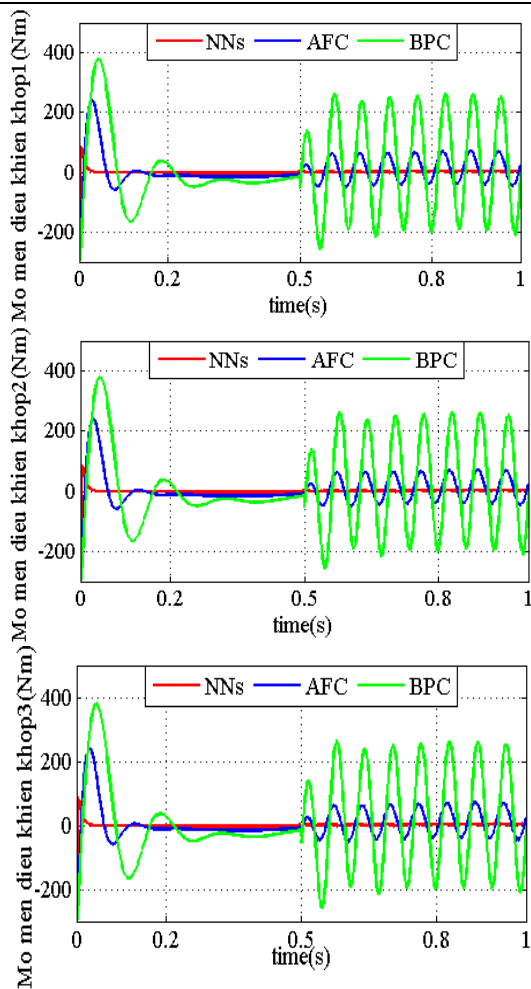


**Hình 7.** Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Vị trí của robot tương ứng với bộ điều khiển mờ (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)



**Hình 8.** Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Sai lệch bám của robot tương ứng với bộ điều khiển mờ (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)





**Hình 9.** Kết quả mô phỏng trường hợp 2: Mô men điều khiển của robot tương ứng với bộ điều khiển mờ (NNs), mờ thích nghi (AFC) và bộ điều khiển Backstepping (BPC)

**Nhận xét:** Từ kết quả mô phỏng Hình 4, 7 có thể thấy, cả 3 bộ điều khiển NNs, AFC [15] và BPC [14] đều đảm bảo tính ổn định và bền vững trong quá trình làm việc. Tuy nhiên, qua kết quả mô phỏng Hình 5, 6, 8, 9 và kết quả so sánh giá trị sai lệch bình phương trung bình trong Bảng 2 cho thấy, mô men điều khiển của bộ điều khiển NNs hội tụ nhanh hơn, sai lệch bám, mô men điều khiển cũng nhỏ hơn, và khả năng ổn định tốt hơn 2 bộ điều khiển còn lại. Điều đó chứng minh rằng, chất lượng điều khiển robot bằng việc sử dụng bộ điều khiển NNs ổn định hơn và khả năng bám được cải thiện.

## 6. Kết luận

Trong bài báo này, bộ điều khiển thích nghi bền vững được xây dựng trên cơ sở của bộ điều khiển mờ (NNs) để điều khiển cho robot công nghiệp đã đạt được độ bám chính xác cao trong môi trường làm việc khác nhau. Trên cơ sở thuyết ổn định Lyapunov tác giả đã chứng minh được hệ thống luôn luôn ổn định trên toàn vùng làm việc. Hiệu quả của bộ điều khiển đã được kiểm chứng qua mô phỏng và được so sánh với bộ điều khiển Backstepping (BPC) [14] và bộ điều khiển mờ thích nghi (AFC) [15]. Quan sát kết quả mô phỏng ta thấy, khả năng bám, sai lệch bám của bộ điều khiển đưa ra tốt hơn bộ điều khiển Backstepping (BPC)

và bộ điều khiển AFC. Từ kết quả mô phỏng ta có thể tiếp tục nghiên cứu để đưa vào thực nghiệm cũng như được ứng dụng vào thực tế.

### Chữ viết tắt:

IRM: Industrial Robot Manipulator

SMC: Sliding Mode Control

NNs: Neural Networks

PID: Proportional Integral Differential

BPC: Backstepping Control

AFC: Adaptive Fuzzy Control

MSE: Mean Square Error

NMSE: Normalized Mean Square Error

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vicente Parra-Vega, Suguru Arimoto, Yun-Hui Liu, Gerhard Hirzinger and Prasad Akella, "Dynamic Sliding PID Control for Tracking of Robot Manipulators: Theory and Experiments", *IEEE Trans. on robotics and automation*, vol. 19, No. 6, 2003, pp. 967-976.
- [2] Sabanovic A, "Variable structure systems with sliding modes in motion control- A Survey", *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 7, No. 2, 2011, pp. 212 – 223.
- [3] Denker A, Ohnishi K, "Robust Tracking Control of Mechatronic Arms", *IEEEASME Transactions on mechatronics*, vol. 1, No.2, 1996, pp. 181-188.
- [4] Ishii C, Shen T, Tamura K, "Robust model-following control for a robot manipulator", *IEE Proc Control Theory Appl*, vol. 144, No. 1, 1997, pp. 53-60.
- [5] Islam S, Liu X P, "Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol.58, No. 6, 2011, pp. 2444-2453.
- [6] Berghuis H, Ortega R, Nijmeijer H, "A Robust Adaptive Robot Controller", *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol 9(6), 1993, pp. 825-830.
- [7] Chen B, Liu X P, "Fuzzy approximate disturbance decoupling of MIMO nonlinear systems by backstepping and application to chemical processes", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol 13, No.6, 2005, pp. 832-847.
- [8] Tong S C, Chen B, Wang Y F, "Fuzzy adaptive output feedback control for MIMO nonlinear systems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol 156, 2005, pp. 285-299.
- [9] Londhe P S, Singh Y, Santhakumar M, et al, "Robust nonlinear PID like Fuzzy logic control of a planar parallel (2PRP - PPR) manipulator", *ISA Transactions*, vol 63, 2016, pp. 218-232.
- [10] Kumar V, Rana K P S, "Nonlinear adaptive fractional order fuzzy PID control of a 2-link planar rigid manipulator with payload", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 354, 2017, pp. 993-1022.
- [11] Vu T Y, Wang Y N, Pham V C, Nguyen X Q, and Vu H T, "Robust Adaptive Sliding Mode Control for Industrial Robot Manipulator Using Fuzzy Wavelet Neural Networks", *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 15, No. 6, 2017, pp. 2930-2941.
- [12] Peng J, Wang Y, Sun W and Liu Y, "A Neural Network Sliding Mode Controller with Application to Robotic Manipulator", *Intelligent Control and Automation*, 2006, pp.2101-2105.
- [13] Mai T L, Wang Y N, "Adaptive position tracking control system based on recurrent fuzzy wavelet neural networks for robot manipulator", *journal of Systems and Control Engineering*, 2014, pp.1-21.
- [14] Chung C W, Chang Y T, "Backstepping control of multi – input nonlinear systems", *IET control theory and applications*, vol.7, No. 14, 2013, pp. 1773-1779.
- [15] Li T S, Tong S C, Feng G, "A novel robust adaptive fuzzy tracking control for a class of nonlinear MIMO systems", *EEE Trans. Fuzzy syst*, Vol.18, No.1, 2010, pp.150-160.