

## ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL BASED ON RBF NEURAL NETWORK FOR TWO TANKS INTERACTING SYSTEM

Pham Thanh Tung<sup>1\*</sup>, Nguyen Chi Ngon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vinh Long University of Technology Education

<sup>2</sup>Can Tho University

| ARTICLE INFO                         | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Received:</b> 01/8/2021           | In this paper, an adaptive radial basis function neural network (RBFNN) is proposed to deal with chattering reduction problem in sliding mode control for the two tanks interacting system. The RBFNN is used to approximate the function in the sliding mode control. The signum function in the sliding mode control is replaced by tanh function to test the performance of the chattering reduction problem. The stability of the proposed algorithm is proved by the Lyapunov theory. To show the suitability of the proposed algorithm, the simulation results in MATLAB/Simulink of this method are compared to the fuzzy control, sliding mode control with conditional integrals, fuzzy PID control and the conventional PID control. The comparison results show that the proposed controller is more effective with the rise time is 0.1271 (s), the percent overshoot is 0 (%), the steady state error converges to zero, the settling time is 0.2464 (s) and the chattering is eliminated. |
| <b>Revised:</b> 27/8/2021            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Published:</b> 27/8/2021          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>KEYWORDS</b>                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Sliding mode control                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Adaptive                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Radial basis function neural network |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Two tanks interacting system         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| MATLAB/Simulink                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

## ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI SỬ DỤNG MẠNG NƠ-RON RBF HỆ THỐNG BỒN ĐÔI TƯƠNG TÁC

Phạm Thanh Tùng<sup>1\*</sup>, Nguyễn Chí Ngôn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>2</sup>Trường Đại học Cần Thơ

| THÔNG TIN BÀI BÁO                 | TÓM TẮT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ngày nhận bài:</b> 01/8/2021   | Trong bài báo này, điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF (radial basis neural network) được đề xuất cùng với bài toán giảm chattering trong điều khiển trượt hệ thống bồn đôi tương tác. Mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm trong luật điều khiển trượt. Hàm signum trong luật điều khiển trượt được thay thế bởi hàm tanh để kiểm chứng hiệu quả của bài toán giảm chattering. Tính ổn định của giải thuật đề xuất được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Để chứng minh hiệu quả của phương pháp đề xuất, các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink của phương pháp này được so sánh với điều khiển mờ, điều khiển trượt với điều kiện tích phân, điều khiển PID mờ và điều khiển vi tích phân tỷ lệ (PID) truyền thống. Các kết quả so sánh cho thấy rằng, bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn với thời gian tăng là 0,1271 (s), không có vọt lố, triệt tiêu sai số xác lập, thời gian xác lập là 0,2464 (s) và không xảy ra hiện tượng chattering. |
| <b>Ngày hoàn thiện:</b> 27/8/2021 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Ngày đăng:</b> 27/8/2021       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>TỪ KHÓA</b>                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Điều khiển trượt                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Thích nghi                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Mạng nơ-ron RBF                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Hệ thống bồn đôi tương tác        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| MATLAB/Simulink                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4823>

\* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Điều khiển trượt (SMC) là một trong những kỹ thuật điều khiển bền vững, bất biến với sự thay đổi của các tham số mô hình và nhiễu [1]-[6]. Sự ổn định của SMC có thể được đảm bảo bằng cách tạo ra các điều kiện ổn định. Ngoài ra, hiệu quả động học mong muốn có thể đạt được bằng cách lựa chọn và thiết kế mặt trượt thích hợp [1]. Tuy nhiên, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng chattering [1], [7], [8]. Hiện tượng chattering do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng [8].

Mạng nơ-ron RBF là một kiểu của mạng truyền thẳng nhiều lớp và có 3 lớp: lớp vào, lớp ẩn và lớp ra [9]. Mạng này mang lại hiệu quả xấp xỉ tốt và có khả năng tối ưu toàn cục [4], [5], cấu trúc đơn giản và khả năng học nhanh [5], [6], [10]. Các nút nguồn có trong lớp đầu vào thiết lập kết nối giữa mạng và môi trường. Trong lớp ẩn, một tập hợp của các hàm kích hoạt được cung cấp thông qua các đơn vị ẩn. Các đơn vị này là các nút ẩn [10]. Các nơ-ron ở lớp ẩn được kích hoạt bằng hàm cơ sở xuyên tâm, mỗi nút ẩn chứa vector tâm  $c$  cùng thứ nguyên với vector ngõ vào  $x$ , khoảng cách Euclidean giữa tâm và vector ngõ vào  $x$  được định nghĩa bởi  $\|x(t) - c_j(t)\|$  [9].

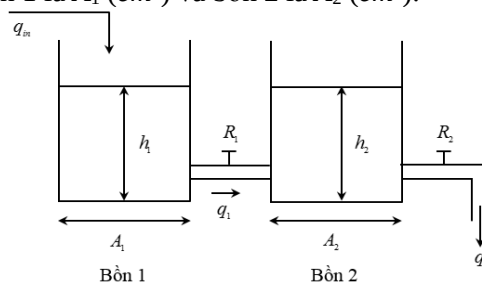
Hệ thống bồn đôi tương tác được ứng dụng phổ biến trong ngành công nghiệp dầu khí, hóa chất, dược phẩm và chế biến thực phẩm [11], xử lý nước thải, hệ thống lọc nước, nhà máy điện hạt nhân và thiết bị phân phối, bổ sung chất lỏng tự động [12]. Các nhà nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp điều khiển hệ thống này như bộ điều khiển PID và logic mờ đã được thiết kế trong nghiên cứu [11], trong [12], [13] đã thiết kế bộ điều khiển trượt sử dụng điều kiện tích phân, điều khiển trượt trong [14], trong [15] đã so sánh bộ điều khiển PID với điều khiển trượt và điều khiển trượt bậc hai được thực hiện trong [16], [17].

Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt với hàm  $\tanh$  sẽ được thiết kế để đảm bảo mực chất lỏng thực tế của hệ thống bồn đôi tương tác hội tụ về mực chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn và loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm  $f(x)$  trong luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và xác định luật thích nghi. Các trọng số của mạng RBF được cập nhật trực tuyến dựa trên các tín hiệu hồi tiếp ở ngõ ra. Để chứng minh hiệu quả của phương pháp đề xuất, các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink của phương pháp này được so sánh với điều khiển mờ, điều khiển trượt với điều kiện tích phân, điều khiển PID mờ và điều khiển PID truyền thống.

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần: phần kế tiếp trình bày mô hình toán học của hệ thống bồn đôi tương tác, bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF được trình bày ở phần 3, phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng và đánh giá, kết luận là phần 5.

## 2. Mô hình toán học của hệ thống bồn đôi tương tác

Mô hình hệ thống bồn đôi tương tác được trình bày như Hình 1 [11]. Chiều cao của mực chất lỏng là  $h_1$  (cm) trong bồn 1 và  $h_2$  (cm) trong bồn 2. Lưu lượng thể tích vào bồn 1 là  $q_{in}$  ( $cm^3/min$ ), tốc độ thể tích dòng chảy từ bồn 1 là  $q_1$  ( $cm^3/min$ ) và tốc độ thể tích dòng chảy từ bồn 2 là  $q_o$  ( $cm^3/min$ ). Diện tích của bồn 1 là  $A_1$  ( $cm^2$ ) và bồn 2 là  $A_2$  ( $cm^2$ ).



Hình 1. Mô hình hệ thống bồn đôi tương tác [11]

Hàm truyền đạt của hệ thống bồn đôi tương tác như (1) [11]:

$$G(s) = \frac{h_2(s)}{q_{in}(s)} = \frac{R_2}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + A_1 R_2)s + 1} \quad (1)$$

Với hằng số thời gian của bồn 1 là  $T_1 = A_1 R_1$  và hằng số thời gian của bồn 2 là  $T_2 = A_2 R_2$

Đặt:  $a = R_2; b = T_1 T_2; c = T_1 + T_2 + A_1 R_2$

Đặt các biến trạng thái như (2) và (3):

$$x_1(t) = h_2(t) \quad (2)$$

$$x_2(t) = \dot{x}_1(t) = \dot{h}_2(t) \quad (3)$$

Lấy đạo hàm 2 về (3), ta được (4):

$$\dot{x}_2(t) = \ddot{h}_2(t) = -\frac{1}{b}x_1(t) - \frac{c}{b}x_2(t) + \frac{a}{b}q_{in}(t) \quad (4)$$

$$\text{Hay:} \quad \dot{x}_2(t) = -f(x) + \frac{a}{b}q_{in}(t) \quad (5)$$

$$\text{Với } f(x) = \frac{1}{b}x_1(t) + \frac{c}{b}x_2(t)$$

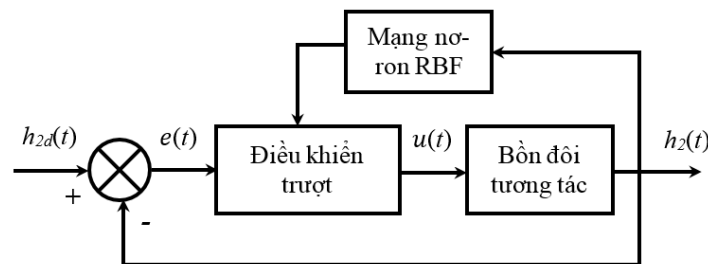
Ta được không gian trạng thái của hệ thống bồn đôi tương tác như (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{b} & -\frac{c}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a}{b} \end{bmatrix} q_{in}(t) \quad (6)$$

$$h_2(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + 0q_{in}(t)$$

### 3. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF (ASMCRBF) được trình bày như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển ASMCRBF

Bộ điều khiển trượt được thiết kế để điều khiển bám mục chất lỏng của hệ thống bồn đôi tương tác và loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm  $f(x)$  trong luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và xác định luật thích nghi.

#### 3.1. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Mặt trượt được định nghĩa như (7) [7], [9]:

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (7)$$

Sai số bám và đạo hàm của nó như (8), (9) và (10):

$$e(t) = h_{2d}(t) - h_2(t) = h_{2d}(t) - x_1(t) \quad (8)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{h}_{2d}(t) - \dot{h}_2(t) = \dot{h}_{2d}(t) - \dot{x}_2(t) \quad (9)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{h}_{2d}(t) - \ddot{h}_2(t) = \ddot{h}_{2d}(t) - \ddot{x}_2(t) \quad (10)$$

Trong đó:  $h_{2d}(t)$  là mực chất lỏng tham chiếu,  $h_2(t)$  là mực chất lỏng thực tế.

Đạo hàm 2 vế của (7) ta được (11):

$$\dot{S}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) - \ddot{x}_2(t) \quad (11)$$

Thế (5) vào (11), ta được (12):

$$\dot{S}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + f(x) - \frac{a}{b} q_{in}(t) \quad (12)$$

Luật tiếp cận tốc độ hằng như (13):

$$u_{sw}(t) = \frac{b}{a} \eta \text{sign}(S(t)) \quad (13)$$

Lúc này, luật điều khiển trượt như (14):

$$u_{SMC}(t) = \frac{b}{a} [\lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + f(x)] + \frac{b}{a} \eta \text{sign}(S(t)) \quad (14)$$

Hàm  $\tanh$  được sử dụng để thay thế hàm  $\text{signum}$  trong (14) để kiểm chứng hiệu quả giảm chattering. Do đó, luật điều khiển trượt hệ thống bồn đôi tương tác với hàm  $\tanh$  như (15):

$$u_{SMC}(t) = \frac{b}{a} [\lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + f(x)] + \frac{b}{a} \eta \tanh(S(t)) \quad (15)$$

Luật điều khiển (15) đảm bảo mực chất lỏng thực tế của hệ thống hội tụ về mực chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn và loại bỏ hiện tượng chattering.

### 3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF

#### 3.2.1. Xấp xỉ hàm $f(x)$ sử dụng mạng nơ-ron RBF

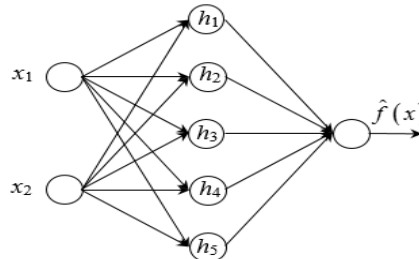
Mạng nơ-ron RBF thường được sử dụng để xấp xỉ hàm chưa biết. Trong phần này, nghiên cứu sẽ sử dụng mạng RBF để xấp xỉ  $f(x)$  trong luật điều khiển (14). Thuật toán của mạng nơ-ron RBF như (16) và (17) [7], [9]:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (16)$$

$$f = W^{*T} h(x) + \varepsilon \quad (17)$$

Trong đó:  $x$  là tín hiệu ngõ vào của mạng nơ-ron RBF,  $i$  là số ngõ vào của mạng,  $j$  là số nơ-ron lớp ẩn của mạng,  $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$  là ngõ ra của hàm Gaussian,  $W^*$  là giá trị trọng số lý tưởng của mạng,  $\varepsilon$  là sai số xấp xỉ của mạng và  $\varepsilon \leq \varepsilon_N$ .

Sơ đồ cấu trúc mạng nơ-ron RBF để xấp xỉ  $f(x)$  được trình bày như Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc mạng nơ-ron RBF

Trong đó:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T; \mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5]^T; \mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5]^T$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \end{bmatrix}; \mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5]^T$$

$$\text{Ngõ ra của mạng nơ-ron RBF được cho bởi (18): } \hat{f}(x) = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (18)$$

### 3.2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF

Sau khi hàm  $f(x)$  được xấp xỉ bằng mạng nơ-ron RBF, bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF (ASMCRBF) được thiết kế như (19):

$$u_{ASMCRBF}(t) = \frac{b}{a} \left[ \lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + \hat{f}(x) \right] + \frac{b}{a} \eta \text{sign}(S(t)) \quad (19)$$

Với hàm  $\tanh$ , (19) trở thành (20):

$$u_{ASMCRBF}(t) = \frac{b}{a} \left[ \lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + \hat{f}(x) \right] + \frac{b}{a} \eta \tanh(S(t)) \quad (20)$$

$$\text{Để chứng minh ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (21): } V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} \quad (21)$$

Trong đó:  $\gamma > 0$ ,  $\tilde{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W}^*$

$$\text{Vì } f(x) - \hat{f}(x) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(x) + \varepsilon - \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) = -\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) + \varepsilon$$

$$\text{Nên } \dot{V} = S\dot{S} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = S \left( \lambda \dot{e}(t) + \ddot{h}_{2d}(t) + f(x) - \frac{a}{b} q_{in}(t) \right) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \quad (22)$$

Lúc này:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = S \left( f(x) - \hat{f}(x) - \eta \text{sign}(S) \right) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \\ &= S \left( -\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(x) + \varepsilon - \eta \text{sign}(S) \right) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = \varepsilon S - \eta |S| + \tilde{\mathbf{W}}^T \left( \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} - \mathbf{Sh}(x) \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{Suy ra luật thích nghi như (24): } \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = \gamma \mathbf{Sh}(x) \quad (24)$$

Nếu ta chọn  $\eta > |\varepsilon|_{\max}$  thì  $\dot{V} = \varepsilon S - \eta |S| \leq 0$

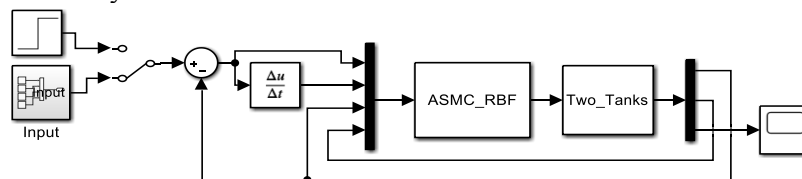
Từ các phân tích trên, ta thấy rằng sai số xấp xỉ RBF có thể bị vượt qua bởi giới hạn  $\eta \text{sign}(S)$ .

Khi  $\dot{V} \equiv 0$ , ta có  $S \equiv 0$ , hệ kín sẽ ổn định tiệm cận theo nguyên tắc LaSalle,  $S \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$  và độ hội tụ có liên quan đến  $\eta$

Vì  $V \geq 0$ ,  $\dot{V} \leq 0$ ,  $V$  bị giới hạn khi  $t \rightarrow \infty$ , vì thế  $\tilde{\mathbf{W}}$  cũng giới hạn.

## 4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển ASMCRBF với MATLAB/Simulink cho hệ thống bồn đôi tương tác được trình bày như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển ASMCRBF

Bảng 1 trình bày các thông số của hệ thống bồn đôi tương tác, các thông số của bộ điều khiển ASMCRBF được trình bày trong Bảng 2.

**Bảng 1.** Các thông số của hệ thống bồn đôi tương tác

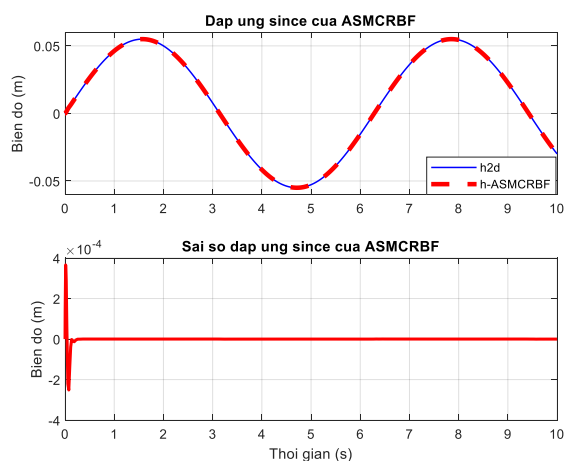
| Thông số | $A_1$  | $A_2$  | $R_1$     | $R_2$     |
|----------|--------|--------|-----------|-----------|
| Giá trị  | 0,0145 | 0,0145 | 1478,57   | 642,86    |
| Đơn vị   | $m^2$  | $m^2$  | $sec/m^2$ | $sec/m^2$ |

**Bảng 2.** Các thông số của bộ điều khiển ASMCRBF

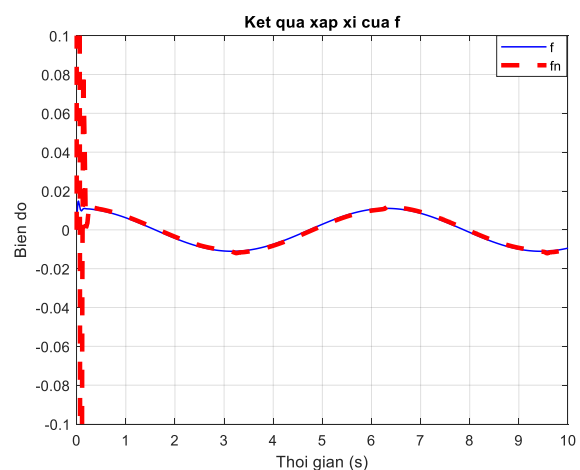
| Thông số  | Ý nghĩa             | Giá trị                                                                            |
|-----------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $b$       | Ngưỡng của mạng RBF | 0,5                                                                                |
| $c$       | Tâm của mạng RBF    | $\begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$ |
| $\lambda$ |                     | 15                                                                                 |
| $\gamma$  |                     | 5000                                                                               |
| $\eta$    |                     | 30                                                                                 |

Kết quả đáp ứng và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF với ngõ vào hình sine được trình bày ở Hình 5. Quan sát kết quả trên Hình 5 ta thấy rằng, mức chất lỏng thực tế của hệ thống bồn đôi tương tác hội tụ về mức chất lỏng mong muốn ( $h_{2d} = 0,055m$ ) với sai số xác lập tiến về 0. Hình 6 trình bày kết quả  $f_n(x)$  xấp xỉ hàm  $f(x)$  sử dụng mạng nơ-ron RBF với sai số xấp xỉ hội tụ về 0. Kết quả này đã chứng minh hiệu quả của mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm  $f(x)$  trong nghiên cứu này.

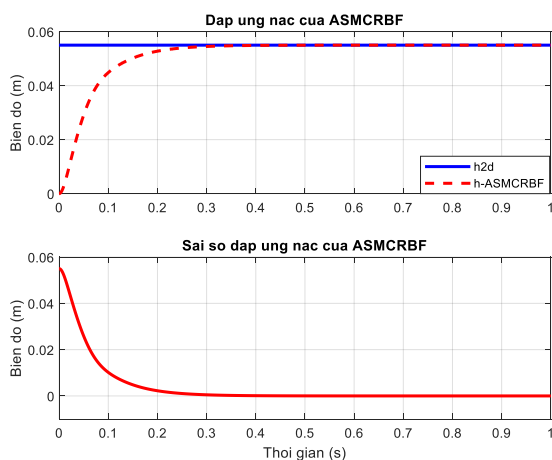
Hình 7 trình bày đáp ứng nấc và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF cho hệ thống bồn đôi tương tác. Mức chất lỏng thực tế của hệ thống hội tụ về mức chất lỏng mong muốn với thời gian tăng là 0,1271 (s), thời gian xác lập là 0,2464 (s), triệt tiêu được sai số xác lập và độ vọt lố. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển ASMCRBF được trình bày trong Bảng 3 và được so sánh với điều khiển mờ, điều khiển trượt với điều kiện tích phân, điều khiển PID mờ và điều khiển PID truyền thống. Kết quả trình bày ở Bảng 3 cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển ASMCRBF tốt hơn bộ điều khiển mờ, điều khiển trượt với điều kiện tích phân, điều khiển PID mờ và bộ điều khiển PID truyền thống. Hình 8 trình bày tín hiệu điều khiển của ASMCRBF với hàm *signum* và hàm *tanh* tương ứng. Tín hiệu điều khiển được trình bày ở Hình 8 cho thấy hiệu quả của hàm *tanh* trong việc loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt.



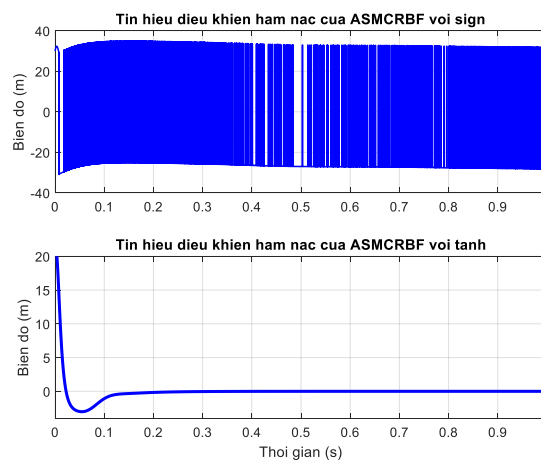
**Hình 5.** Đáp ứng since và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF



**Hình 6.** Kết quả xấp xỉ hàm  $f(x)$  sử dụng mạng nơ-ron RBF



**Hình 7.** Đáp ứng nấc và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF

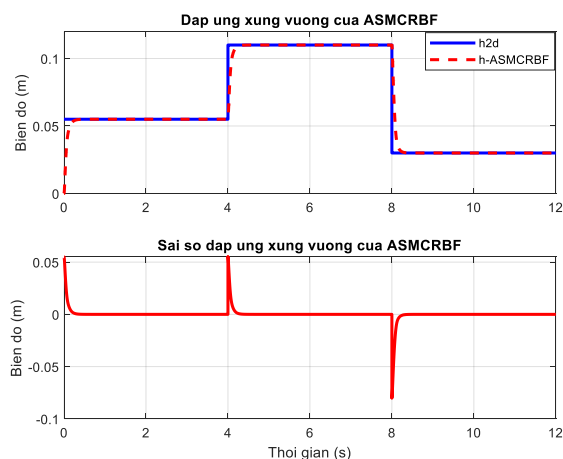


**Hình 8.** Tín hiệu điều khiển của ASMCRBF với hàm signum và hàm tanh

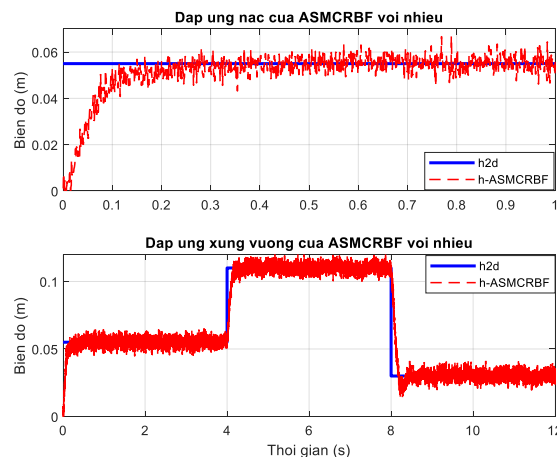
**Bảng 3.** Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển ASMCRBF

| Bộ điều khiển            | ASMCRB<br>F | Điều khiển<br>mờ [11] | Điều khiển<br>trượt [15] | Điều khiển<br>PID mờ [18] | Điều khiển trượt với<br>điều kiện tích phân [12] |
|--------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|
| Thời gian tăng (s)       | 0,1271      | 33                    | -                        | 1,5                       | 87,184                                           |
| Độ vọt lố (%)            | 0           | 1,45                  | 0                        | 0                         | 1,6                                              |
| Sai số xác lập           | 0           | -                     | -                        | 0                         | -                                                |
| Thời gian xác<br>lập (s) | 0,2464      | 47,2                  | 7,6                      | 3,1                       | 330                                              |

Kết quả đáp ứng và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF với ngõ vào xung vuông được trình bày ở Hình 9. Quan sát kết quả trên Hình 9 ta thấy rằng, mức chất lỏng thực tế của hệ thống bồn đôi tương tác hội tụ về mức chất lỏng mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0. Hình 10 trình bày kết quả đáp ứng với hàm nấc và xung vuông của bộ điều khiển ASMCRBF trong trường hợp nhiễu trắng tác động ở ngõ ra của hệ thống. Kết quả này đã chứng minh tính bền vững của bộ điều khiển đề xuất trong điều khiển hệ thống bồn đôi tương tác.



**Hình 9.** Đáp ứng xung vuông và sai số của bộ điều khiển ASMCRBF



**Hình 10.** Đáp ứng với hàm nấc và xung vuông của bộ điều khiển ASMCRBF trong trường hợp nhiễu trắng tác động ở ngõ ra

Qua các kết quả được trình bày từ Hình 5 đến Hình 10 cho thấy bộ điều khiển ASMC RBF được lựa chọn trong nghiên cứu đã điều khiển bám tốt mực chất lỏng của hệ thống bồn đôi tương tác, loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt và bền vững với sự tác động của nhiễu ở ngõ ra.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron RBF để điều khiển bám mực chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác. Mạng nơ-ron RBF được sử dụng để xấp xỉ hàm  $f(x)$  trong luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và xác định luật thích nghi. Các trọng số của mạng RBF được cập nhật trực tuyến dựa trên các tín hiệu hồi tiếp ở ngõ ra. Hàm *signum* được thay thế bởi hàm *tanh* đã loại bỏ hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink của phương pháp đề xuất được so sánh với điều khiển mờ, điều khiển trượt với điều kiện tích phân, điều khiển PID mờ và điều khiển PID truyền thống. Tính bền vững của phương pháp này cũng được kiểm chứng với nhiễu tác động ở ngõ ra. Các kết quả đạt được chứng minh bộ điều khiển ASMC RBF hiệu quả và phù hợp điều khiển hệ thống bồn đôi tương tác.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. B. Kadu, A. Khandekar, and C. Patil, "Design of sliding mode controller with PI sliding surface for robust regulation and tracking of process control systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 140, pp. 1-11, 2018.
- [2] A. Yadav, A. K. Sharma, and B. Bhushan, "Sliding Mode Control with RBF Neural Network for Two Link Robot Manipulator," *International Journal of Computer Applications*, vol. 178, no. 52, pp. 31-36, 2019.
- [3] W. Kh. Alqaisi, B. Brahmi, J. Ghommam, M. Saad, and V. Nerguizian, "Adaptive Sliding Mode Control Based on RBF Neural Network Approximation for Quadrotor," *IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2019, pp. 1-7.
- [4] Y. Tao, J. Zheng, and L. Yuanchang, "A Sliding Mode Control-Based on a RBF Neural Network for Deburring Industry Robotic Systems," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 8, pp. 1-10, 2016.
- [5] A. S. Pundir and K. Singh, "Chattering Free Sliding Mode Control with Observer Based Adaptive Radial Basis Function Neural Network for Temperature Tracking in a Fixed Bed Reactor," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 17, pp. 1-24, 2019.
- [6] H. Zhang and Y. Liu, "Adaptive RBF neural network based on sliding mode controller for active power filter," *Int. J. Power Electronics*, vol. 11, no. 4, pp. 460-481, 2020.
- [7] J. Liu, *Sliding mode control using MATLAB*. Published by Elsevier Inc, 2017.
- [8] H. U. Suleiman, M. B. Mu'azu, T. A. Zarma, A. T. Salawudeen, S. Thomas, and A. A. Galadima, "Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System," *International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 2018, pp. 1-9.
- [9] J. Liu, *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems*. Springer, 2013.
- [10] Z. A. Khan, L. Khan, S. Ahmad, S. Mumtaz, M. Jafar, and Q. Khan, "RBF neural network based backstepping terminal sliding mode MPPT control technique for PV system," *PLoS ONE*, vol. 16, no. 4, pp. 1-23, 2021.
- [11] M. Changela and A. Kumar, "Designing a Controller for Two Tank Interacting System," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, pp. 589-593, 2013.
- [12] S. B. Prusty, S. Seshagiri, U. C. Pati, and K. K. Mahapatra, "Sliding Mode Control of Coupled Tank Systems Using Conditional Integrators," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 1, pp. 118-125, 2020.
- [13] S. B. Prusty, S. Seshagiri, U. C. Pati, and K. K. Mahapatra, "Sliding Mode Control of Coupled Tanks using Conditional Integrators," *Indian Control Conference (ICC)*, 2016, pp. 146-151.
- [14] V. R. Ravi, M. Monica, S. Amuthameena, S. K. Divya, S. Jayashree, and J. Varshini, "Sliding mode controller for two conical tank interacting level system," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 573, pp. 273-278, 2014.



- [15] T. Toms and D. Hepsiba, "Comparison of PID Controller with a Sliding Mode Controller for a Coupled Tank System," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 2, pp. 151-154, 2014.
- [16] F. A. Khadra and J. A. Qudeiri, "Second Order Sliding Mode Control of the Coupled Tanks System," *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, pp. 1-9, 2015.
- [17] B. A. Reddy and P. V. Krishna, "Comparison of Second Order Sliding Mode Control Strategies for Coupled Tank System," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, no. 6S3, pp. 344-349, 2019.
- [18] L. M. Trinh, "Liquid Level Control of Coupled-Tank System Using Fuzzy-Pid Controller," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 11, pp. 459-464, 2017.