

# MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT THÍCH NGHI THỨ BẬC CHO HỆ PENDUBOT SIMULATION OF ADAPTIVE FUZZY HIERARCHICAL SLIDING MODE CONTROL FOR PENDUBOT

Võ Anh Khoa<sup>1</sup>, Huỳnh Xuân Dũng<sup>1</sup>, Nguyễn Minh Tâm<sup>1</sup>, Lê Thị Thanh Hoàng<sup>1</sup>,  
Huỳnh Dương Khánh Linh<sup>2</sup>, Xing Wu<sup>2</sup>, Chen Mingfang<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Đông Hải<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Khoa học và Kỹ thuật Côn Minh, Trung Quốc

Ngày toà soạn nhận bài 20/8/2019, ngày phản biện đánh giá 20/9/2019, ngày chấp nhận đăng 31/11/2019.

## TÓM TẮT

Trong bài báo này, bộ điều khiển Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control (điều khiển mờ trượt thích nghi thứ bậc) được thiết kế để điều khiển bám quỹ đạo cho hệ Pendubot. Bộ điều khiển được đặt nền tảng từ bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode (điều khiển trượt thứ bậc). Bên cạnh đó, giải thuật Adaptive Fuzzy (logic mờ thích nghi) được dùng để xấp xỉ các hàm số phi tuyến chưa biết của bộ điều khiển trượt thứ bậc với luật thích nghi cập nhật trực tiếp theo thời gian. Độ ổn định hệ thống trong quá trình bám quỹ đạo cho trước hình sine dưới phương pháp điều khiển trên được chứng minh theo tiêu chuẩn Lyapunov. Kết quả mô phỏng trên Matlab một lần nữa khẳng định sự thành công của phương pháp này.

**Từ khóa:** Pendubot; Điều khiển mờ trượt thích nghi thứ bậc; Điều khiển trượt thứ bậc; logic mờ thích nghi; tiêu chuẩn Lyapunov.

## ABSTRACT

In this paper, Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control is designed to control trajectory tracking for Pendubot. A controller is based on Hierarchical Sliding Mode. Besides, Adaptive Fuzzy algorithm is used to approximate the unknown nonlinear functions of Hierarchical Sliding Mode with adaptive rules update online through time. The stability of the system through sine-trajectory tracking under that controller is proved by Lyapunov criteria. Simulation results prove again the success of this method.

**Keywords:** Pendubot; Hierarchical Sliding Mode Control; Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control; adaptive fuzzy; Lyapunov.

## 1. GIỚI THIỆU

Pendubot là từ ghép bởi Pendulum và robot và là một mô hình nghiên cứu kinh điển trong các phòng thí nghiệm. Đây là một hệ under-actuated có ngõ vào điều khiển ít hơn số bậc tự do với đặc tính phi tuyến cao và rất khó để điều khiển với độ phi tuyến rất cao. Do đó, mô hình này được sử dụng rộng rãi để kiểm chứng các giải thuật điều khiển. Bên cạnh việc điều khiển ổn định tại chỗ, điều khiển bám quỹ đạo cũng được sử dụng cho mô hình này. Ở bài báo [1], giải thuật PID kinh điển được áp dụng để điều khiển

cân bằng cho hệ tại vị trí thẳng đứng. Ngoài ra, bài báo [2] cũng dùng giải thuật LQR để điều khiển ổn định hệ tại vị trí thẳng đứng. Bài báo [3] sử dụng giải thuật trượt để điều khiển hệ bám theo quỹ đạo đặt trước. Bên cạnh đó, một số phương pháp như năng lượng [4], backstepping [5], ... cũng được sử dụng.

Tuy nhiên, các giải thuật đã đề cập ở trên không thực sự điều khiển hệ thống để đạt được đáp ứng tốt trong trường hợp xuất hiện nhiễu hoặc các thành phần không chắc do sai số của việc đo đạc thông số mô hình.

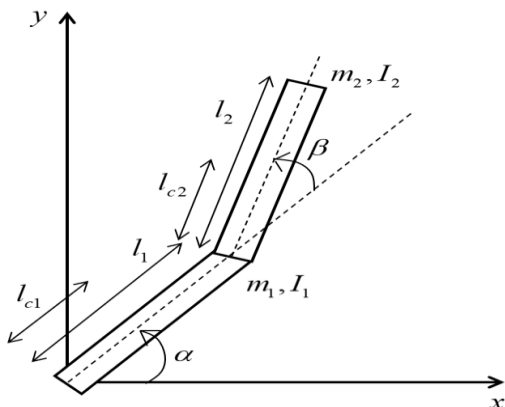
Do đó, giải thuật thích nghi được đề xuất để giải quyết vấn đề này.

Ở bài báo này, giải thuật Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control (AFHSMC) được sử dụng để điều khiển bám quỹ đạo cho hệ Pendubot. Cấu trúc của bộ điều khiển AFHSMC là sự tổng hợp giữa giải thuật Hierarchical Sliding Mode Control (HSMC) dùng để tính toán tín hiệu điều khiển cho hệ và Adaptive Fuzzy dùng để xấp xỉ các hàm số phi tuyến cần thiết cho việc tính toán tín hiệu điều khiển.

Bài báo trình bày các bước thiết kế bộ điều khiển AFHSMC và chứng minh tính ổn định của hệ thống. Hơn nữa, bảng luật mờ để tổng hợp giá trị ban đầu của hàm số phi tuyến cần xấp xỉ cũng được đề cập ở mục Phụ Lục. Dựa trên các tài liệu [6-9] luật mờ có thể được tạo ra ngẫu nhiên. Tuy nhiên, cách này chỉ có thể áp dụng để xấp xỉ đối với các hàm số có giá trị nhỏ do đó không thể áp dụng lên hệ Pendubot.

## 2. PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Kết cấu mô hình động lực học của pendubot được thể hiện ở Hình 1. Trong đó, đoạn đầu thanh 1 được nối với động cơ DC và đoạn đầu thanh 2 được nối đồng trục với encoder và quay tự do.



Hình 1. Hệ Pendubot trên tọa độ Oxy

Phương trình động học của hệ được miêu tả như sau [12]:

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

$$\text{Với } q = [\alpha \quad \beta]^T, \tau = [\tau_1 \quad 0]^T$$

$$\begin{cases} D(q) = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos \beta & \theta_2 + \theta_3 \cos \beta \\ \theta_2 + \theta_3 \cos \beta & \theta_2 \end{bmatrix} \\ C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -\theta_3 \sin \beta \dot{\beta} & -\theta_3 \sin \beta \dot{\beta} - \theta_3 \sin \beta \dot{\alpha} \\ \theta_3 \sin \beta \dot{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \\ G(q) = \begin{bmatrix} \theta_4 g \cos \alpha + \theta_5 g \cos(\alpha + \beta) \\ \theta_5 g \cos(\alpha + \beta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:  $\theta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$ ;  $\theta_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$ ;  $\theta_3 = m_2 l_1 l_{c2}$ ;  $\theta_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1$ ;  $\theta_5 = m_2 l_{c2}$ ;  $\tau$  là moment cung cấp cho động cơ được nối vào thanh 1

Bảng 1. Thông số hệ thống

Kí hiệu	Mô tả	Giá trị
$m_1$	Khối lượng của thanh 1	0.137kg
$l_1$	Chiều dài thanh 1	0.2m
$l_{c1}$	Khoảng cách từ trục động cơ đến trọng tâm thanh 1	0.1m
$I_1$	Moment quán tính của thanh 1	0.0017 $kg.m^2$
$m_2$	Khối lượng thanh 2	0.042kg
$l_2$	Chiều dài thanh 2	0.22m
$l_{c2}$	Khoảng cách từ trục Encoder trọng tâm thanh 2	0.105m
$I_2$	Moment quán tính thanh 2	0.00015 $kg.m^2$
$g$	Gia tốc trọng trường	9.8 $m/s^2$
$b_1$	Độ rộng thanh 1	0.03m
$b_2$	Độ rộng thanh 2	0.03m
$m_{sensor}$	Khối lượng cảm biến được gắn ở cuối thanh 1	0.1kg
$r_{sensor}$	Bán kính của cảm biến	0.02m

Trong đó,  $I_1$  và  $I_2$  được tính dựa theo công thức sau:

$$I_1 = \frac{1}{12} m_1 (l_1^2 + b_1^2) + m_{sensor} (r_{sensor}^2 + l_{c1}^2) \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} m_2 (l_2^2 + b_2^2)$$

Tuy nhiên ngõ vào  $\tau$  không phù hợp với mô hình thực tế với ngõ vào là điện áp cung

cấp cho motor V. Do đó,  $\tau$  sẽ được thay thế thông qua phương trình quan hệ giữa  $\tau$  và V như sau:

$$\tau = \frac{K_b}{R_m} V - \frac{K_b K_t}{R_m} \alpha \quad (4)$$

**Bảng 2. Thông số động cơ**

Kí hiệu	Mô tả	Giá trị
$R_m$	Điện trở phần ứng	$6.8\Omega$
$K_b$	Hằng số phản điện	$0.065Nm / A$
$K_t$	Hằng số moment	$0.065Nm / A$
$L$	Điện cảm motor	$0.25H$
$J_m$	Quán tính motor	$0.0001Nm / kgm^2$

Từ (1), phương trình động lực học của hệ thống có thể viết lại dưới dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)F + d_1 \\ \dot{x}_4 = f_2(x) + g_2(x)F + d_2 \end{cases} \quad (5)$$

Với  $x_1 = \alpha$ ,  $x_2 = \dot{\alpha}$ ,  $x_3 = \beta$ ,  $x_4 = \dot{\beta}$

Để đơn giản,  $f_1(x)$ ,  $g_1(x)$ ,  $f_2(x)$  và  $g_2(x)$  được viết gọn lại thành  $f_1$ ,  $g_1$ ,  $f_2$  và  $g_2$ .

### 3. BỘ ĐIỀU KHIỂN AFHSMC

#### 3.1 Thiết kế bộ điều khiển

Định nghĩa 2 mặt trượt ứng với góc thanh 1 và góc thanh 2 như sau:

$$s_1 = \dot{e}_1 + c_1 e_1 \quad (6)$$

$$s_2 = \dot{e}_2 + c_2 e_2$$

Trong đó,  $e_i = x_i - x_{id}$ ,  $\dot{e}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{id}$  với  $i=1,2$  và  $c_1$ ,  $c_2$  là hằng số. Biến  $x_{id}$  là giá trị đặt mong muốn của  $x_i$ .

Đạo hàm 2 mặt trượt (6) theo thời gian  $t$  và cho bằng 0, luật điều khiển cho từng mặt trượt thu được như sau:

$$u_{eq1} = -\frac{f_1 + c_1 \dot{e}_1 - \ddot{x}_{1d}}{g_1} \quad (7)$$

$$u_{eq2} = -\frac{f_2 + c_2 \dot{e}_2 - \ddot{x}_{2d}}{g_2}$$

Giả sử 1: Để có thể tính toán được  $u_{eq1}$ ,  $u_{eq2}$  (6) thì  $g_1$ ,  $g_2$  hữu hạn và khác 0.

Luật điều khiển chung để ổn định cho toàn hệ thống được tổng hợp từ luật điều khiển của các mặt trượt và khóa điều khiển. Luật điều khiển chung này được định nghĩa như sau:

$$u = u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw} \quad (8)$$

Định nghĩa một mặt trượt tổng hợp 2 mặt trượt con ở (6) như sau:

$$S = a_1 s_1 + a_2 s_2 \quad (9)$$

Trong đó,  $a_1$ ,  $a_2$  là hằng số và lớn hơn 0.

Đạo hàm  $S$  theo thời gian  $t$ , ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= a_1 \dot{s}_1 + a_2 \dot{s}_2 \\ &= a_1 (f_1 + g_1 u - \ddot{x}_{1d} + c_1 \dot{e}_1) + \\ &+ a_2 (f_2 + g_2 u - \ddot{x}_{2d} + c_2 \dot{e}_2) \end{aligned} \quad (10)$$

Thế luật điều khiển (8) vào (10), ta thu được

$$\begin{aligned} \dot{S} &= a_1 (c_1 \dot{e}_1 + f_1 - \ddot{x}_{1d}) + a_2 (c_2 \dot{e}_2 + f_2 - \ddot{x}_{2d}) \\ &+ (a_1 g_1 + a_2 g_2) (u_{eq1} + u_{eq2} + u_{sw}) \end{aligned} \quad (11)$$

Đặt

$$\dot{S} = -Q \text{sign}(S) - KS \quad (12)$$

Trong đó,  $Q$  và  $S$  là hằng số dương.

Từ (11) và (12), switching control tìm được như sau:

$$\begin{aligned} u_{sw} &= -\frac{1}{a_1 g_1 + a_2 g_2} [a_1 (c_1 \dot{e}_1 + f_1 - \ddot{x}_{1d}) + \\ &+ a_2 (c_2 \dot{e}_2 + f_2 - \ddot{x}_{2d}) + \\ &+ (a_1 g_1 + a_2 g_2) (u_{eq1} + u_{eq2}) + Q \text{sign}(S) + KS] \end{aligned} \quad (13)$$

Sau khi tìm được  $u_{sw}$ ,  $u_{eq1}$ ,  $u_{eq2}$ , ta thế (6), (13) vào (8), luật điều khiển chung cho toàn hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{a_1 g_1 + a_2 g_2} [a_1 (c_1 \dot{e}_1 + f_1 - \ddot{x}_{1d}) + \\ &+ a_2 (c_2 \dot{e}_2 + f_2 - \ddot{x}_{2d}) + Q \text{sign}(S) + KS] \end{aligned} \quad (14)$$

Để giảm hiện tượng chattering hàm  $\text{sign}(\cdot)$  sẽ được thay thế bằng hàm  $\text{sat}(\cdot)$

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} \frac{S}{\phi} & |S| < \phi \\ \text{sign}(S) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

Khi đó, (14) trở thành

$$u = -\frac{1}{a_1 g_1 + a_2 g_2} [a_1 (c_1 \dot{e}_1 + f_1 - \ddot{x}_{1d}) + a_2 (c_2 \dot{e}_2 + f_2 - \ddot{x}_{2d}) + Q \text{sat}(S) + KS] \quad (16)$$

Ở (16), luật điều khiển bằng giải thuật HSMC đã được tìm ra. Tuy nhiên, trong thực tế sẽ xuất hiện nhiễu bên ngoài hoặc các thành phần không chắc chắn gây ra bởi sai số trong đo đạc thông số hệ thống nên dẫn đến việc tính toán các hàm phi tuyến  $f(x)$  và  $g(x)$  bị sai. Do đó, bộ điều khiển Adaptive Fuzzy được đề xuất xấp xỉ các hàm số này.

Bởi vì hàm  $f(x)$  và  $g(x)$  là phi tuyến và giả rằng những hàm số chưa biết. Do đó, fuzzy thích nghi được sử dụng để xấp xỉ các hàm số này.  $\hat{f}(x|\theta_f)$  và  $\hat{g}(x|\theta_g)$  là xấp xỉ của  $f(x)$  và  $g(x)$  bằng fuzzy. Ngõ ra của fuzzy sử dụng phương pháp giải mờ trọng tâm được diễn tả như sau:

$$\hat{f}_i(x|\theta_{f_i}) = \theta_{f_i}^T \xi(x), \quad i=1,2 \quad (17)$$

$$\hat{g}_i(x|\theta_{g_i}) = \theta_{g_i}^T \xi(x), \quad i=1,2$$

Trong đó,  $\theta_{f_i} \in R^M$  và  $\theta_{g_i} \in R^M$  là vector tham số được cập nhật liên tục theo thời gian bằng luật thích nghi ().  $M$  là tổng luật mờ của bộ fuzzy.  $\xi(x)$  là hàm fuzzy cơ bản và được định nghĩa bởi (18).

$$\xi^l(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left( \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} \quad (18)$$

Với  $\mu_{F_i^l}(x_i)$  là hàm liên thuộc của tập mờ,  $n$  là tổng hàm liên thuộc được định nghĩa trên tập mờ.

Luật thích nghi để điều chỉnh vector thông số  $\theta_{f_i}$  và  $\theta_{g_i}$  được chọn như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{f_1} &= \gamma_{f_1} a_1 S \xi(x); \dot{\theta}_{g_1} = \gamma_{g_1} a_1 S \xi(x) u; \\ \dot{\theta}_{f_2} &= \gamma_{f_2} a_2 S \xi(x); \dot{\theta}_{g_2} = \gamma_{g_2} a_2 S \xi(x) u \end{aligned} \quad (19)$$

Định nghĩa vector thông số tối ưu  $\theta_{f_i}^*$ ,  $\theta_{g_i}^*$  với  $i=1,2$ . Các thông số này chỉ được dùng cho mục đích phân tích tính ổn định và được trình bày như sau:

$$\theta_{f_i}^* = \arg \min_{\theta_{f_i} \in \Omega_{\theta_{f_i}}} \left\{ \sup_{x \in \Omega_x} |\hat{f}_i(x|\theta_{f_i}) - f_i(x)| \right\} \quad (20)$$

$$\theta_{g_i}^* = \arg \min_{\theta_{g_i} \in \Omega_{\theta_{g_i}}} \left\{ \sup_{x \in \Omega_x} |\hat{g}_i(x|\theta_{g_i}) - g_i(x)| \right\}$$

Với

$$\Omega_{f_i} = \{ \theta_{f_i} \in R^M \mid \|\theta_{f_i}\| \leq N_{f_i} \}$$

$$\Omega_{g_i} = \{ \theta_{g_i} \in R^M \mid 0 < \varepsilon \leq \|\theta_{g_i}\| \leq N_{g_i} \}$$

Giả sử rằng  $\theta_{f_i}$  và  $\theta_{g_i}$  không bao giờ vượt qua giới hạn  $\Omega_{f_i}$  và  $\Omega_{g_i}$ .

Định nghĩa vector thông số sai số giữa  $\theta_{f_i}$  và  $\theta_{f_i}^*$  như sau:

$$\tilde{\theta}_{f_i} = \theta_{f_i} - \theta_{f_i}^*; \tilde{\theta}_{g_i} = \theta_{g_i} - \theta_{g_i}^* \quad (21)$$

Từ đó, ta có thể định nghĩa vector sai số xấp xỉ như sau:

$$\begin{aligned} w &= a_1 \left[ (\hat{f}_1(x|\theta_{f_1}^*) - f_1(x)) + (\hat{g}_1(x|\theta_{g_1}^*) - g_1(x))u \right] \\ &+ a_2 \left[ (\hat{f}_2(x|\theta_{f_2}^*) - f_2(x)) + (\hat{g}_2(x|\theta_{g_2}^*) - g_2(x))u \right] \end{aligned} \quad (22)$$

Cuối cùng, thay thế  $f$  và  $g$  bởi  $\hat{f}_i$  và  $\hat{g}_i$  vào luật điều khiển (16) ta tìm được luật điều khiển cho bộ điều khiển AFHSMC như sau:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{a_1 \hat{g}_1 + a_2 \hat{g}_2} [a_1 (c_1 \dot{e}_1 + \hat{f}_1 - \ddot{x}_{1d}) \\ &+ a_2 (c_2 \dot{e}_2 + \hat{f}_2 - \ddot{x}_{2d}) + Q \text{sat}(S) + KS] \end{aligned} \quad (23)$$

### 3.2 Chứng minh tính ổn định

Biến đổi luật điều khiển (23) trở thành như sau:

$$\begin{aligned} a_1 c_1 \dot{e}_1 + a_2 c_1 \dot{e}_1 = & -(a_1 \hat{g}_1 + a_2 \hat{g}_2)u - a_1 (\hat{f}_1 - \ddot{x}_{1d}) + \\ & -a_1 (\hat{f}_2 - \ddot{x}_{2d}) - Qsat(S) - KS \end{aligned} \quad (24)$$

Thế (24) vào đạo hàm của S (11) và cộng trừ w ở (22), ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{S} = & a_1 (f_1(x) - \hat{f}_1(x|\theta_{f_1})) + a_2 (f_2(x) - \hat{f}_2(x|\theta_{f_2})) + \left[ a_1 g_1(x) + a_2 g_2(x) \right. \\ & \left. - a_1 \hat{g}_1(x|\theta_{g_1}) - a_2 \hat{g}_2(x|\theta_{g_2}) \right] u - Qsat(S) - KS + w - w \\ = & a_1 (\hat{f}_1(x|\theta_{f_1}^*) - \hat{f}_1(x|\theta_{f_1})) + a_2 (\hat{f}_2(x|\theta_{f_2}^*) - \hat{f}_2(x|\theta_{f_2})) + \\ & + a_1 (\hat{g}_1(x|\theta_{g_1}^*) - \hat{g}_1(x|\theta_{g_1})) u + a_2 (\hat{g}_2(x|\theta_{g_2}^*) - \hat{g}_2(x|\theta_{g_2})) u - Qsat(S) - KS + w \end{aligned} \quad (25)$$

Đặt

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_{f_1} &= \theta_{f_1}^* - \theta_{f_1}, \tilde{\theta}_{f_2} = \theta_{f_2}^* - \theta_{f_2}, \\ \tilde{\theta}_{g_1} &= \theta_{g_1}^* - \theta_{g_1}, \tilde{\theta}_{g_2} = \theta_{g_2}^* - \theta_{g_2} \end{aligned} \quad (26)$$

Đạo hàm (26), vì  $\theta_{f_1}^*, \theta_{f_2}^*, \theta_{g_1}^*, \theta_{g_2}^*$  là hằng số nên ta được:

$$\dot{\tilde{\theta}}_{f_1} = -\dot{\theta}_{f_1}, \dot{\tilde{\theta}}_{f_2} = -\dot{\theta}_{f_2}, \dot{\tilde{\theta}}_{g_1} = -\dot{\theta}_{g_1}, \dot{\tilde{\theta}}_{g_2} = -\dot{\theta}_{g_2}$$

Kết hợp (17) và (26) thế vào (25), ta được:

$$\begin{aligned} \dot{S} = & a_1 \tilde{\theta}_{f_1}^T \xi(x) + a_2 \tilde{\theta}_{f_2}^T \xi(x) + a_1 \tilde{\theta}_{g_1}^T \xi(x) u \\ & + a_2 \tilde{\theta}_{g_2}^T \xi(x) u - Qsat(S) - KS + w \end{aligned} \quad (27)$$

Định nghĩa hàm Lyapunov như sau:

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} (S^2 + \frac{1}{\gamma_{f_1}} \tilde{\theta}_{f_1}^T \tilde{\theta}_{f_1} + \frac{1}{\gamma_{f_2}} \tilde{\theta}_{f_2}^T \tilde{\theta}_{f_2} \\ & + \frac{1}{\gamma_{g_1}} \tilde{\theta}_{g_1}^T \tilde{\theta}_{g_1} + \frac{1}{\gamma_{g_2}} \tilde{\theta}_{g_2}^T \tilde{\theta}_{g_2}) \geq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Đạo hàm V theo thời gian:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S\dot{S} + \frac{1}{\gamma_{f_1}} \tilde{\theta}_{f_1}^T \dot{\tilde{\theta}}_{f_1} + \frac{1}{\gamma_{f_2}} \tilde{\theta}_{f_2}^T \dot{\tilde{\theta}}_{f_2} + \frac{1}{\gamma_{g_1}} \tilde{\theta}_{g_1}^T \dot{\tilde{\theta}}_{g_1} + \frac{1}{\gamma_{g_2}} \tilde{\theta}_{g_2}^T \dot{\tilde{\theta}}_{g_2} = a_1 S \tilde{\theta}_{f_1}^T \xi(x) + a_2 S \tilde{\theta}_{f_2}^T \xi(x) + \\ & + a_1 S \tilde{\theta}_{g_1}^T \xi(x) u + a_2 S \tilde{\theta}_{g_2}^T \xi(x) u + \frac{1}{\gamma_{f_1}} \tilde{\theta}_{f_1}^T \dot{\tilde{\theta}}_{f_1} + \frac{1}{\gamma_{f_2}} \tilde{\theta}_{f_2}^T \dot{\tilde{\theta}}_{f_2} + \frac{1}{\gamma_{g_1}} \tilde{\theta}_{g_1}^T \dot{\tilde{\theta}}_{g_1} + \frac{1}{\gamma_{g_2}} \tilde{\theta}_{g_2}^T \dot{\tilde{\theta}}_{g_2} - Q|S| - KSS + wS \\ = & \tilde{\theta}_{f_1}^T \left[ a_1 S \xi(x) - \frac{1}{\gamma_{f_1}} \dot{\tilde{\theta}}_{f_1} \right] + \tilde{\theta}_{f_2}^T \left[ a_2 S \xi(x) - \frac{1}{\gamma_{f_2}} \dot{\tilde{\theta}}_{f_2} \right] + \tilde{\theta}_{g_1}^T \left[ a_1 S \xi(x) - \frac{1}{\gamma_{g_1}} \dot{\tilde{\theta}}_{g_1} \right] + \\ & + \tilde{\theta}_{g_2}^T \left[ a_2 S \xi(x) - \frac{1}{\gamma_{g_2}} \dot{\tilde{\theta}}_{g_2} \right] - Q|S| - KSS + wS \end{aligned} \quad (29)$$

Thế luật thích nghi đã chọn ở (19) vào (29), ta được

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -Q|S| - KSS + wS \\ \dot{V} \leq & -(Q - |w|)|S| - KSS \leq 0 \end{aligned} \quad (30)$$

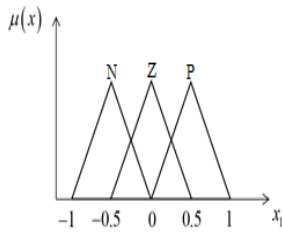
Từ (28) và (30), ta đã chứng minh thỏa mãn tiêu chuẩn Lyapunov. Do đó, hệ thống kín ổn định.

## 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

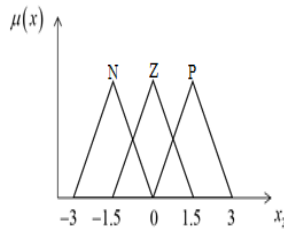
Mô phỏng giải thuật AFHSMC đối với hệ Pendubot và thông số hệ thống, thông số động cơ đã được đề cập ở Bảng 1 và Bảng 2. Ta tiến hành mô phỏng 2 trường hợp không có nhiễu tác động và có nhiễu tác động lên hệ thống. Giả sử nhiễu có dạng như sau:  $d_1 = 0.2 \sin(0.5t)(rad)$   $d_2 = 0.5 \sin t(rad)$ .

Ở phương trình động lực học của hệ (5)  $f_i$  và  $g_i$  ( $i=1,2$ ) là các hàm phụ thuộc các biến  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  và  $x_4$ . Do đó, các biến này sẽ được chọn làm ngõ vào của bộ Fuzzy. Trong đó,  $x_1 = \alpha$ ,  $x_2 = \dot{\alpha}$ ,  $x_3 = \beta$ ,  $x_4 = \dot{\beta}$ .

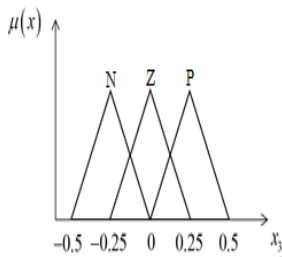
Hàm liên thuộc của  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  và  $x_4$  được mô tả ở Hình 2-5. Hàm liên thuộc của  $f_1$ ,  $g_1$ ,  $f_2$  và được mô tả ở Hình 6-9. Để đơn giản, mỗi ngõ vào gồm 3 hàm liên thuộc. Với càng nhiều hàm liên thuộc, ngõ ra của bộ Fuzzy sẽ tốt hơn. Nhưng hệ quả là, số lượng luật mờ cũng tăng lên rất nhiều dẫn đến việc tính toán mất nhiều tài nguyên hơn. Ví dụ, 81 luật mờ sẽ được thành lập đối với trường hợp 4 ngõ vào gồm 3 hàm liên thuộc và 625 với trường hợp 4 ngõ vào gồm 5 hàm liên thuộc. Bên cạnh đó, miền giá trị của mỗi ngõ vào sẽ bao quát các giá trị của mỗi biến trong quá trình bám quỹ đạo.



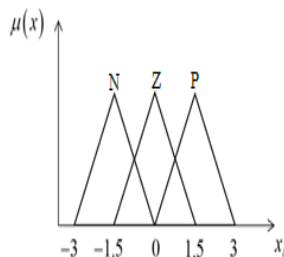
Hình 2. Hàm liên thuộc của  $x_1$



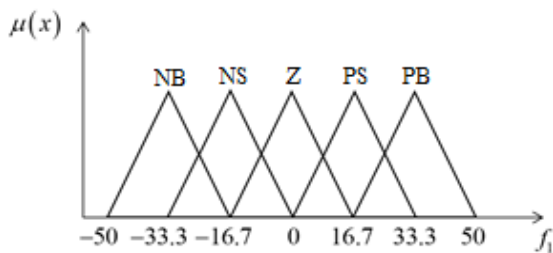
Hình 3. Hàm liên thuộc của  $x_2$



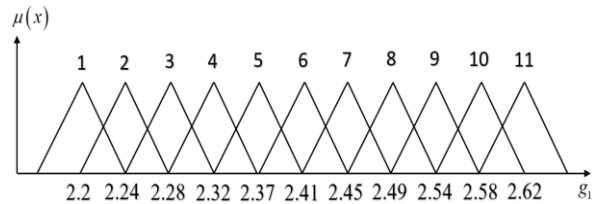
Hình 4. Hàm liên thuộc của  $x_3$



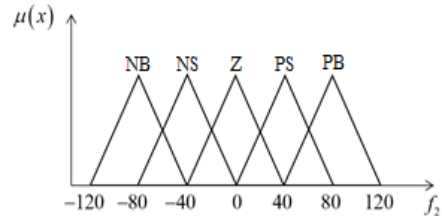
Hình 5. Hàm liên thuộc của  $x_4$



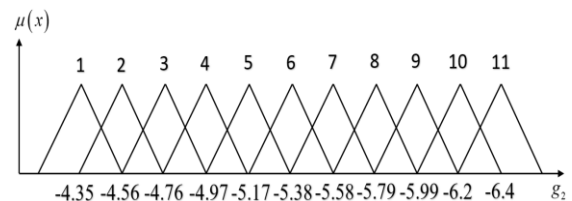
Hình 6. Hàm liên thuộc của  $f_1$



Hình 7. Hàm liên thuộc của  $g_1$



Hình 8. Hàm liên thuộc của  $f_2$



Hình 9. Hàm liên thuộc của  $g_2$

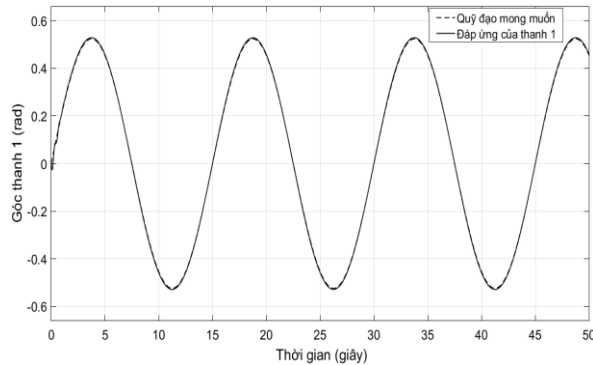
Giá trị ban đầu của  $\theta_{f_1}(0)$ ,  $\theta_{g_1}(0)$ ,  $\theta_{f_2}(0)$  và  $\theta_{g_2}(0)$  được tổng hợp từ các luật mờ. Bảng luật mờ được thành lập dựa theo tài liệu [10] và được đề cập ở phần Phụ Lục.

Giả sử ban đầu các biến trạng thái của hệ Pendubot ở vị trí đứng yên hướng xuống  $[x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [0, 0, 0, 0]^T$  và thông số bộ điều khiển SMC cùng với hằng số thích nghi được chọn như sau:

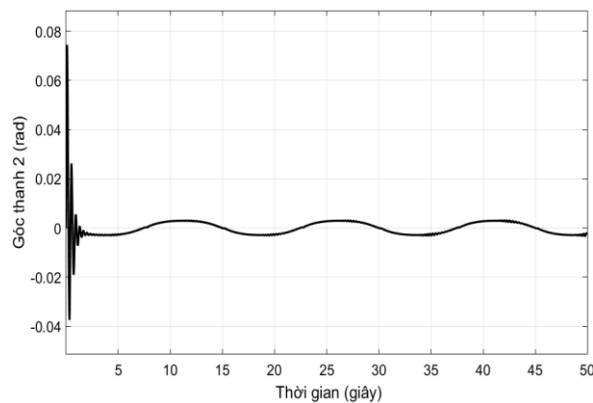
$$\begin{aligned} a_1 &= 3.42; & a_2 &= 1.73; & c_1 &= 2.76; \\ c_2 &= 8.23; & Q &= 6.75; & K &= 0.6; \\ \gamma_{f_1} &= 9; & \gamma_{g_1} &= 0.06; & \gamma_{f_2} &= 9; \\ \gamma_{g_2} &= 0.4 \end{aligned} \quad (31)$$

Quỹ đạo mong muốn để thanh 1 bám theo được chọn có dạng hình sin như sau:  $x_{1d} = 0.52 \sin(0.42t)$ . Mục tiêu điều khiển là để thanh 1 bám theo quỹ đạo mong muốn trong khi đó thanh 2 vẫn giữ ở vị trí thẳng đứng. Ta có  $x_3$  là góc giữa thanh 2 và thanh 1. Do đó,  $x_3$  sẽ được thay bằng  $x_3 - x_1$ , lúc này góc của thanh 2 sẽ so với vị trí thẳng đứng.

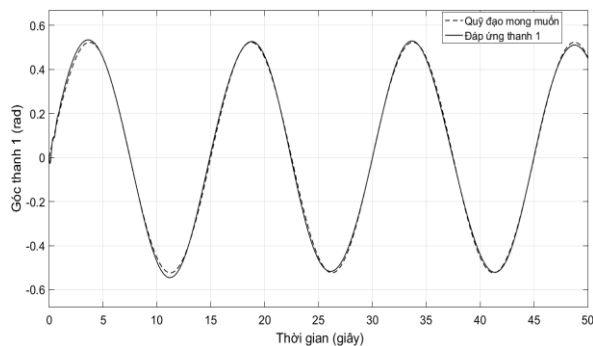
Kết quả mô phỏng của hệ thống khi chưa có nhiễu tác động được thể hiện ở Hình 10-11 và trường hợp khi có nhiễu tác động được thể hiện ở Hình 12-13.



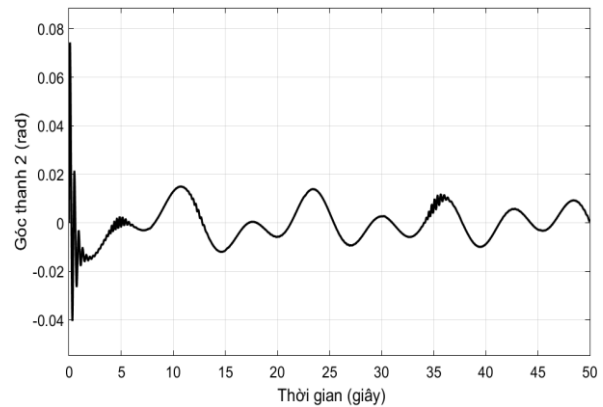
**Hình 10.** Đáp ứng của thanh 1 bám theo quỹ đạo mong muốn khi chưa có nhiễu



**Hình 11.** Đáp ứng của con lắc khi bám quỹ đạo với giải thuật khi chưa có nhiễu



**Hình 12.** Đáp ứng của thanh 1 bám theo quỹ đạo mong muốn khi có nhiễu



**Hình 13.** Đáp ứng của con lắc khi bám quỹ đạo với giải thuật khi có nhiễu

Từ Hình 10-11 cho thấy bộ điều khiển đã xấp xỉ thành công hàm số chưa biết với bảng luật mờ được tạo ra và điều khiển hệ bám theo quỹ đạo đặt trước rất tốt. Hình 12-13 thể hiện đáp ứng của hệ thống cho có nhiễu ngoài tác động vào, tuy quá trình bám quỹ đạo bị ảnh hưởng nhưng hệ vẫn bám theo được quỹ đạo đặt ra.

## 5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, hệ Pendubot được xem xét trở thành đối tượng nghiên cứu và giải thuật AFHSMC đã áp dụng điều khiển bám quỹ đạo thành công cho hệ trong môi trường mô phỏng

Ngoài ra, bài báo trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển AFHSMC và chứng minh tính ổn định của hệ thống khi được điều khiển bởi bộ điều khiển AFHSMC. Bên cạnh đó, các bảng mờ được thành lập để xấp xỉ các giá trị ban đầu cho các hàm phi tuyến chưa biết.

Với giải thuật AFHSMC, hệ thống có thể bám theo quỹ đạo đặt trước ngay cả ở trường hợp có nhiễu từ bên ngoài tác động vào. Việc thành lập luật mờ để xấp xỉ giá trị ban đầu cho hàm số cũng rất quan trọng khi hàm số có giá trị lớn như ở hệ Pendubot.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Edgar Sanchez, Victor Flores, *Real-time fuzzy PI + PD control for an underactuated robot*, IEEE international Symposium on Intelligent Control, Pp. 137-141, 2002.
- [2] Jianfeng Xu, Huzhen Song, *The Study on Pendubot Control Linear Quadratic Regulator and Particle Swarm Optimization*, Journal of Digital Information Management, Vol. 11, Pp. 16-24, 2013.
- [3] Jorge Serrano-Heredia, Alexander G. Loukianov and Eduardo Bayro-Corrochano, *Sliding Mode Block Control Regulation of the Pendubot*, IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Pp. 8249-8254, 2011.
- [4] Isabelle Fantoni, Rogelio Lozano, and Mark W. Spong, *Energy Based Control of the Pendubot*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, 2000.
- [5] Shubhobrata Rudra, Ranjit Kumar Barai, *Design of block backstepping based nonlinear state feedback controller for pendubot*, IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation, 2016.
- [6] Li-Xin Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall Inc, ISBN: 0135408822, 1997.
- [7] Li-Xin Wang, *Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems*, IEEE Transactions on fuzzy systems, Vol. 1, 1993.
- [8] Chih-Lyang Hwang, Chiang-Cheng Chiang, and Yao-Wei Yeh, *Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding-Mode Control for the Trajectory Tracking of Uncertain Under-Actuated Nonlinear Dynamic Systems*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 22, Pp. 286 – 299, 2014.
- [9] Faten Baklouti, Sinda Aloui, and Abdessattar Chaari, *Adaptive Fuzzy Sliding Mode Tracking Control of Uncertain Underactuated Nonlinear Systems: A Comparative Study*, Journal of Control Science and Engineering 2016.
- [10] Li-Xin Wang and Jerry M. Mendel, *Generating Fuzzy Rules by Learning form Examples*, IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, Vol. 22, 1992.
- [11] Salim Labiod, Mohamed Seghir Boucherit, Thierry Marie Guerra, *Adaptive Fuzzy Control of A Class of MIMO Nonlinear Systems*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 151, Pp. 59 – 77, 2005.
- [12] Daniel J. Block and Mark W.Spong, *Mechanical Design and Control of the Pendubot*, SAE Technical 951199, 1995.

**Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:**

Võ Anh Khoa

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

Email: 16151036@student.hcmute.edu.vn



## PHỤ LỤC

**Bảng 3. Luật mờ khởi tạo ban đầu của hàm  $f_1$**

STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_1$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_1$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_1$
1	NE	NE	NE	NE	NB	28	ZE	NE	NE	NE	ZE	55	PO	NE	NE	NE	PB
2	NE	NE	NE	ZE	NB	29	ZE	NE	NE	ZE	ZE	56	PO	NE	NE	ZE	ZE
3	NE	NE	NE	PO	NB	30	ZE	NE	NE	PO	ZE	57	PO	NE	NE	PO	PS
4	NE	NE	ZE	NE	NB	31	ZE	NE	ZE	NE	ZE	58	PO	NE	ZE	NE	NS
5	NE	NE	ZE	ZE	NB	32	ZE	NE	ZE	ZE	PS	59	PO	NE	ZE	ZE	ZE
6	NE	NE	ZE	PO	NB	33	ZE	NE	ZE	PO	PM	60	PO	NE	ZE	PO	PS
7	NE	NE	PO	NE	NB	34	ZE	NE	PO	NE	ZE	61	PO	NE	PO	NE	ZE
8	NE	NE	PO	ZE	NB	35	ZE	NE	PO	ZE	PS	62	PO	NE	PO	ZE	PS
9	NE	NE	PO	PO	NB	36	ZE	NE	PO	PO	PM	63	PO	NE	PO	PO	PM
10	NE	ZE	NE	NE	NB	37	ZE	ZE	NE	NE	NS	64	PO	ZE	NE	NE	NM
11	NE	ZE	NE	ZE	NB	38	ZE	ZE	NE	ZE	ZE	65	PO	ZE	NE	ZE	NS
12	NE	ZE	NE	PO	NB	39	ZE	ZE	NE	PO	PS	66	PO	ZE	NE	PO	ZE
13	NE	ZE	ZE	NE	NB	40	ZE	ZE	ZE	NE	NS	67	PO	ZE	ZE	NE	NM
14	NE	ZE	ZE	ZE	NB	41	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	68	PO	ZE	ZE	ZE	NS
15	NE	ZE	ZE	PO	NB	42	ZE	ZE	ZE	PO	ZE	69	PO	ZE	ZE	PO	ZE
16	NE	ZE	PO	NE	NB	43	ZE	ZE	PO	NE	ZE	70	PO	ZE	PO	NE	NM
17	NE	ZE	PO	ZE	NB	44	ZE	ZE	PO	ZE	ZE	71	PO	ZE	PO	ZE	NS
18	NE	ZE	PO	PO	NB	45	ZE	ZE	PO	PO	ZE	72	PO	ZE	PO	PO	ZE
19	NE	PO	NE	NE	NB	46	ZE	PO	NE	NE	ZE	73	PO	PO	NE	NE	NB
20	NE	PO	NE	ZE	NB	47	ZE	PO	NE	ZE	ZE	74	PO	PO	NE	ZE	NM
21	NE	PO	NE	PO	NB	48	ZE	PO	NE	PO	ZE	75	PO	PO	NE	PO	NS
22	NE	PO	ZE	NE	NB	49	ZE	PO	ZE	NE	ZE	76	PO	PO	ZE	NE	NB
23	NE	PO	ZE	ZE	NB	50	ZE	PO	ZE	ZE	ZE	77	PO	PO	ZE	ZE	NN
24	NE	PO	ZE	PO	NB	51	ZE	PO	ZE	PO	ZE	78	PO	PO	ZE	PO	NS
25	NE	PO	PO	NE	NB	52	ZE	PO	PO	NE	ZE	79	PO	PO	PO	NE	NM
26	NE	PO	PO	ZE	NB	53	ZE	PO	PO	ZE	ZE	80	PO	PO	PO	ZE	NM
27	NE	PO	PO	PO	NB	54	ZE	PO	PO	PO	ZE	81	PO	PO	PO	PO	NS

**Bảng 4. Luật mờ khởi tạo ban đầu của hàm  $g_1$**

STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_1$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_1$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_1$
1	NE	NE	NE	NE	3	28	ZE	NE	NE	NE	11	55	PO	NE	NE	NE	1
2	NE	NE	NE	ZE	3	29	ZE	NE	NE	ZE	11	56	PO	NE	NE	ZE	1
3	NE	NE	NE	PO	3	30	ZE	NE	NE	PO	11	57	PO	NE	NE	PO	1
4	NE	NE	ZE	NE	3	31	ZE	NE	ZE	NE	11	58	PO	NE	ZE	NE	4
5	NE	NE	ZE	ZE	2	32	ZE	NE	ZE	ZE	11	59	PO	NE	ZE	ZE	2
6	NE	NE	ZE	PO	2	33	ZE	NE	ZE	PO	11	60	PO	NE	ZE	PO	3
7	NE	NE	PO	NE	1	34	ZE	NE	PO	NE	11	61	PO	NE	PO	NE	3
8	NE	NE	PO	ZE	1	35	ZE	NE	PO	ZE	11	62	PO	NE	PO	ZE	4
9	NE	NE	PO	PO	1	36	ZE	NE	PO	PO	11	63	PO	NE	PO	PO	3
10	NE	ZE	NE	NE	4	37	ZE	ZE	NE	NE	11	64	PO	ZE	NE	NE	1
11	NE	ZE	NE	ZE	4	38	ZE	ZE	NE	ZE	11	65	PO	ZE	NE	ZE	1
12	NE	ZE	NE	PO	3	39	ZE	ZE	NE	PO	11	66	PO	ZE	NE	PO	1
13	NE	ZE	ZE	NE	2	40	ZE	ZE	ZE	NE	11	67	PO	ZE	ZE	NE	2
14	NE	ZE	ZE	ZE	2	41	ZE	ZE	ZE	ZE	11	68	PO	ZE	ZE	ZE	2
15	NE	ZE	ZE	PO	2	42	ZE	ZE	ZE	PO	11	69	PO	ZE	ZE	PO	2
16	NE	ZE	PO	NE	1	43	ZE	ZE	PO	NE	11	70	PO	ZE	PO	NE	3
17	NE	ZE	PO	ZE	1	44	ZE	ZE	PO	ZE	11	71	PO	ZE	PO	ZE	3
18	NE	ZE	PO	PO	1	45	ZE	ZE	PO	PO	11	72	PO	ZE	PO	PO	3
19	NE	PO	NE	NE	3	46	ZE	PO	NE	NE	11	73	PO	PO	NE	NE	1
20	NE	PO	NE	ZE	3	47	ZE	PO	NE	ZE	11	74	PO	PO	NE	ZE	1
21	NE	PO	NE	PO	3	48	ZE	PO	NE	PO	11	75	PO	PO	NE	PO	1
22	NE	PO	ZE	NE	2	49	ZE	PO	ZE	NE	11	76	PO	PO	ZE	NE	4
23	NE	PO	ZE	ZE	2	50	ZE	PO	ZE	ZE	11	77	PO	PO	ZE	ZE	2
24	NE	PO	ZE	PO	2	51	ZE	PO	ZE	PO	11	78	PO	PO	ZE	PO	3
25	NE	PO	PO	NE	1	52	ZE	PO	PO	NE	11	79	PO	PO	PO	NE	3
26	NE	PO	PO	ZE	1	53	ZE	PO	PO	ZE	11	80	PO	PO	PO	ZE	4
27	NE	PO	PO	PO	1	54	ZE	PO	PO	PO	11	81	PO	PO	PO	PO	3

**Bảng 5. Luật mờ khởi tạo ban đầu của hàm  $f_2$**

STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_2$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_2$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f_2$
1	NE	NE	NE	NE	PS	28	ZE	NE	NE	NE	ZE	55	PO	NE	NE	NE	NB
2	NE	NE	NE	ZE	PS	29	ZE	NE	NE	ZE	ZE	56	PO	NE	NE	ZE	NB
3	NE	NE	NE	PO	PS	30	ZE	NE	NE	PO	ZE	57	PO	NE	NE	PO	NB
4	NE	NE	ZE	NE	PB	31	ZE	NE	ZE	NE	ZE	58	PO	NE	ZE	NE	NB
5	NE	NE	ZE	ZE	PB	32	ZE	NE	ZE	ZE	ZE	59	PO	NE	ZE	ZE	NB
6	NE	NE	ZE	PO	PB	33	ZE	NE	ZE	PO	ZE	60	PO	NE	ZE	PO	NB
7	NE	NE	PO	NE	PB	34	ZE	NE	PO	NE	ZE	61	PO	NE	PO	NE	NB
8	NE	NE	PO	ZE	PB	35	ZE	NE	PO	ZE	ZE	62	PO	NE	PO	ZE	NB
9	NE	NE	PO	PO	PB	36	ZE	NE	PO	PO	ZE	63	PO	NE	PO	PO	NB
10	NE	ZE	NE	NE	PS	37	ZE	ZE	NE	NE	ZE	64	PO	ZE	NE	NE	NB
11	NE	ZE	NE	ZE	PS	38	ZE	ZE	NE	ZE	ZE	65	PO	ZE	NE	ZE	NB
12	NE	ZE	NE	PO	PS	39	ZE	ZE	NE	PO	ZE	66	PO	ZE	NE	PO	NB
13	NE	ZE	ZE	NE	PB	40	ZE	ZE	ZE	NE	ZE	67	PO	ZE	ZE	NE	NB
14	NE	ZE	ZE	ZE	PB	41	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	68	PO	ZE	ZE	ZE	NB
15	NE	ZE	ZE	PO	PB	42	ZE	ZE	ZE	PO	ZE	69	PO	ZE	ZE	PO	NB
16	NE	ZE	PO	NE	PB	43	ZE	ZE	PO	NE	ZE	70	PO	ZE	PO	NE	NB
17	NE	ZE	PO	ZE	PB	44	ZE	ZE	PO	ZE	ZE	71	PO	ZE	PO	ZE	NB
18	NE	ZE	PO	PO	PB	45	ZE	ZE	PO	PO	ZE	72	PO	ZE	PO	PO	NB
19	NE	PO	NE	NE	PS	46	ZE	PO	NE	NE	ZE	73	PO	PO	NE	NE	NB
20	NE	PO	NE	ZE	PB	47	ZE	PO	NE	ZE	ZE	74	PO	PO	NE	ZE	NB
21	NE	PO	NE	PO	PS	48	ZE	PO	NE	PO	ZE	75	PO	PO	NE	PO	NB
22	NE	PO	ZE	NE	PB	49	ZE	PO	ZE	NE	ZE	76	PO	PO	ZE	NE	NB
23	NE	PO	ZE	ZE	PB	50	ZE	PO	ZE	ZE	ZE	77	PO	PO	ZE	ZE	NB
24	NE	PO	ZE	PO	PB	51	ZE	PO	ZE	PO	ZE	78	PO	PO	ZE	PO	NB
25	NE	PO	PO	NE	PB	52	ZE	PO	PO	NE	ZE	79	PO	PO	PO	NE	NB
26	NE	PO	PO	ZE	PB	53	ZE	PO	PO	ZE	ZE	80	PO	PO	PO	ZE	NB
27	NE	PO	PO	PO	PB	54	ZE	PO	PO	PO	ZE	81	PO	PO	PO	PO	NS

**Bảng 6. Luật mờ khởi tạo ban đầu của hàm  $g_2$**

STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_2$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_2$	STT	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$g_2$
1	NE	NE	NE	NE	3	28	ZE	NE	NE	NE	11	55	PO	NE	NE	NE	1
2	NE	NE	NE	ZE	3	29	ZE	NE	NE	ZE	11	56	PO	NE	NE	ZE	1
3	NE	NE	NE	PO	3	30	ZE	NE	NE	PO	11	57	PO	NE	NE	PO	1
4	NE	NE	ZE	NE	5	31	ZE	NE	ZE	NE	11	58	PO	NE	ZE	NE	2
5	NE	NE	ZE	ZE	2	32	ZE	NE	ZE	ZE	11	59	PO	NE	ZE	ZE	1
6	NE	NE	ZE	PO	2	33	ZE	NE	ZE	PO	11	60	PO	NE	ZE	PO	4
7	NE	NE	PO	NE	1	34	ZE	NE	PO	NE	11	61	PO	NE	PO	NE	4
8	NE	NE	PO	ZE	1	35	ZE	NE	PO	ZE	11	62	PO	NE	PO	ZE	4
9	NE	NE	PO	PO	1	36	ZE	NE	PO	PO	11	63	PO	NE	PO	PO	4
10	NE	ZE	NE	NE	5	37	ZE	ZE	NE	NE	11	64	PO	ZE	NE	NE	1
11	NE	ZE	NE	ZE	4	38	ZE	ZE	NE	ZE	11	65	PO	ZE	NE	ZE	1
12	NE	ZE	NE	PO	3	39	ZE	ZE	NE	PO	11	66	PO	ZE	NE	PO	1
13	NE	ZE	ZE	NE	2	40	ZE	ZE	ZE	NE	11	67	PO	ZE	ZE	NE	2
14	NE	ZE	ZE	ZE	2	41	ZE	ZE	ZE	ZE	11	68	PO	ZE	ZE	ZE	2
15	NE	ZE	ZE	PO	2	42	ZE	ZE	ZE	PO	11	69	PO	ZE	ZE	PO	2
16	NE	ZE	PO	NE	1	43	ZE	ZE	PO	NE	11	70	PO	ZE	PO	NE	3
17	NE	ZE	PO	ZE	1	44	ZE	ZE	PO	ZE	11	71	PO	ZE	PO	ZE	3
18	NE	ZE	PO	PO	1	45	ZE	ZE	PO	PO	11	72	PO	ZE	PO	PO	3
19	NE	PO	NE	NE	3	46	ZE	PO	NE	NE	11	73	PO	PO	NE	NE	1
20	NE	PO	NE	ZE	3	47	ZE	PO	NE	ZE	11	74	PO	PO	NE	ZE	1
21	NE	PO	NE	PO	3	48	ZE	PO	NE	PO	11	75	PO	PO	NE	PO	1
22	NE	PO	ZE	NE	2	49	ZE	PO	ZE	NE	11	76	PO	PO	ZE	NE	4
23	NE	PO	ZE	ZE	2	50	ZE	PO	ZE	ZE	11	77	PO	PO	ZE	ZE	2
24	NE	PO	ZE	PO	2	51	ZE	PO	ZE	PO	11	78	PO	PO	ZE	PO	3
25	NE	PO	PO	NE	1	52	ZE	PO	PO	NE	11	79	PO	PO	PO	NE	3
26	NE	PO	PO	ZE	1	53	ZE	PO	PO	ZE	11	80	PO	PO	PO	ZE	4
27	NE	PO	PO	PO	1	54	ZE	PO	PO	PO	11	81	PO	PO	PO	PO	3