

# THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN NƠ-RON TRƯỢT THÍCH NGHI ÁP DỤNG CHO HỆ BÓNG TRÊN THANH CÂN BẰNG

Dương Văn Khải<sup>1\*</sup>, Trần Thị Như Hà<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Đăng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM

<sup>2</sup>Công ty TNHH Xây dựng Bình Định

\*Email: khaidv@hufi.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/6/2022; Ngày chấp nhận đăng: 03/8/2022

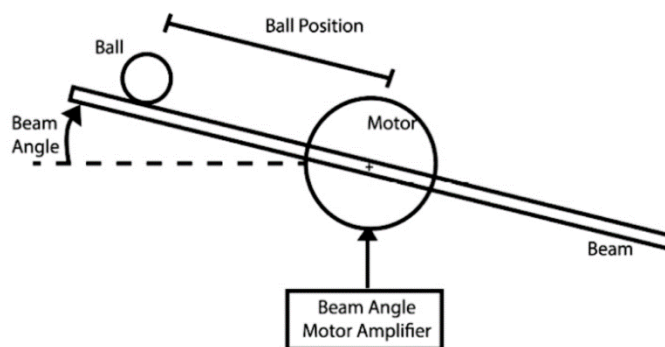
## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một phương pháp thiết kế, điều khiển hệ bóng trên thanh cân bằng (Ball and Beam). Đây là một hệ phi tuyến không ổn định điển hình thường được sử dụng trong các phòng thí nghiệm của các trường kỹ thuật dùng để kiểm chứng các lý thuyết điều khiển tự động. Trong bài báo này, một bộ điều khiển mờ thích nghi được đề xuất để nhận dạng các thông số của mô hình đối tượng nghiên cứu và hiệu chỉnh tín hiệu điều khiển đối tượng theo giá trị mong muốn. Kết quả mô phỏng hệ thống cho thấy bộ điều khiển đề xuất có khả năng đáp ứng nhanh, cân bằng tốt, đáp ứng các chỉ tiêu điều khiển khi thông số mô hình thay đổi.

*Từ khóa:* Điều khiển trượt, hệ bóng và thanh, điều khiển thích nghi, mô hình mờ.

## 1. GIỚI THIỆU

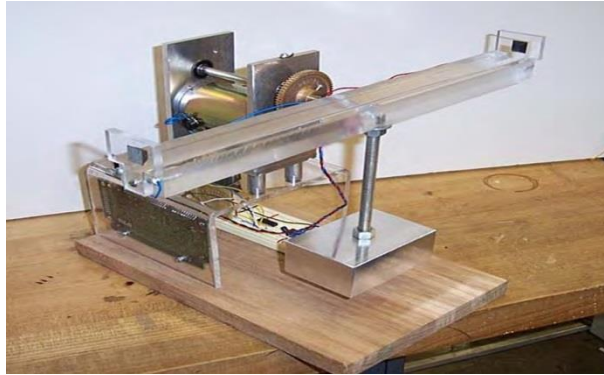
Hệ thống cân bằng bóng trên thanh là một mô hình thực nghiệm được sử dụng khá phổ biến tại các trường đại học. Hệ thống có cấu tạo vật lý tương đối đơn giản nhưng lại phức tạp về mặt động học. Đây là hệ thống phi tuyến, không ổn định và là cơ sở để xây dựng các hệ thống tự cân bằng như: hệ cân bằng xe tự hành, hệ thống phóng tên lửa hoặc hệ thống cân bằng máy bay theo phương ngang... Hệ thống cân bằng bóng trên thanh là mô hình gồm thanh nằm ngang được cố định điểm giữa với trục của một động cơ DC, quả bóng, một cảm biến xác định vị trí của bóng, một cảm biến xác định góc nghiêng của thanh và mạch điều khiển hệ thống. Quả bóng di chuyển được trên thanh do tác dụng của trọng lực khi thanh lệch khỏi vị trí song song với mặt phẳng ngang như Hình 1.



Hình 1. Hệ thống ball and beam trực giữa [2]

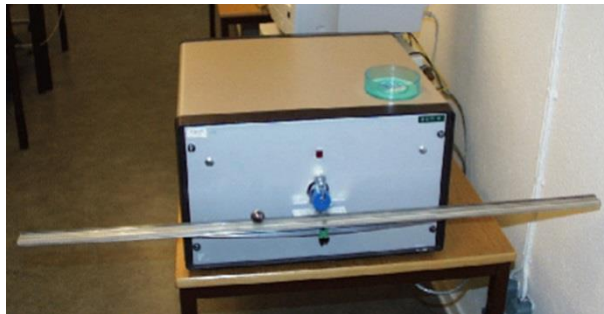
## Thiết kế bộ điều khiển no-ron trượt thích nghi áp dụng cho hệ bóng trên thanh cân bằng

Vị trí bóng được xác định bởi cảm biến, bộ điều khiển xác định sai lệch giữa vị trí thực của bóng và vị trí mong muốn từ đó đưa ra tín hiệu điều khiển động cơ làm thay đổi góc nghiêng của thanh để bóng di chuyển về vị trí mong muốn. Đây là đối tượng được rất nhiều các nhà nghiên cứu sử dụng để kiểm chứng các giải thuật điều khiển. Trong [1], mô hình “Ball on Balancing Beam” của tác giả Arroyo được mô tả như Hình 2. Mô hình sử dụng một cảm biến dây điện trở để xác định vị trí của bóng. Tín hiệu cảm biến được xử lý bởi card DSP, động cơ có bộ hộp số giảm tốc dùng để điều khiển góc nghiêng của thanh, bộ điều khiển sử dụng là bộ điều khiển PD. Ưu điểm của mô hình là dễ thiết kế, bộ điều khiển PD tương đối đơn giản. Nhược điểm của mô hình là góc nghiêng của thanh không được điều khiển trực tiếp bởi bộ điều khiển PD nên trạng thái cân bằng không bền vững.



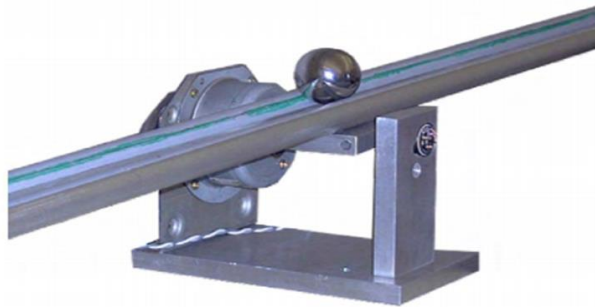
Hình 2. Mô hình Ball on Balancing Beam của Arroyo

Hình 3 trình bày mô hình bóng trên thanh cân bằng của Marta Virseda với động cơ DC servo đặt ở giữa của thanh và sử dụng điện trở trên thanh để làm cảm biến xác định vị trí của bóng [2].



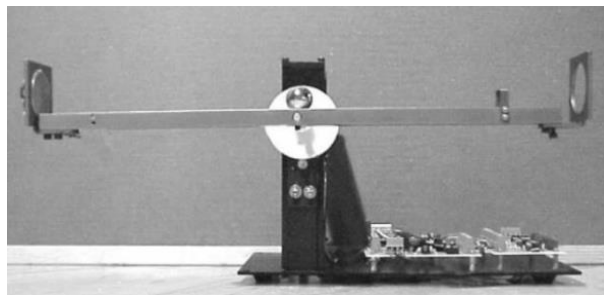
Hình 3. Mô hình Ball and Beam của Marta Virseda

Hình 4 trình bày mô hình “Ball and Beam Balancer” của nhóm tác giả Ambalavanar, Moinuddin và Manlyshev (2006) thuộc đại học Lakehead [3]. Hệ thống sử dụng động cơ DC với hộp số tích hợp, cảm biến vị trí dây điện trở và bộ mã hóa số. Hệ thống được kiểm soát bởi bộ điều khiển LQR, điều khiển điện áp vào của động cơ DC để ổn định vị trí của bóng và góc nghiêng của thanh.



Hình 4. Mô hình Ball and Beam Balancer

Hình 5 trình bày mô hình bóng và thanh sử dụng cảm biến siêu âm để xác định vị trí của bóng và sử dụng bộ đo điện thế để xác định góc nghiêng của thanh được Hirsch nghiên cứu [4]. Bộ điều khiển được sử dụng để điều khiển hệ thống là bộ điều khiển PD.



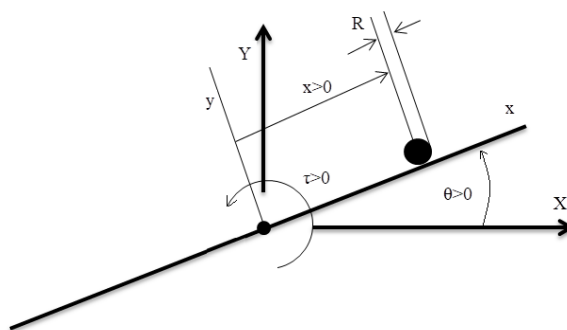
Hình 5. Mô hình bóng và thanh của Hirsch

Điều khiển trượt là một trong số các bộ điều khiển được sử dụng cho các hệ thống phi tuyến. Tuy nhiên, trong bộ điều khiển trượt luôn tồn tại một hiện tượng rung quanh mặt trượt hay còn gọi là hiện tượng Chattering. Để giảm hiện tượng này thì một số nghiên cứu đã sử dụng logic mờ (Fuzzy logic) hoặc mạng thần kinh nhân tạo (neuron network) để thay thế hàm sign trong bộ điều khiển trượt [5]. Hoặc cũng có thể thiết lập mặt trượt dựa trên luật điều khiển PID để giảm hiện tượng dao động không mong muốn với tín hiệu điều khiển dựa trên phương pháp thử và sai [6], [7]. Bên cạnh đó, khi thông số mô hình thay đổi (khối lượng của bóng) thì kết quả điều khiển hệ thống có thể sẽ bị ảnh hưởng và không còn đáp ứng được các tiêu chí trong kỹ thuật điều khiển. Trong bài báo này, nhóm tác giả thiết kế bộ điều khiển mờ-trượt thích nghi để điều khiển cho hệ bóng và thanh cân bằng. Trong đó, mô hình mờ-trượt dùng để nhận dạng thông số thay đổi (khối lượng bóng) của mô hình đối tượng nghiên cứu từ đó hiệu chỉnh tín hiệu điều khiển đối tượng nhằm đạt được trạng thái mong muốn (cân bằng, ổn định).

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Mô hình hóa hệ thống bóng trên thanh cân bằng

Để thành lập được mô hình toán học của hệ trước tiên ta xem xét mô hình vật lý của hệ và quy ước chiều dương của hệ bóng trên thanh cân bằng như Hình 6.



Hình 6. Mô hình vật lý và chiều dương quy ước của hệ bóng trên thanh cân bằng.

Bảng 1. Bảng kí hiệu thông số của mô hình

Kí hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\theta$	rad	Góc tạo bởi thanh và mặt phẳng ngang
$\varphi$	rad	Góc chuyển động lăn của bóng
$x$	m	Vị trí của bóng trên thanh
$m$	kg	Khối lượng của bóng
$J$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Mô-men quán tính của bóng
$R$	m	Bán kính của bóng
$J_B$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Mô-men quán tính của thanh
$g$	$\text{m/s}^2$	Gia tốc trọng trường

Gọi  $K$  là động năng của hệ ta có:

$$K = K_{\text{beam}} + K_{\text{ball}}$$

Với:  $K_{\text{beam}} = K_{\text{tịnh tiến beam}} + K_{\text{quay beam}}$

$$K_{\text{ball}} = K_{\text{tịnh tiến ball}} + K_{\text{lăn tròn ball}}$$

Ta có:

$$K_{\text{tịnh tiến beam}} = 0$$

Động năng quay của thanh là:

$$K_{\text{quay beam}} = \frac{1}{2} J_B \dot{\theta}^2 \quad (1)$$

Động năng chuyển động tịnh tiến của bi đối với thanh là:

$$K_{\text{tịnh tiến ball}} = \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}^2 \quad (2)$$

Động năng chuyển động lăn tròn của bi đối với thanh là:

$$K_{\text{lăn tròn ball}} = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{5} m R^2 \cdot \frac{\dot{x}^2}{R^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{5} m \cdot \dot{x}^2 \right) \quad (3)$$

Vậy động năng của hệ thống là:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{1}{2} \left( J_B \dot{\theta}^2 + m \cdot x^2 \cdot \dot{\theta}^2 + m \cdot \dot{x}^2 + \frac{2}{5} m \cdot x^2 \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left[ (J_B + m \cdot x^2) \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{7}{5} m \cdot \dot{x}^2 \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

Thế năng của hệ thống là:

$$V = m \cdot g \cdot x \cdot \sin \theta \tag{5}$$

Áp dụng phương trình Euler-Langrance ta có:

$$L = K - V = \frac{1}{2} \left[ (J_B + m \cdot x^2) \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{7}{5} m \cdot \dot{x}^2 \right] - m \cdot g \cdot x \cdot \sin \theta \tag{6}$$

Đạo hàm L theo trục quay của động cơ:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \tag{7}$$

Với  $\tau$  là tổng mô-men tác động vào hệ được cung cấp bởi động cơ servo DC. Thực hiện các phép toán lấy đạo hàm riêng ta có kết quả:

$$(J_B + m \cdot x^2) \ddot{\theta} + 2 \cdot m \cdot x \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} + m \cdot g \cdot x \cdot \cos \theta = \tau \tag{8}$$

Đạo hàm L theo chuyển động của bóng:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = b \cdot \dot{x} \tag{9}$$

Trong đó:  $b$  – là hệ số ma sát, hệ số này rất nhỏ có thể bỏ qua nên  $b \cdot \dot{x} = 0$ , tiếp tục tính các đạo hàm riêng ta có kết quả như biểu thức (10).

$$\frac{7}{5} m \cdot \ddot{x} - m \cdot x \cdot \dot{\theta}^2 + m \cdot g \cdot \sin \theta = 0 \tag{10}$$

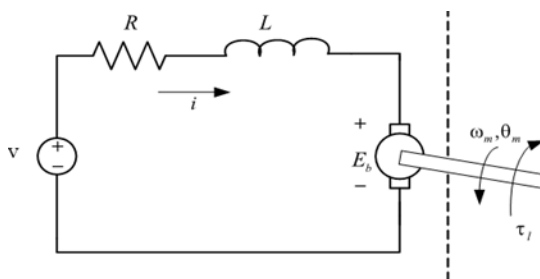
Kết hợp biểu thức (8) và (10) ta được phương trình động học của hệ bóng trên thanh cân bằng:

$$\begin{cases}
 \ddot{\theta} = \frac{\tau - 2m \cdot x \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} - m \cdot g \cdot x \cdot \cos \theta}{J_B + m \cdot x^2} \\
 \ddot{x} = \frac{5}{7} (x \cdot \dot{\theta}^2 - g \cdot \sin \theta)
 \end{cases} \tag{11}$$

Với  $\tau$  là tổng mô-men tác động vào hệ thống.

## 2.2. Phương trình mô-men tác động vào hệ thống

Mô-men tác động vào hệ thống trong nghiên cứu được cung cấp bởi động cơ servo DC gắn ở vị trí tâm của thanh cân bằng. Ta có sơ đồ mạch tương đương cho động cơ như Hình 7.



Hình 7. Sơ đồ mạch tương đương của động cơ servo DC.

Bảng 2. Kí hiệu thông số của động cơ servo DC

Kí hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$u(t)$	V	Điện áp cấp cho động cơ
$R_u$	$\Omega$	Điện trở phần ứng của động cơ
$k_b$	V·s/rad	Hệ số điện áp
$k_m$	Nm/A	Hệ số mô-men của động cơ
$k_c$		Hệ số giảm tốc (động cơ có hộp giảm tốc)
$K$		Hệ số ma sát
$J_{qt}$	$kg \cdot m^2$	Mô-men quán tính của trục động cơ (thường nhỏ)
$I_u$	A	Dòng điện phần ứng của động cơ

Phương trình mô-men trên tải của động cơ như sau:

$$k_m \cdot I_u = k_c \cdot J_{qt} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{\tau}{k_c} + k_c \cdot k \cdot \omega(t) \quad (12)$$

Với:  $\omega(t) = \dot{\theta}$  và  $\frac{d\omega(t)}{dt} = \ddot{\theta}$

$$\Rightarrow \tau = k_c (k_m \cdot I_u - k_c \cdot J_{qt} \ddot{\theta} - k_c \cdot k \cdot \dot{\theta}) \quad (13)$$

Bên cạnh đó ta có phương trình điện áp của động cơ như sau:

$$u(t) = R_u \cdot I_u + L \frac{dI_u(t)}{dt} + k_c \cdot k_b \omega(t) \quad (14)$$

Với L là cảm kháng phần ứng của động cơ có giá trị nhỏ có thể bỏ qua. Khi đó phương trình (14) trở thành:

$$u(t) = R_u \cdot I_u + k_c \cdot k_b \cdot \dot{\theta} \Rightarrow I_u = \frac{u(t) - k_c \cdot k_b \cdot \dot{\theta}}{R_u} \quad (15)$$

Thay (15) vào (13) ta được:

$$\tau = k_c \left( k_m \cdot \frac{u(t) - k_c \cdot k_b \cdot \dot{\theta}}{R_u} - k_c \cdot J_{qt} \ddot{\theta} - k_c \cdot k \cdot \dot{\theta} \right) \quad (16)$$

Do động cơ sử dụng không quá lớn nên bỏ qua ma sát ( $k = 0$ ) và mô-men quán tính của động cơ nhỏ nên  $J_{qt}$  có thể bỏ qua. Khi đó phương trình (16) trở thành:

$$\tau = \frac{k_c \cdot k_m \cdot u(t) - k_c^2 \cdot k_m \cdot k_b \cdot \dot{\theta}}{R_u} \quad (17)$$

Thay (17) vào (11) ta được hệ phương trình toán học của hệ bóng trên thanh cân bằng như sau:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{k_c \cdot k_m \cdot u(t) - k_c^2 \cdot k_m \cdot k_b \cdot \dot{\theta} - 2R_u \cdot m \cdot x \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} - R_u \cdot m \cdot g \cdot x \cdot \cos \theta}{R_u (J_B + m \cdot x^2)} \\ \ddot{x} = \frac{5}{7} (x \cdot \dot{\theta}^2 - g \cdot \sin \theta) \end{cases} \quad (18)$$

Đặt các biến trạng thái:  $x_1 = x; x_2 = \dot{x}; x_3 = \theta; x_4 = \dot{\theta}$

Ta có hệ phương trình trạng thái của hệ bóng trên thanh cân bằng có dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{5}{7} (x_1 \cdot x_4^2 - g \cdot \sin x_3) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{k_c \cdot k_m \cdot u(t) - k_c^2 \cdot k_m \cdot k_b \cdot x_4 - 2R_u \cdot m \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - R_u \cdot m \cdot g \cdot x_1 \cdot \cos x_3}{R_u (J_B + m \cdot x_1^2)} \end{cases} \quad (19)$$

### 2.3. Xây dựng bộ điều khiển trượt theo phương pháp Lyapunov

Với giả thuyết bóng làm bằng sắt có hình cầu, đặc và đồng nhất. Khi đó mô-men quán tính của bóng được tính theo công thức:  $J = \frac{2}{5} m \cdot R^2$  trong đó  $J$  là khá nhỏ nên có thể bỏ qua.

Bên cạnh đó nghiên cứu đang xét trường hợp giá trị góc nghiêng  $\theta$  của thanh nhỏ ( $-20^\circ < \theta < 20^\circ$ ) nên:  $\theta \ll 1$  khi đó:  $\sin \theta \approx \theta; \dot{\theta}^2 \approx 0$

Đặt  $y = x_1$  là khoảng cách di chuyển của bóng trên thanh kết hợp với phương trình (19) ta có:

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{x}_1 = x_2 \\ \ddot{y} = \dot{x}_2 = \frac{5}{7} g \cdot x_3 \\ \ddot{\ddot{y}} = \frac{5}{7} g \cdot \dot{x}_3 = \frac{5}{7} g \cdot x_4 \\ \ddot{\ddot{\ddot{y}}} = \frac{5}{7} g \cdot \dot{x}_4 = \frac{5}{7} g \cdot \frac{k_c \cdot k_m \cdot u(t) - k_c^2 \cdot k_m \cdot k_b \cdot x_4 - 2R_u \cdot m \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - R_u \cdot m \cdot g \cdot x_1 \cdot \cos x_3}{R_u (J_B + m \cdot x_1^2)} \end{cases} \quad (20)$$

Do phương trình trạng thái của hệ thống có 4 biến nên mặt trượt  $S(e)$  có dạng:

$$S(e) = \ddot{e} + a_2\dot{e} + a_1e + a_0e \quad (21)$$

Với  $e$  là sai số giữa tín hiệu đặt ( $r$ ) và đáp ứng ( $y$ ) của hệ thống ta có:

$$\begin{aligned} e &= r - y \\ \dot{e} &= \dot{r} - \dot{y} \\ \ddot{e} &= \ddot{r} - \ddot{y} \\ \ddot{e} &= \ddot{r} - \ddot{y} \\ \ddot{e} &= \ddot{r} - \ddot{y} \end{aligned} \quad (22)$$

Các hệ số  $a_0, a_1, a_2$  được chọn sao cho phương trình đặc trưng của (21) có tất cả các nghiệm với phần thực âm (thỏa tiêu chuẩn Hurwitz).

$$p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0 \quad (23)$$

Trong không gian gồm 4 biến trạng thái, phương trình  $S = 0$  xác định một mặt cong được gọi là mặt trượt (sliding surface). Luật điều khiển  $u$  được xác định sao cho  $S \rightarrow 0$  trong khoảng thời gian hữu hạn. Trên mặt trượt  $S = 0$ , vì tất cả các nghiệm của (21) đều có phần thực âm nên  $e \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ . Các quỹ đạo pha của hệ thống được đưa về mặt trượt. Bên trên mặt trượt, quỹ đạo pha bám theo điểm  $r$  một cách tiệm cận.

Do  $r$  là hằng số, kết hợp với biểu thức (20), (22) lấy đạo 2 vế phương trình (21) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= - \left( \frac{5}{7} g \cdot \frac{k_c k_m u(t) - k_c^2 k_m k_b x_4 - 2R_u m x_1 x_2 x_4 - R_u m g x_1 \cos x_3}{R_u (J_B + m x_1^2)} \right) \\ &\quad - a_2 \left( \frac{5}{7} g x_4 \right) - a_1 \left( \frac{5}{7} g x_3 \right) - a_0 (x_2) \end{aligned} \quad (24)$$

Sử dụng phương pháp Lyapunov, để hệ thống ổn định ta có thể chọn:

$$\dot{S} = -k \cdot \text{sign}(S) \quad (25)$$

$$\text{Với: } k > 0 \quad \text{và} \quad \text{sign}(S) = \begin{cases} 1, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ -1, S < 0 \end{cases}$$

Khi đó thay (25) vào (24) ta có:

$$\begin{aligned} -k \cdot \text{sign}(S) &= - \left( \frac{5}{7} g \cdot \frac{k_c k_m u(t) - k_c^2 k_m k_b x_4 - 2R_u m x_1 x_2 x_4 - R_u m g x_1 \cos x_3}{R_u (J_B + m x_1^2)} \right) \\ &\quad - a_2 \left( \frac{5}{7} g x_4 \right) - a_1 \left( \frac{5}{7} g x_3 \right) - a_0 (x_2) \end{aligned} \quad (26)$$

Nếu ta đặt:

$$A_a = \frac{5}{7} g \cdot \frac{k_c^2 k_m k_b x_4 + 2R_u m x_1 x_2 x_4 + R_u m g x_1 \cos x_3}{R_u (J_B + m x_1^2)}$$

$$B_b = -a_2 \left( \frac{5}{7} g x_4 \right) - a_1 \left( \frac{5}{7} g x_3 \right) - a_0 (x_2) + k \cdot \text{sign}(S)$$



$$C_c = \frac{5/7g.k_c.k_m}{R_u(J_B + m.x_1^2)}$$

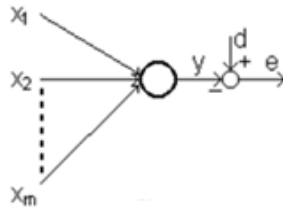
Phương trình (26) trở thành:  $u(t) = \frac{1}{C_c}(A_a + B_b)$  (27)

Khi đó ta có phương trình mặt trượt (21) trở thành:

$$S(e) = -\frac{5}{7}g.x_4 - a_2 \frac{5}{7}g.x_3 - a_1x_2 + a_0(r - x_1)$$
 (28)

#### 2.4. Xây dựng bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron truyền thẳng

Bộ điều khiển trượt được xây dựng như phương trình (26) và tín hiệu điều khiển trượt có dạng được trình bày như phương trình (27). Tuy nhiên, do  $m$  là thông số thay đổi theo thời gian nên một hàm Adaline tuyến tính được đề xuất để nhận dạng thông số  $m$  như trong Hình 8.



Hình 8. Mạng Adaline

Từ phương trình động học của hệ bóng trên thanh cân bằng như phương trình (11) ta viết lại như sau:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{\tau - 2m.x.\dot{\theta} - m.g.x.\cos\theta}{J_B + m.x^2} = f_1 \\ \ddot{x} = \frac{5}{7}(x.\dot{\theta}^2 - g.\sin\theta) = f_2 \end{cases}$$
 (29)

Từ  $f_1$  ta có:  $J_B\ddot{\theta} + m(x^2 + 2.x.\dot{\theta} + g.x.\cos\theta) = \tau$

Viết lại dưới dạng ma trận ta có:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} & x^2 + 2.x.\dot{\theta} + g.x.\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_B \\ m \end{bmatrix} = [\tau]$$
 (30)

Đặt:  $R = \begin{bmatrix} \ddot{\theta} & x^2 + 2.x.\dot{\theta} + g.x.\cos\theta \end{bmatrix}$ ;  $\alpha = \begin{bmatrix} J_B \\ m \end{bmatrix}$  và  $b = [\tau]$

Khi đó phương trình (30) sẽ thành:  $R.\alpha = b$ . Áp dụng phương pháp bình phương tối thiểu ta có:

$$\alpha = (R^T R)^{-1}.R^T.b$$
 (31)

Để huấn luyện mạng nơ-ron với hàm tác động tuyến tính ta đặt:

$$\tau = a(net) \text{ với hàm mục tiêu: } J = \frac{1}{2}(\tau_d - \tau)^2$$

Nhiệm vụ là tìm ma trận  $\alpha$  để  $J$  đạt cực tiểu, khi đó ta dùng phương pháp suy giảm độ dốc.

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - \eta \Delta J$$

$$\text{Với: } \Delta J = -(\tau_d - \tau)\xi$$

$$\text{Khi đó: } \alpha_{k+1} = \alpha_k + \eta(\tau_d - \tau)\xi \quad (32)$$

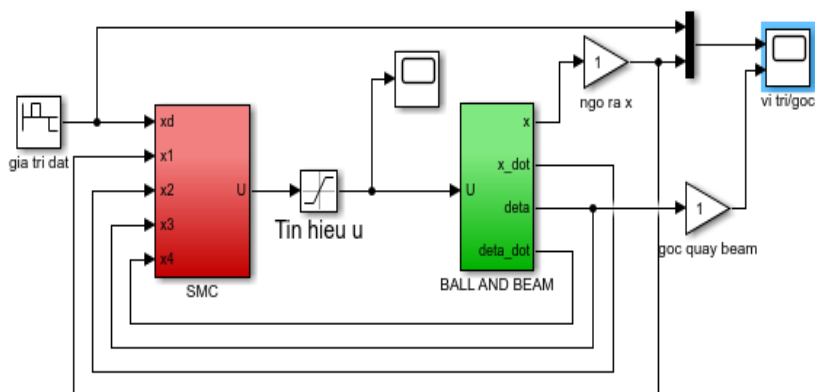
Trong đó:  $\alpha_k, \alpha_{k+1}$  lần lượt là các ma trận trọng số thứ  $k$  và thứ  $k + 1$  của mạng nơ-ron;  $\tau_d, \tau$  lần lượt là mô-men mong muốn và ngõ ra của mạng nơ-ron;  $\xi$  là ma trận ngõ vào đã biết của mạng và  $\eta > 0$  là hằng số học.

Nhiệm vụ của bài toán nhận dạng là tìm  $m$  của hệ thống để xác định tín hiệu điều khiển trượt thích nghi.

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Mô phỏng với bộ điều khiển trượt

Sơ đồ mô phỏng hệ thống dựa trên phương trình toán học của mô hình bóng trên thanh cân bằng (19) và phương trình mặt trượt (28) được mô tả trong Hình 9.



Hình 9. Sơ đồ mô phỏng hệ thống bóng trên thanh cân bằng với bộ điều khiển trượt

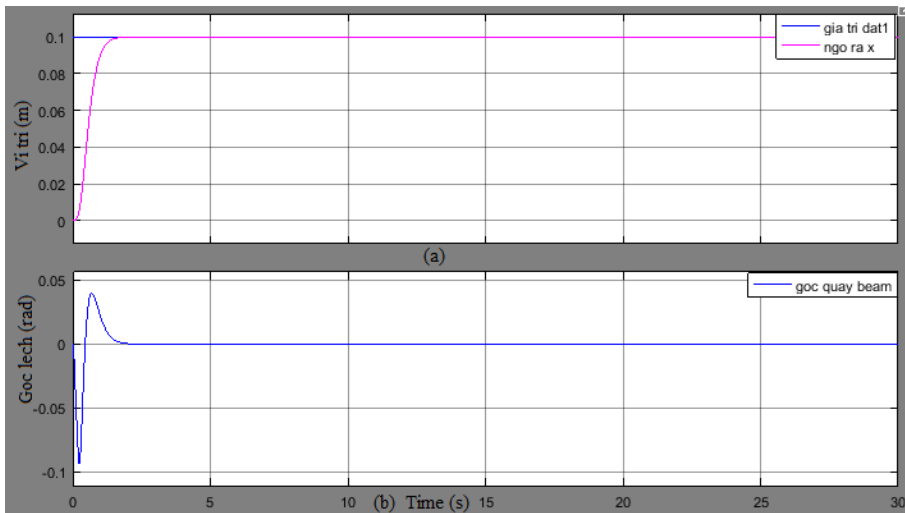
##### 3.1.1. Mô phỏng hệ thống trong trường hợp thông số mô hình cố định

Bảng 3. Thông số của hệ thống

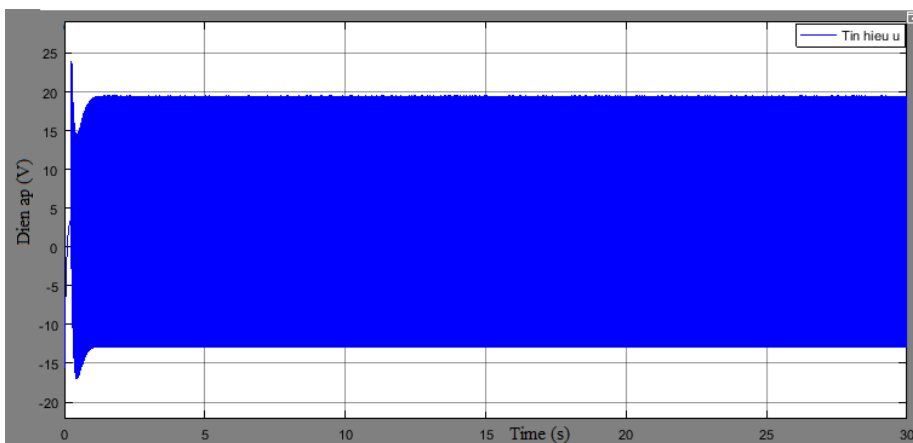
Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
m	0,1	Kg
$R_u$	4,4	$\Omega$
$k_b$	0,025	V·s/rad
$k_m$	0,022	Nm/A
$k_c$	6	

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
$J_B$	0,033	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$g$	9,81	$\text{m}/\text{s}^2$
$a_0$	216	
$a_1$	108	
$a_2$	18	
$k$	100	

Kết quả mô phỏng với giá trị đặt của vị trí  $x = 10 \text{ cm}$ .

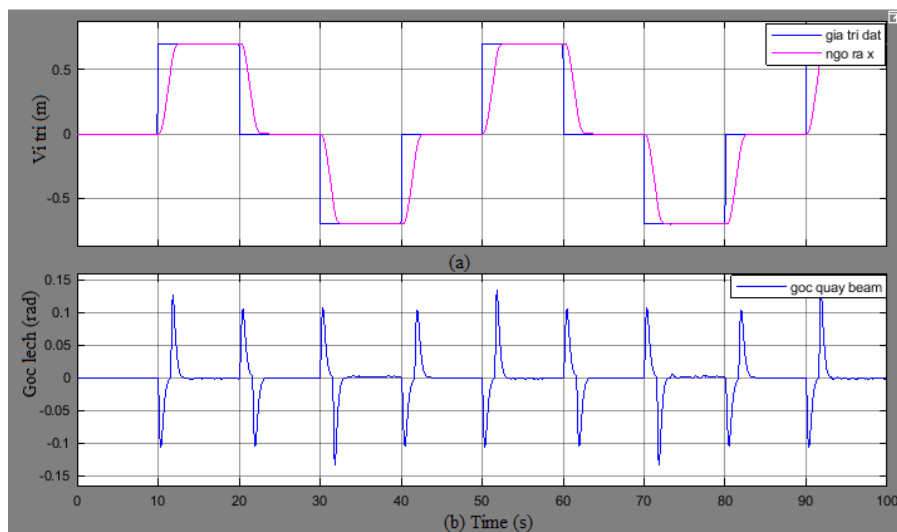


Hình 10. Kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra với giá trị đặt 10cm (a) và góc quay của thanh beam (b)

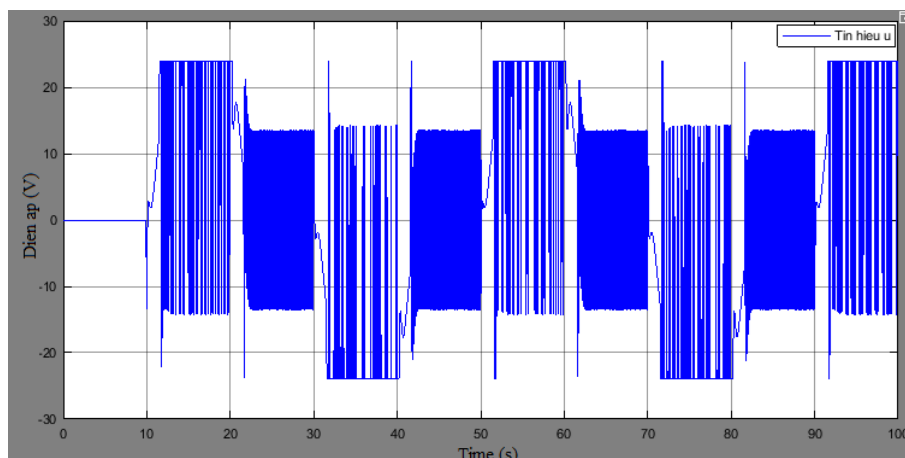


Hình 11. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo

Kết quả mô phỏng với giá trị đặt  $x$  thay đổi (tracking).



Hình 12. Kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra với giá trị đặt thay đổi (a) và góc quay của thanh (b)

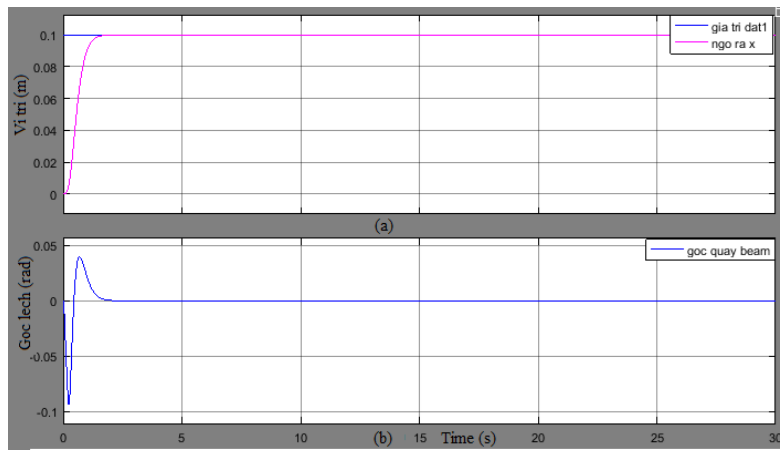


Hình 13. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo với giá trị đặt thay đổi

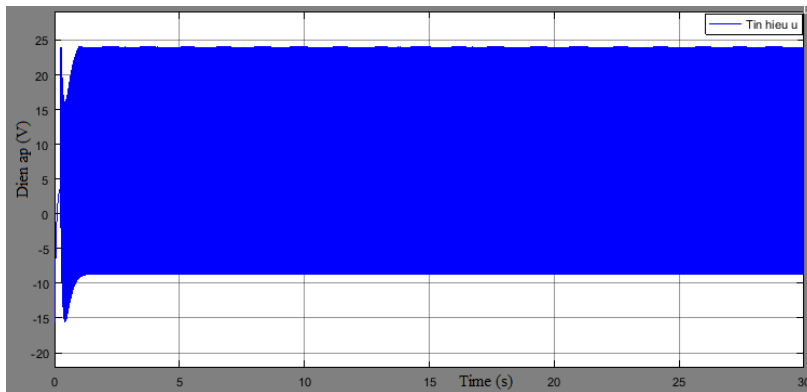
Dựa vào kết quả mô phỏng thể hiện tại các Hình 10, 11, 12 và 13 cho thấy đáp ứng vị trí của bóng bám tốt theo tín hiệu đặt, không có vọt lố, ngay cả khi tín hiệu đặt có biến đổi trạng thái đột ngột thì bóng chỉ mất khoảng 2s để bám lại theo tín hiệu đặt. So với bộ điều khiển PID của Ali và cộng sự [11] triệt tiêu được độ vọt lố và sai số xác lập nhưng thời gian xác lập khá lớn 10s thì kết quả bộ của bộ điều khiển đề xuất rõ ràng tốt hơn nhiều. Góc quay của thanh beam nhỏ, nằm trong phạm vi cho phép. Tín hiệu điều khiển thể hiện rõ hiện tượng Chattering điển hình của bộ điều khiển trượt dao động từ -24V đến +24V.

### 3.1.2. Mô phỏng hệ thống trong trường hợp thông số mô hình thay đổi

Hình 14 thể hiện kết quả mô phỏng với giá trị đặt  $x = 10$  cm và khối lượng bóng thay đổi  $m = 0,25$  kg.

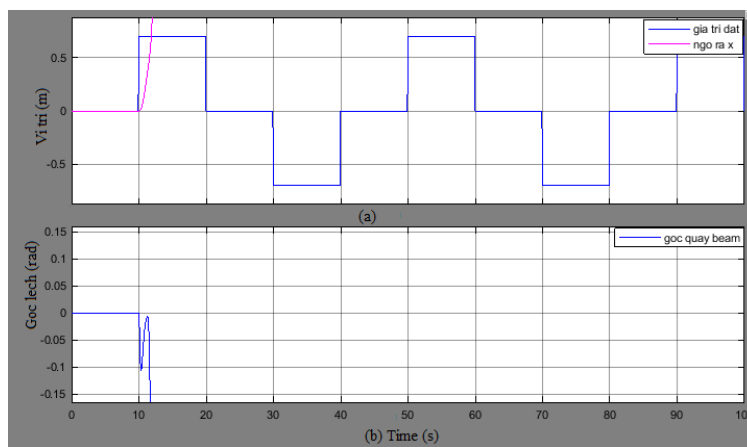


Hình 14. Kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra với giá trị đặt  $x = 10$  cm (a) và góc quay của thanh beam (b) khi  $m = 0,25$  kg.

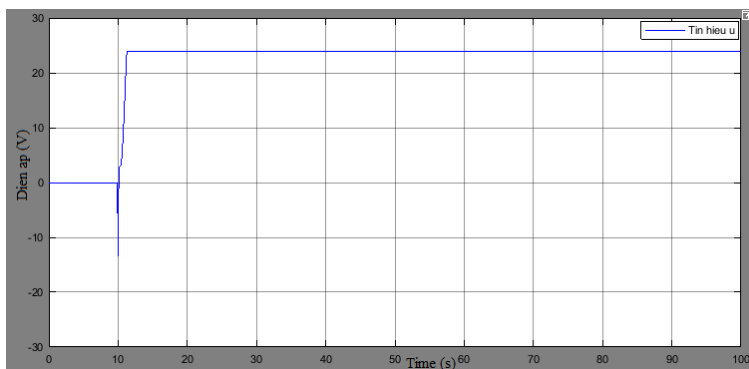


Hình 15. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo với giá trị đặt  $x = 10$  cm và  $m = 0,25$  kg

Kết quả mô phỏng với giá trị đặt thay đổi (tracking).



Hình 16. Kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra với giá trị đặt thay đổi và góc quay của thanh và  $m = 0,25$  kg

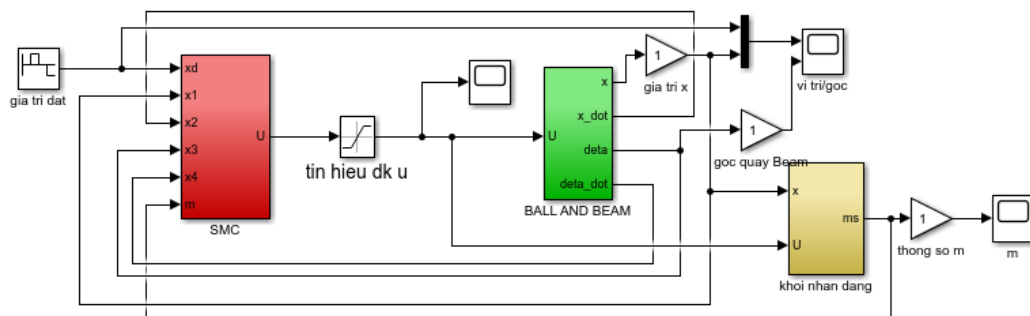


Hình 17. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo với giá trị đặt thay đổi và  $m = 0,25$  kg

Dựa vào kết quả nghiên cứu thấy rằng với giá trị đặt không đổi ở 10cm thì tín hiệu điều khiển vẫn cho đáp ứng tốt khi thông số mô hình thay đổi như trong Hình 14. Tuy nhiên, khi giá trị đặt  $x$  thay đổi thì bộ điều khiển không còn đáp ứng tốt. Cụ thể ngõ ra điều khiển không còn ổn định ở khoảng 2 s, ngõ ra không bám theo tín hiệu đặt, góc quay của thanh beam cũng không đáp ứng tốt, vượt ra khỏi giới hạn cho phép ( $-20^\circ < \theta < 20^\circ$ ) như trong Hình 16. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo thể hiện rõ hiện tượng Chattering, và tín hiệu bị giữ ở mức 24 V và do đó không thực hiện điều khiển đảo chiều động cơ như trong Hình 17.

### 3.2. Mô phỏng với bộ điều khiển trượt dùng mạng nơ-ron

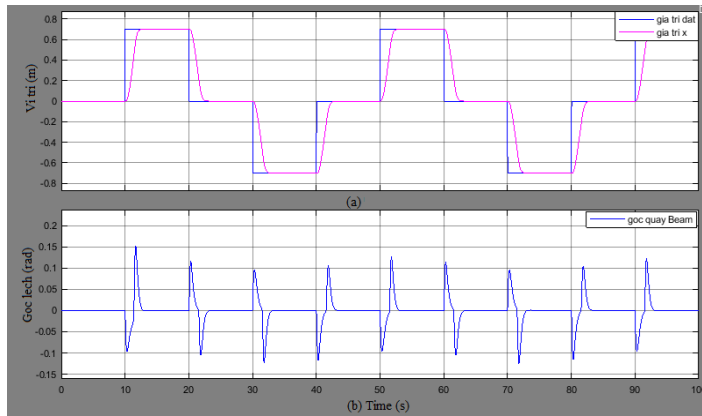
Hoàn toàn tương tự như khi mô phỏng với bộ điều khiển trượt thông thường, ta có sơ đồ mô phỏng của hệ thống với bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron như Hình 18.



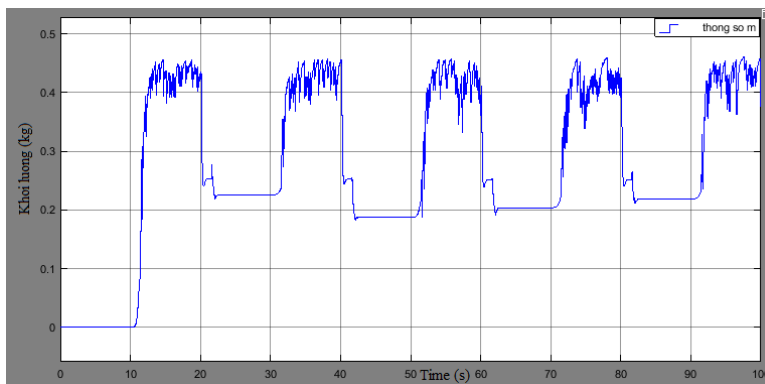
Hình 18. Sơ đồ mô phỏng với bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron.

Do mạng nơ-ron được dùng để nhận dạng thông số của hệ thống (thông số  $m$ ) cho nên khi thông số của mô hình không đổi sẽ cho kết quả hoàn toàn tương tự như mô phỏng với bộ điều khiển trượt thông thường. Ở đây ta chỉ xem xét trường hợp khi thông số mô hình thay đổi.

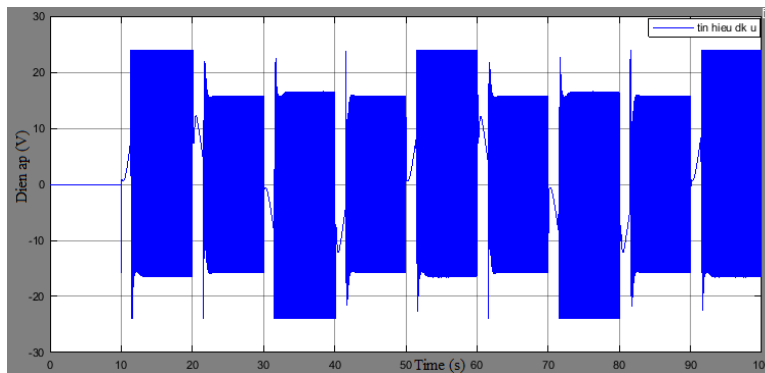
Với khối lượng bi sắt thay đổi:  $m = 0,25$  kg. Ta có kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra và góc quay của thanh Beam khi sử dụng bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron như sau:



Hình 19. Kết quả mô phỏng đáp ứng ngõ ra với giá trị đặt thay đổi (a) và góc quay của thanh beam (b) khi  $m = 0,25$  kg bằng bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron.



Hình 20. Thông số  $m = 0,25$  kg của hệ thống được nhận dạng bằng mạng nơ-ron.



Hình 21. Tín hiệu điều khiển động cơ DC Servo khi giá trị đặt thay đổi.

Với kết quả mô phỏng thể hiện từ Hình 19 đến đến Hình 21, nghiên cứu thấy rằng bộ điều khiển trượt sử dụng mạng nơ-ron để nhận dạng thông số hệ thống cho đáp ứng vị trí của bóng bám rất tốt theo tín hiệu đặt khi thông số  $m$  của hệ thống thay đổi, không hề có vọt lố, và ngay cả khi tín hiệu đặt có biến đổi trạng thái đột ngột thì bóng cũng sẽ bám lại theo tín hiệu đặt trong khoảng thời gian khá ngắn (khoảng 2 s). Góc quay của thanh beam nhỏ, nằm trong phạm vi cho phép. Tín hiệu điều khiển thể hiện rõ hiện tượng Chattering điển hình của bộ điều khiển trượt dao động từ  $-24$  V đến  $+24$  V. Tuy nhiên thông số  $m = 0,25$  kg của hệ thống được nhận dạng bằng mạng nơ-ron vẫn còn sai số do tín hiệu điều khiển bị rung.

Mục tiêu của bài báo là xây dựng bộ điều khiển cho hệ bóng và thanh với thông số của mô hình đối tượng thay đổi. Trong khi một số nghiên cứu trước lại chưa quan tâm nhiều đến sự thay đổi thông số của đối tượng (khối lượng bóng). Bảng 4 trình bày kết quả so sánh giữa bộ điều khiển được đề xuất với một vài nghiên cứu trước đây trong trường hợp thông số mô hình không đổi và tín hiệu đặt thay đổi trạng thái đột ngột:

*Bảng 4. Đối sánh kết quả giữa bộ điều khiển đề xuất với một vài nghiên cứu trước đây*

Chỉ tiêu	Bộ điều khiển mờ thích nghi đề xuất	Bộ điều khiển Mạng mờ hàm xuyên tâm [9]	Fuzzy logic control [10]
Thời gian xác lập (s)	2	6,5	10
Độ vọt lố (%)	0	11	20
Sai số xác lập (%)	0	0	0

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp xây dựng bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng mờ truyền thẳng một lớp để nhận dạng sự thay đổi của thông số mô hình đối tượng, từ đó điều chỉnh thông số của bộ điều khiển giúp bộ điều khiển thích nghi với sự thay đổi thông số của mô hình. Kết quả mô phỏng cho thấy so với bộ điều khiển trượt thông thường thì bộ điều khiển được đề xuất cho đáp ứng tốt với quỹ đạo đặt trước thay đổi, thời gian đáp ứng nhanh và độ vọt lố gần như bằng 0. Mặt khác khi thông số mô hình thay đổi, bộ điều khiển được đề xuất có thể nhận dạng tốt thông số của đối tượng, thích nghi với sự thay đổi của  $m$ . Đây là ưu điểm nổi bật hơn so với bộ điều khiển trượt thông thường.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Arroyo S. – Ball on balancing beam, built by Berkeley robotics laboratory available at [http://bleex.me.berkeley.edu/ME102/proj\\_archive/F03/Proj9/contactinfo.htm](http://bleex.me.berkeley.edu/ME102/proj_archive/F03/Proj9/contactinfo.htm) (2006).
2. Marta V. – Modeling and Control of the Ball and Beam Process, Department of Automatic Control Lund Institute of Technology (2004).
3. Ambalavanar S., Moinuddin M. H. and Malyshev A. – Ball and Beam Balancer, BA Thesis, University of Lakehead (2006).
4. Hirsch R. – Ball on Beam Instruction system, Shamdor Motion systems (1999).
5. Yugang L. and Yangmin L. – Sliding Mode Adaptive Neural-Network Control for Nonholonomic Mobile Modular Manipulators, Journal of Intelligent and Robotic Systems **44** (3) (2005) 203–224.
6. Dũng N. H. – Điều khiển trượt dựa trên hàm trượt kiểu PID, Tạp chí khoa học Đại học Cần thơ **21** (2012) 30-36.
7. Yangmin L. – Adaptive Sliding Mode Control With Perturbation Estimation and PID sliding Surface for Motion Tracking of a Piezo-Driven Micromanipulator, IEEE Transactions On Control Systems Technology **18** (4) (2010) 798-810.
8. Ngón H. C., Tín Đ. – Điều khiển PID một mờ thích nghi dựa trên bộ nhận dạng mạng mờ hồi qui áp dụng cho hệ thanh và bóng, Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ (2011) 159-168.



9. Ngôn, N. C., Thọ, N. V., & Phụng, T. T. H. – Điều khiển giám sát hệ cầu cân bằng với thanh và bóng đèn mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ **58** (3) (2022) 26-35.
10. Reza M., Vu T. M. and Mart T. – Fuzzy logic control for a ball and beam system, International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences **1** (1) (2018) 39-48.
11. Ali A. T., Ahmed A. M., Almahdi H. A., Osama A. T. and Naseraldeen A. – Design and Implementation of ball and beam system using PID controller, Journal of Electrical and Computer Engineering **1** (2017) 1-9.

### **ABSTRACT**

#### **ADAPTIVE SLIDING NEURON CONTROLLER DESIGN APPLY TO BALL AND BEAM BALANCE SYSTEM**

Duong Van Khai<sup>1\*</sup>, Tran Thi Nhu Ha<sup>1</sup>, Nguyen Van Dang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ho Chi Minh City University of Food Industry*

<sup>2</sup>*Binh Dinh Construction Co., Ltd*

\*Email: *khaidv@hufi.edu.vn*

This paper presents a method to design and control the ball and beam system. This is a typical unstable nonlinear system commonly used in engineering school laboratories to test automatic control theories. In this paper, an adaptive sliding neuron controller is proposed to recognize the parameters of the research object model and correct the object control signal according to the desired value. The simulation results show that the proposed control system is capable of fast response, good balance, to meet the control criteria when the model parameters change.

*Keywords:* Sliding mode control, ball and beam system, adaptive control, neuron model.