

## ADAPTIVE SLIDING MODE NEURAL NETWORK CONTROL BASED ON EXPONENTIAL REACHING LAW FOR THE MASS SPRING DAMPER SYSTEM

Pham Thanh Tung<sup>1\*</sup>, Ma So Hien<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Bac Lieu Vocational College

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Received:</b> 29/9/2021</p> <p><b>Revised:</b> 11/11/2021</p> <p><b>Published:</b> 15/11/2021</p>	<p>An adaptive sliding mode radial basis function neural network (RBFNN) control based on exponential reaching law for a mass spring damper system is investigated in this study. The mass spring damper system is widely used in different areas of engineering field applications, especially in automation and mechatronics applications. The sliding mode control based on exponential reaching law is designed to ensure the actual position of the system follows the reference position and reduce chattering. The radial function basis neural networks are trained and used to approximate the <math>f(x)</math> function in the sliding mode control law. In addition, the parameters of the radial function basis neural networks are updated during the operation by using the Gradient Descent algorithm. By choosing a proper Lyapunov function, the stability of the controller can be proven and the adaptive law can be derived easily. Simulation results in MATLAB/Simulink show that the proposed algorithm is effective without steady-state error, the overshoot is 0 (%), the settling time is about 0.3168 (s) and the rising time achieves 0.1804 (s).</p>
<p><b>KEYWORDS</b></p> <p>Sliding mode control</p> <p>Adaptive</p> <p>Radial basis function neural network</p> <p>Mass spring damper system</p> <p>MATLAB/Simulink</p>	

## ĐIỀU KHIỂN MẠNG NƠ-RON TRƯỢT THÍCH NGHI SỬ DỤNG LUẬT TIẾP CẬN HÀM MŨ HỆ THỐNG GIẢM XÓC – VẬT – Lò XO

Phạm Thanh Tùng<sup>1\*</sup>, Mã Sở Hiến<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Trường Cao đẳng nghề Bạc Liêu

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p><b>Ngày nhận bài:</b> 29/9/2021</p> <p><b>Ngày hoàn thiện:</b> 11/11/2021</p> <p><b>Ngày đăng:</b> 15/11/2021</p>	<p>Điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi sử dụng luật tiếp cận hàm mũ cho hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được đề xuất trong nghiên cứu này. Hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật, đặc biệt trong các ứng dụng Tự động hóa và Cơ điện tử. Bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ được thiết kế để đảm bảo vị trí thực tế của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo bám theo vị trí tham chiếu và hạn chế hiện tượng chattering. Mạng nơ-ron RBF được huấn luyện và sử dụng để xấp xỉ hàm <math>f(x)</math> trong luật điều khiển trượt. Các trọng số của mạng nơ-ron RBF được cập nhật trực tuyến bằng giải thuật Gradient Descent dựa trên các tín hiệu hồi tiếp ở ngõ ra. Bằng cách chọn hàm Lyapunov phù hợp, tính ổn định của bộ điều khiển được chứng minh và tìm được luật điều khiển thích nghi. Kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của giải thuật đề xuất với sai số bám tiến về 0, độ vọt lố là 0 (%), thời gian xác lập khoảng 0,3168 (s) và thời gian tăng đạt 0,1804 (s).</p>
<p><b>TỪ KHÓA</b></p> <p>Điều khiển trượt</p> <p>Thích nghi</p> <p>Mạng nơ-ron RBF</p> <p>Hệ thống giảm xóc – vật – lò xo</p> <p>MATLAB/Simulink</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5093>

\* Corresponding author. Email: masohien2009@gmail.com

## 1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật [1], đặc biệt là trong các ứng dụng: điều khiển tay máy robot, hệ thống treo xe bus và các ứng dụng trong điều khiển vị trí [2], [3]; trong việc giảm rung động, trong phân tích hệ thống điều khiển và trong máy phát điện [4]. Các ứng dụng của hệ giảm xóc – vật – lò xo đều cung cấp độ tin cậy cao hơn như tăng các hệ số an toàn hoặc hấp thụ các lực tác động [1]. Vì thế, hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được nhiều nhà khoa học quan tâm và nghiên cứu, tiêu biểu như: nghiên cứu [1] đã sử dụng kỹ thuật cuộn chiều; nhóm tác giả trong [2] đã tiến hành đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển PID và LQR; trong [3] đã thực hiện mô phỏng với Simulink, Simelectronics và điều khiển PD cho hệ này; nghiên cứu [4] đã phân tích sự sản sinh entropi và đáp ứng động sử dụng toán tử phân số phù hợp; nghiên cứu [5] đã mô phỏng hệ thống giảm xóc – vật – lò xo trong biên pha; trong [6] đã xác định các thông số tối ưu của bộ điều khiển PID tuyến tính và phi tuyến, các bộ điều khiển P, PI, PD và PID đã được thiết kế trong [7].

Điều khiển cấu trúc thay đổi (Variable Structure Control - VSC) với điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) được đề xuất và xây dựng trong những năm 1950 tại Soviet Union bởi Emelyanov và một vài nhà nghiên cứu như Utkins và Itkis [8]. Đây là một trong các phương pháp điều khiển hiệu quả hệ thống với ưu điểm là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống nhiễu hoặc thông số của mô hình thay đổi theo thời gian [9]-[11]. Tuy nhiên, để thiết kế được bộ điều khiển trượt, người thiết kế cần biết chính xác mô hình của đối tượng [9], [10]. Trong thực tế, vấn đề này không phải lúc nào cũng thực hiện được. Hơn thế nữa, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng dao động quanh mặt trượt.

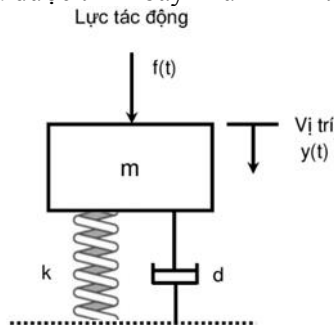
Nghiên cứu này sử dụng luật tiếp cận hàm mũ để xác định luật điều khiển trượt và mạng nơ-ron RBF được đề xuất sử dụng để ước lượng các hàm trong luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và xác định luật thích nghi. Các trọng số của mạng RBF được cập nhật trực tuyến dựa trên các tín hiệu hồi tiếp ở ngõ ra.

Bài báo này được tổ chức gồm 4 phần: điều khiển trượt dựa vào mạng nơ-ron RBF hệ thống giảm xóc – vật – lò xo được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink và đánh giá, kết luận là phần 4.

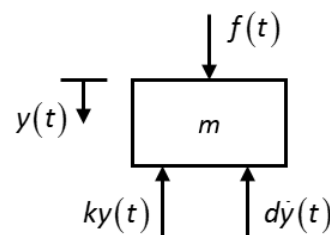
## 2. Điều khiển trượt dựa vào mạng nơ-ron RBF hệ thống giảm xóc – vật – lò xo

### 2.1. Mô hình toán học của hệ thống

Mô hình hệ thống giảm xóc – vật – lò xo gồm vật có khối lượng  $m$ ; hệ số giảm xóc  $d$  và lò xo với độ cứng  $k$  được trình bày như Hình 1. Hình 2 trình bày sơ đồ thân tự do của hệ thống [5].



Hình 1. Mô hình hệ thống giảm xóc – vật – lò xo [5]



Hình 2. Sơ đồ thân tự do của hệ thống [5]

Phương trình trạng thái của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo như (1) và (2) [5]:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t) = -f(x) + \frac{1}{m}u(t) \quad (2)$$

Với:  $f(x) = \frac{k}{m}x_1(t) + \frac{d}{m}x_2(t)$  và  $u(t) = f(t)$

Phương trình ngõ ra như (3):

$$y(t) = x_1(t) \quad (3)$$

Hay không gian trạng thái của hệ thống được mô tả như (4):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{C} = [1 \ 0]$

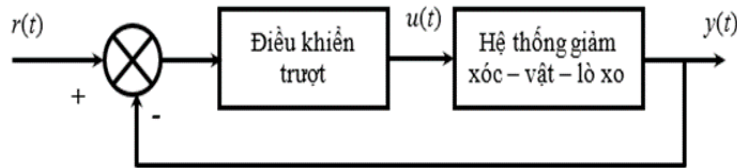
Với:  $m$  là khối lượng của vật (kg);  $d$  là hệ số giảm xóc (Ns/m) và  $k$  là độ cứng lò xo (N/m).

$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$  là vector trạng thái,  $x_1(t) = y(t)$  là tín hiệu ngõ ra – vị trí của vật,  $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$  là vận tốc của vật,  $f(t) = u(t)$  là tín hiệu ngõ vào.

## 2.2. Điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ

Bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ được thiết kế để điều khiển bám vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo đảm bảo tính ổn định và thỏa mãn các chỉ tiêu chất lượng.

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ được trình bày như Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận hàm mũ

Định nghĩa mặt trượt như (5) [8]:

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (5)$$

Trong đó:  $\lambda > 0$  là thông số hiệu quả đảm bảo hệ thống ổn định.

Sai số bám được định nghĩa như (6):

$$e(t) = y_d(t) - y(t) = y_d(t) - x_1(t) \quad (6)$$

Đạo hàm của sai số bám như (7):

$$\dot{e}(t) = \dot{y}_d(t) - \dot{y}(t) = \dot{y}_d(t) - x_2(t) \quad (7)$$

Trong đó:  $y_d(t)$  là vị trí tham chiếu,  $y(t)$  là vị trí thực tế của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo.

Đạo hàm của mặt trượt như (8):

$$\dot{S}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) - \ddot{y}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) - \ddot{x}_2(t) \quad (8)$$

Thay (2) vào (8), ta được (9):

$$\dot{S}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + f(x) - \frac{1}{m}u(t) \quad (9)$$

Với luật điều khiển chuyển mạch tốc độ hàm mũ được mô tả như (10) [8]:

$$\dot{S}(t) = -\eta \text{sign}(S(t)) - kS(t) \quad (10)$$

Với  $\eta > 0, k > 0$

Ta được luật điều khiển trượt với tốc độ hàm mũ được mô tả như (11):

$$u_{SMC}(t) = m \left[ \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + f(x) + \eta \text{sign}(S(t)) + kS(t) \right] \quad (11)$$

Luật điều khiển trượt (11) đảm bảo vị trí thực tế của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo bám theo vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn.

**2.3. Điều khiển trượt dựa vào mạng nơ-ron RBF cho hàm chưa biết  $f(x)$**

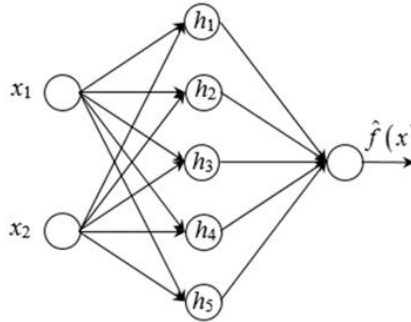
Mạng nơ-ron RBF thường được sử dụng để xấp xỉ hàm chưa biết. Trong phần này, nghiên cứu sẽ sử dụng mạng nơ-ron RBF để xấp xỉ  $f(x)$  trong luật điều khiển (11). Thuật toán của mạng RBF như sau [8]:

$$h_j = \exp \left( - \frac{\| \mathbf{x} - \mathbf{c}_j \|^2}{2b_j^2} \right) \quad (12)$$

$$f = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \varepsilon \quad (13)$$

Trong đó:  $\mathbf{x}$  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,  $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$  là ngõ ra của hàm Gaussian,  $\mathbf{W}^*$  là giá trị trọng số mong muốn 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 4.



**Hình 4.** Cấu trúc mạng nơ-ron RBF

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

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

Ngõ ra của mạng nơ-ron RBF được cho bởi (14):  $f(x) = \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (14)$

Trong đó:  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  là hàm Gaussian của mạng nơ-ron RBF.

Sau khi hàm  $f(x)$  được xấp xỉ bằng mạng nơ-ron RBF, bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi sử dụng luật tiếp cận hàm mũ (ASMC\_RBF) được thiết kế như (15):

$$u_{ASMC\_RBF}(t) = m \left[ \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + f(x) + \eta \text{sign}(S(t)) + kS(t) \right] \quad (15)$$

Thế (15) vào (9), ta được (16):

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + f(x) - \frac{1}{m} m \left[ \lambda \dot{e}(t) + \ddot{y}_d(t) + f(x) + \eta \text{sign}(S(t)) + kS(t) \right] \\ &= f(x) - f(x) - \eta \text{sign}(S(t)) - kS(t) = f(x) - \eta \text{sign}(S(t)) - kS(t) \end{aligned} \quad (16)$$

Trong đó:  $f(x) = f(x) - f(x) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \varepsilon - \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \varepsilon$

Và  $\mathbf{W} = \mathbf{W}^* - \mathbf{W}$

Để chứng minh ổn định, định nghĩa hàm Lyapunov như (17):  $V = \frac{1}{2}S^2 + \frac{1}{2}\gamma\mathbf{W}^T\mathbf{W}$  (17)

Trong đó:  $\gamma > 0$ . Đạo hàm của (17) và từ (15), (16), ta có (18):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} + \gamma\mathbf{W}^T\dot{\mathbf{W}} = S(f(x) - \eta\text{sign}(S) - kS) - \gamma\mathbf{W}^T\dot{\mathbf{W}} \\ &= S(\mathbf{W}^T\mathbf{h}(x) + \varepsilon - \eta\text{sign}(S) - kS) - \gamma\mathbf{W}^T\dot{\mathbf{W}} \\ &= \mathbf{W}^T\left(\mathbf{S}\mathbf{h}(x) - \gamma\dot{\mathbf{W}}\right) + S(\varepsilon - \eta\text{sign}(S) - kS) \end{aligned} \quad (18)$$

Suy ra luật thích nghi như (19):

$$\dot{\mathbf{W}} = \frac{1}{\gamma}\mathbf{S}\mathbf{h}(x) \quad (19)$$

Lúc này:

$$\dot{V} = S(\varepsilon - \eta\text{sign}(S) - kS) = S(\varepsilon - kS) - \eta|S| \quad (20)$$

Do sai số xấp xỉ  $\varepsilon$  bị hạn chế và đủ nhỏ, ta có thể thiết kế  $\eta \geq \varepsilon_N + \eta_0, \eta_0 > 0$ ; vì thế, ta có thể tìm được  $\dot{V} \leq -\eta_0|S| \leq 0$ .

Từ  $\dot{V} \leq -\eta_0|S| \leq 0$ , ta có (21):

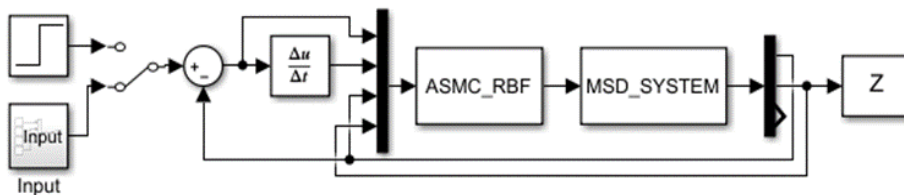
$$\int_0^t \dot{V} dt \leq -\eta_0 \int_0^t |S| dt, \text{ i.e. } V(t) - V(0) \leq -\eta_0 \int_0^t |S| dt \quad (21)$$

Thì  $V$  bị giới hạn,  $S$  và  $\mathbf{W}$  cũng bị giới hạn, từ biểu thức  $\dot{S}$ ,  $\dot{\mathbf{W}}$  bị giới hạn và  $\int_0^\infty |S| dt$  bị giới hạn. Từ bổ đề Barbalat, khi  $t \rightarrow \infty$ , ta có  $S \rightarrow 0$  thì  $e(t) \rightarrow 0, \dot{e}(t) \rightarrow 0$ .

Vì  $V$  bị giới hạn khi  $t \rightarrow \infty$ ,  $\mathbf{W}$  bị giới hạn. Vì khi  $\dot{V} \equiv 0$ , ta không thể có  $\mathbf{W} \equiv 0$ ,  $\mathbf{W}$  không thể hội tụ đến  $\mathbf{W}^*$

### 3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi sử dụng luật tiếp cận hàm mũ được trình bày như Hình 5:



Hình 5. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển đề xuất

Các thông số của bộ điều khiển đề xuất và của hệ thống được thể hiện trong Bảng 1 và Bảng 2.

Đáp ứng nấc và sai số của hệ thống giám sóc – vật – lò xo với bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi sử dụng luật tiếp cận hàm mũ được trình bày như Hình 6. Quan sát đáp ứng nấc và sai số được trình bày ở Hình 6, vị trí thực tế của hệ thống hội tụ về vị trí tham chiếu sau 0,3168 (s) tương ứng với thời gian tăng đạt 0,1804 (s), không có vọt lố và triệt tiêu sai số xác lập. Các chỉ tiêu chất lượng của đáp ứng được thể hiện ở Bảng 3 và được so sánh với bộ điều khiển PID [7] và bộ điều khiển với kỹ thuật backstepping [1]. Hình 7 trình bày tín hiệu điều khiển của

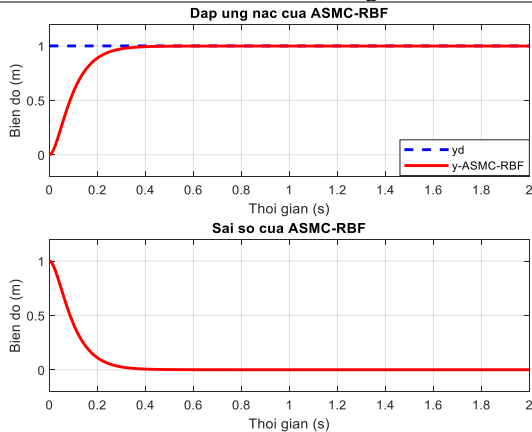
bộ điều khiển đề xuất với ngõ vào hàm nấc. Hiện tượng chattering với bộ điều khiển đề xuất đã bị triệt tiêu.

**Bảng 1.** Các thông số của bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi sử dụng luật tiếp cận hàm mũ

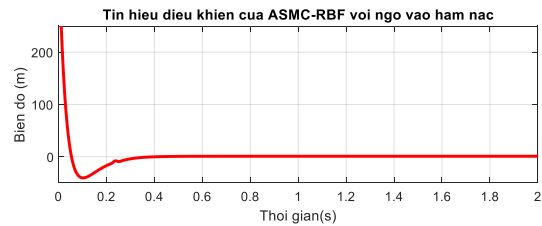
Thông số	Ý nghĩa	Giá trị
$\lambda$		20
$\eta$		0,5
$\gamma$		1000
$k$		20
$b$	Giá trị ngưỡng	$[0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,1]^T$
$c$	Giá trị tâm của hàm Gaussian	$0,5 * \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$

**Bảng 2.** Các thông số của hệ thống

Thông số	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
$m$	Khối lượng của vật	1	kg
$k$	Độ cứng lò xo	1	N/m
$d$	Hệ số giảm xóc	2	Ns/m



**Hình 6.** Đáp ứng nấc và sai số của ASMC\_RBF



**Hình 7.** Tín hiệu điều khiển với hàm nấc

**Bảng 3.** Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển ASMC\_RBF

Các chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Độ vọt lố (%)	Thời gian xác lập (s)	Sai số xác lập (m)
ASMC-RBF	0,1804	0	0,3168	0
PID [7]	1,25	9,15	4,18	-
Backstepping [1]	0,286	-	0,526	0

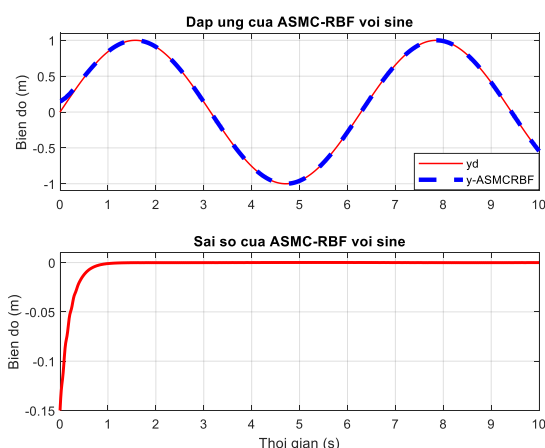
Quan sát Bảng 3 ta thấy rằng, giá trị các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển đề xuất nhỏ hơn bộ điều khiển backstepping và bộ điều khiển PID. Điều này đạt được cho thấy tính hiệu quả và sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất trong điều khiển bám vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo.

Đáp ứng xung vuông, xung sine và sai số của hệ thống giảm xóc – vật – lò xo với bộ điều khiển đề xuất được trình bày như Hình 8 và 9 tương ứng. Đáp ứng trên Hình 8 và 9 cho thấy rằng, bộ điều khiển đề xuất vẫn đảm bảo điều khiển vị trí thực tế của hệ thống hội tụ về vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0 và không có độ vọt lố.

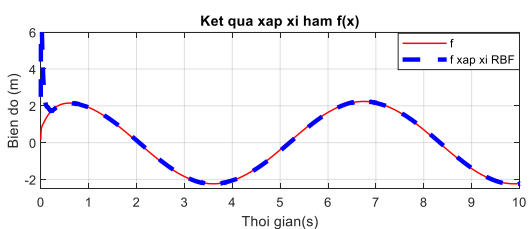
Hình 10 trình bày kết quả xấp xỉ hàm  $f(x)$  của mạng nơ-ron RBF với ngõ vào hình sine và Hình 11 trình bày kết quả khảo sát với trường hợp có nhiễu (nhiều trắng) để giả lập nhiễu cảm biến tác động vào ngõ ra của hệ thống. Quan sát các đáp ứng ở Hình 10 và 11 ta thấy rằng, mạng nơ-ron RBF xấp xỉ hiệu quả hàm  $f(x)$  với sai số xấp xỉ tiến về 0 và bộ điều khiển đề xuất vẫn điều khiển tốt hệ thống khi có nhiễu tác động ở ngõ ra của hệ thống.



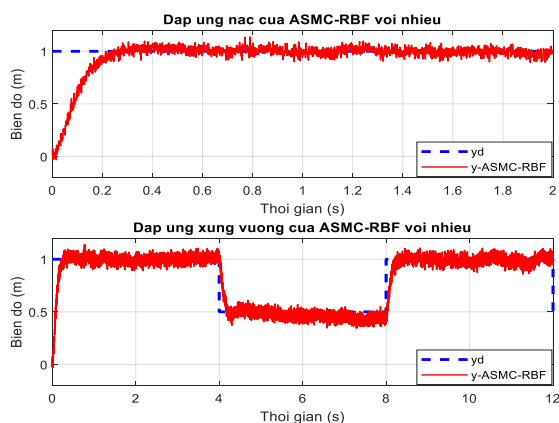
**Hình 8.** Đáp ứng và sai số với ngõ vào xung vuông của ASMC\_RBF



**Hình 9.** Đáp ứng và sai số với ngõ vào hình sine của ASMC\_RBF

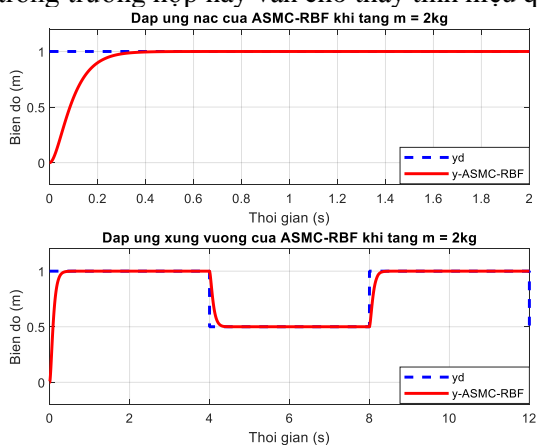


**Hình 10.** Kết quả xấp xỉ hàm  $f(x)$  của mạng nơ-ron RBF với ngõ vào hình sine

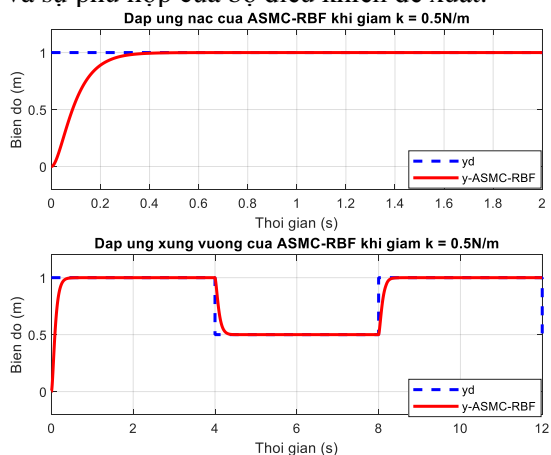


**Hình 11.** Đáp ứng nấc và xung vuông khi nhiều tác động ở ngõ ra của hệ thống

Hình 12 và 13 trình bày đáp ứng nấc và xung vuông của bộ điều khiển đề xuất trong trường hợp khối lượng tăng 100% ( $m = 2 \text{ kg}$ ) và độ cứng lò xo giảm 50% ( $k = 0,5 \text{ N/m}$ ). Các đáp ứng trong trường hợp này vẫn cho thấy tính hiệu quả và sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất.



**Hình 12.** Đáp ứng nấc và xung vuông khi  $m = 2 \text{ kg}$



**Hình 13.** Đáp ứng nấc và xung vuông khi  $k = 0,5 \text{ N/m}$

Qua các kết quả mô phỏng được trình bày từ Hình 6 đến Hình 13 cùng với các chỉ tiêu chất lượng thể hiện ở Bảng 3 đã cho thấy bộ điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi với luật tiếp cận hàm mũ đề xuất phù hợp, bền vững và hiệu quả trong điều khiển bám vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo.

#### 4. Kết luận

Bài báo đã trình bày và kiểm chứng phương pháp điều khiển mạng nơ-ron RBF trượt thích nghi với luật tiếp cận hàm mũ điều khiển bám vị trí hệ thống giảm xóc – vật – lò xo. Kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink đã chứng minh tính hiệu quả và sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất với các chỉ tiêu chất lượng vượt trội hơn so với bộ điều khiển PID và bộ điều khiển backstepping được áp dụng cho hệ thống này. Ngoài ra, hiện tượng chattering của bộ điều khiển đề xuất cũng bị triệt tiêu. Bên cạnh đó, bộ điều khiển đề xuất còn được khảo sát với ngõ vào xung vuông, sine, khi có sự tác động của nhiễu ở ngõ ra và sự thay đổi của khối lượng, độ cứng lò xo đã cho thấy tính bền vững của nó. Các bộ điều khiển lai hoặc điều khiển kết hợp sẽ được nghiên cứu phát triển để tiếp tục điều khiển hệ thống giảm xóc – vật – lò xo và kiểm chứng trên mô hình thực tế thay vì chỉ dừng lại ở mô phỏng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. F. Badr, E. H. Karam, and N. M. Mjeed, “Control design of damper mass spring system based on backstepping controller scheme,” *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 11, pp. 1-8, 2020.
- [2] A. A. Okubanjo, O. K. Oyetola, O. O. Ade-Ikuesan, O. O. Olaluwoye, and P. O. Alao, “Performance Evaluation of PD and LQR Controller for Coupled Mass Spring Damper System,” *Futo Journal Series (FUTOJNLS)*, vol. 4, no. 1, pp. 199-210, 2018.
- [3] A. A. Okubanjo, O. K. Oyetola, and O. O. Olaluwoye, “Simulink and Simelectronics based Position Control of a Coupled Mass-Spring Damper Mechanical System,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 8, no. 5, pp. 3636-3646, 2018.
- [4] J. M. Cruz-Duarte, J. J. Rosales-García, and C. R. Correa-Cely, “Entropy Generation in a Mass-Spring-Damper System Using a Conformable Model,” *Symmetry*, vol. 12, pp. 1-11, 2020.
- [5] E. K. Orhorhoro and M. E. Onogbotsere, “Simulation of a mass spring damper model in phase variable,” *ELK Asia Pacific Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 2, no. 2, pp. 1-16, 2016.
- [6] S. K. Valluru and M. Singh, “Metaheuristic Tuning of Linear and Nonlinear PID Controllers to Nonlinear Mass Spring Damper System,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, no. 10, pp. 2320-2328, 2017.
- [7] K. Ravindra, K. Yogesh, and G. Ankit, “Comparative Analysis of P, PI, PD, PID Controller for Mass Spring Damper System using Matlab Simulink,” *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, Special Issue, pp. 668-672, 2018.
- [8] J. Liu, *Sliding mode control using MATLAB*. Published by Elsevier Inc, 2017.
- [9] N. H. Dung, “Radial basis function neural network based adaptive sliding mode control for nonlinear system,” *Can Tho University Journal of Science*, no. 15a, pp. 263-272, 2010.
- [10] A. J. Koshkouei, A. S. I. Zinober, and K. J. Burnham, “Adaptive Sliding Mode Backstepping Control of Nonlinear Systems with Unmatched Uncertainty,” *Asian Journal of Control*, vol. 6, no. 4, pp. 447-453, 2004.
- [11] G. Debbache and N. Goléo, “Neural network based adaptive sliding mode control of uncertain nonlinear systems,” *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 119-128, 2012.