

# THIẾT BỊ CÁCH LY ĐỊA CHẤN SỬ DỤNG LUẬT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT MỜ THÍCH NGHI

ADAPTIVE FUZZY SLIDING MODE CONTROLLER - AFSMC

Vũ Tuấn Anh<sup>1\*</sup>,  
Nguyễn Hoài Sơn<sup>1</sup>, Lưu Vũ Hải<sup>1</sup>

## TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một thiết bị cách ly địa chấn dưới tác động của động đất sử dụng luật điều khiển trượt mờ thích nghi - AFSMC. Đây là phương pháp khả thi để kiểm soát độ rung của tầng trên cho một mô hình 2 tầng. Chế độ trượt kết hợp thuật toán logic mờ tạo ra bộ điều khiển mờ thích nghi, cùng với hệ thống giảm chấn giúp chống lại các kích thích từ động đất. Tính ổn định của phương pháp điều khiển được đảm bảo bởi lý thuyết Lyapunov - tiêu chuẩn ổn định sử dụng cho các luật điều khiển thích nghi và độ hội tụ. Nhóm tác giả đã đánh giá hiệu suất, tính ổn định của bộ điều khiển trong việc kiểm soát rung động thông qua mô phỏng. Kết quả cho thấy hiệu quả của phương pháp được đề xuất trong việc giảm rung động ở tầng trên cả về vận tốc và gia tốc đối với một số trận động đất điển hình.

**Từ khóa:** Điều khiển mờ, chế độ trượt, điều khiển thích nghi, động đất, thiết bị cách ly địa chấn.

## ABSTRACT

The paper analyzes the vibration of an active suspension device using adaptive fuzzy control (AFSCM) law under earthquake excitation. This is a possible method to control the vibration of the top-layer for a active two-layer suspension system. The fuzzy sliding mode is combined with adaptive law to suppress the device's top-layer vibration against earthquake excitation. The stability of the control method is guaranteed by Lyapunov theory. Numerical simulations consider the proposed controller's performance on active control of the proposed seismic device subjected to typical earthquake excitations. The results indicate the effectiveness of the proposed method to reduce the vibration of the top layer under some kinds of earthquakes.

**Keywords:** Sliding mode, Fuzzy control, Adaptive, Earthquake, Seismic Isolation device

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: bak.hau@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/3/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2022

## 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, cùng với sự phát triển của đô thị hóa, số lượng tòa nhà cao tầng ngày càng nhiều. Những cấu trúc này chịu ảnh hưởng tiêu cực từ ngoại lực lớn như động đất, gió mạnh. Bảo vệ cấu trúc của công trình và thiết bị bên trong khỏi các mối nguy hiểm do chấn động gây ra

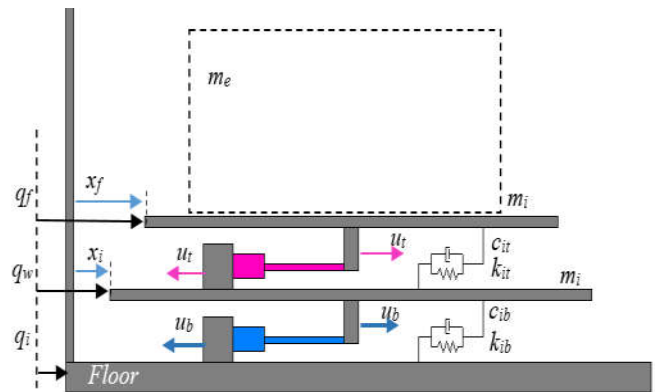
ngày càng được quan tâm nghiên cứu. Kiểm soát rung động cấu trúc có thể coi là một giải pháp tối ưu để giảm tác động từ động đất. Một số nghiên cứu tập trung vào phân tích rung động của các cấu trúc lớn [1-9]. Casella và cộng sự [1] đã phân tích hiệu quả của phương pháp điều khiển phi tuyến trong việc triệt tiêu rung động cho một mô hình có cấu trúc lớn, mục đích là trình bày 2 giải pháp kiểm soát rung động khác nhau là AJT (Air Jet Thruster) và PAM (Piezoelectric Active Member). Li và cộng sự [2] đã xem xét sự rung động của hai tòa nhà 40 và 79 tầng bằng phương pháp kích thích giả PEM dưới tác động của động đất. Độ rung của tòa nhà RC 8 tầng đã được Bindi và cộng sự [3] xem xét trong điều kiện môi trường sử dụng các phương pháp nhận dạng phi tham số, cụ thể là chọn đỉnh và phân tách miền tần số. Nghiên cứu về hạn chế phản ứng rung động của cấu trúc đã thu hút nhiều sự quan tâm từ quan điểm ứng dụng. Takahashi và cộng sự [4] đề xuất hai loại thiết bị điều khiển là AVS (Active Variable Stiffness) và ADV (Active Variable Damping) cho công trình có đặc điểm cấu trúc thay đổi dưới các trận động đất lớn. Chang và cộng sự [5] đã trình bày một phương pháp điều khiển để cải thiện hiệu suất điều khiển của mạng nơ-ron xác suất kiểu mạng để hạn chế rung động của tòa nhà 3 tầng. Wang và Adeli [6] đã trình bày phương pháp kiểm soát độ rung của hệ thống tòa nhà 76 tầng dưới tác động của gió. Quá trình này được đề xuất dựa trên điều khiển chế độ trượt. Pourzeynali và Salimi [7] xem xét hiệu quả của hệ thống van điều tiết khối lượng được điều chỉnh tích cực để hạn chế rung động của một tòa nhà thép 12 tầng. Bộ điều khiển LQR được sử dụng cho ATMD và các tham số tối ưu của hệ thống được tìm thấy bằng cách sử dụng GA. Yanik và cộng sự [8] đã trình bày một phương pháp điều khiển để giảm thiểu rung động của một tòa nhà 6 tầng bằng quá trình được coi là sự giảm thiểu năng lượng cơ học của hệ thống 3D. Thenozhi và Yu [9] đã đề xuất một phân tích lý thuyết về bộ điều khiển PD/PID của cấu trúc tòa nhà sử dụng bộ điều khiển rung chủ động. Kết quả lý thuyết được áp dụng thành công khi mô phỏng số và cho một nguyên mẫu tòa nhà 2 tầng.

Trong những năm gần đây, logic mờ là một phương pháp điều khiển thu hút được nhiều sự quan tâm, nhất là

trong giảm rung động cấu trúc. Nguyen và cộng sự [10] đã đề xuất bộ điều khiển mờ bán chủ động để nâng cao hiệu suất của hệ thống cách ly địa chấn. Kết quả mô phỏng cho thấy FC làm giảm mô phỏng đáng kể dịch chuyển tương đối và gia tốc tuyệt đối của tòa nhà. Martin và cộng sự nghiên cứu về bộ điều khiển mờ tối ưu được đề xuất để giảm thiểu rung chấn cho một tòa nhà 5 tầng. Hệ thống gồm các giảm chấn lưu biến từ tính (MR) và FC được lắp đặt ở mỗi tầng của tòa nhà. Kết quả cho thấy cả hai chỉ số gia tốc tuyệt đối và dịch chuyển tương đối của tòa nhà giảm hiểu rõ rệt. Trong [11] một hệ thống treo chủ động được điều khiển bằng FC để giảm rung động cho thân xe. Hệ thống có thể làm việc khi giao động trong khoảng tần số 3 - 30Hz, độ dịch chuyển tuyệt đối và gia tốc tương đối có thể giảm được 30%. Marji và các cộng sự đã đề xuất một bộ điều khiển mờ để kiểm soát hệ thống treo độc lập của ô tô [12]. Tín hiệu đầu vào là lực phanh và kích thích truyền động của mỗi bánh xe. Hệ thống giúp phương tiện có giảm đáng kể gia tốc tuyệt đối và dịch chuyển tương đối, với thời gian đáp ứng trong khoảng 1,5s. Có thể thấy việc sử dụng mờ thông thường có một số nhược điểm như đáp ứng thời gian trễ, khá phức tạp trong thực hiện các bước làm mờ, suy luận, giải mờ và nó không đảm bảo trật tự ngữ nghĩa giá trị ngôn ngữ của các biến ngôn ngữ. Từ đó các phương pháp tối ưu bộ điều khiển mờ được đề xuất nhiều nghiên cứu [13-14]. Thuật toán Whale Optimization được Mahdi và cộng sự đề xuất [13] để tối ưu hóa cho điều khiển mờ trong kiểm soát rung động cấu trúc. Trong đó hàm mục tiêu và tiêu chí hiệu suất được xem xét dựa trên các phản hồi phi tuyến của cấu trúc. Kasemi và cộng sự [14] đã đề xuất bộ thuật toán PID-Fuzzy cho hệ MR dampers được áp dụng trong hệ thống giảm chấn chủ động. Kết quả cho hiệu suất điều khiển của PID-Fuzzy khi giảm được 83% rung động.

Hầu hết các công trình nghiên cứu đều tập trung vào việc giảm rung động cho cấu trúc khối lượng lớn mà không quan tâm nhiều đến các thiết bị nhỏ. Khi tòa nhà rung chuyển dưới một trận động đất, các thiết bị nhỏ được lắp đặt bên trong hệ thống cũng bị tác động đáng kể. Nó còn gây ra nguy hiểm cho con người hoặc hư hỏng nặng cho thiết bị. Do đó, việc điều khiển các hệ thống kiểm soát rung động để đảm bảo yêu cầu về khả năng sử dụng và an toàn. Bài báo này đề xuất một hệ thống cách ly địa chấn chủ động 2 tầng để kiểm soát độ rung của các thiết bị nhỏ dưới tác động của động đất. Một phương pháp điều khiển được đề xuất dựa trên chế độ trượt mờ với luật thích nghi để giảm thiểu rung động của tầng trên. Ý tưởng của bộ điều khiển là cải tiến quỹ đạo dịch chuyển trên các bề mặt trượt để giảm độ nhiễu và logic mờ để va đập vào các bề mặt trượt, tăng chất lượng của hệ thống và giảm thiểu rung động dưới tác động của động đất. Một mặt trượt do người dùng xác định có thể đặc trưng cho hệ thống vòng kín và giúp dễ dàng thu được quy tắc mờ hóa. Các luật thích nghi dựa trên lý thuyết Lyapunov với sự hiệu chỉnh tự động, do đó giảm sự phụ thuộc của các chuyên gia con người vào quá trình thiết kế. Kết quả mô phỏng xác minh tính ổn định và hiệu suất của hệ thống.

2. HỆ THỐNG CÁCH LY ĐỊA CHẤN 2 TẦNG CHỦ ĐỘNG



Hình 1. Mô hình hệ thống cách ly địa chấn 2 tầng

Mô hình hệ thống giảm chấn 2 tầng được sử dụng trong hình 1. Các phương trình vi phân động lực học của mô hình này có thể được biểu diễn như sau:

$$M \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_f \end{Bmatrix} = -M \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{q}_w + F \begin{Bmatrix} u_b \\ u_t \end{Bmatrix} \tag{1}$$

Với:

$$M = \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_i + m_e \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{ib} + c_{it} & -c_{it} \\ -c_{it} & c_{it} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{ib} + k_{it} & -k_{it} \\ -k_{it} & k_{it} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

- $m_e$ : Tải trọng động (kg)
- $m_i$ : Khối lượng mỗi tầng (kg)
- $k_{it}, k_{ib}$ : Độ cứng lò xo (N/m)
- $c_{it}, c_{ib}$ : Hệ số cản nhớt (Ns/m)
- $x_f, x_i$ : Chuyển vị (m)
- $q_f, q_i, q_w$ : Vị trí (m)
- $u_b, u_t$ : Lực điều khiển (N)

2.1. Bộ điều khiển trượt mờ thích nghi

Mô hình không gian trạng thái của hệ thống sần bị ảnh hưởng bởi động đất được trình bày tại (1) có dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)u + d_1(t) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x) + g_2(x)u + d_2(t) \end{cases} \tag{2}$$

Với:

$$f_1(x) = \frac{-(C_1 + C_2).x_2 + C_2.x_4 - (K_1 + K_2).x_1 + K_2.x_3}{M}$$

$$g_1(x) = \frac{1}{M}$$

$$f_2(x) = \frac{C_1.x_2 - C_2.x_4 + K_1.x_1 - K_2.x_3}{(M + m_0)}$$

$$g_2(x) = \frac{1}{(M + m_0)}$$

$$d_1(x) = d_2(t) = -\ddot{q}_c$$

Định nghĩa của các mặt trượt như sau:

$$s_1 = c_1x_1 + x_2 \quad (c_1 > 0) \tag{3}$$

$$s_2 = c_2x_3 + x_4 \quad (c_2 > 0) \tag{4}$$

$$S = \lambda_1s_1 + \beta_1s_2 \quad (\lambda_1, \beta_1 > 0) \tag{5}$$

Dựa trên sự điều khiển của hệ thống biến đổi cơ cấu, tín hiệu điều khiển được chia thành hai thành phần.

$$u = u_{eq} + u_{sw} \tag{6}$$

Để đảm bảo tính ổn định của hệ thống, ta xét hàm Lyapunov cho hệ kín có dạng như sau:

$$V = \frac{1}{2}S^2 \tag{7}$$

Đạo hàm V theo thời gian t ta được:

$$\frac{dV}{dt} = S \frac{dS}{dt} \tag{8}$$

Từ (2), (3), (4), (5) được viết như sau:

$$\frac{dV}{dt} = S \frac{dS}{dt} = S[\lambda_1\dot{s}_1 + \beta_1\dot{s}_2]$$

$$\frac{dV}{dt} = S[\lambda_1(c_1x_2 + f_1 + g_1u_2 + d_1(t)) + \beta_1(c_2x_4 + f_2 + g_2u_2 + d_2(t))]$$

$$\frac{dV}{dt} = S[\lambda_1(c_1x_2 + f_1 + g_1(u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2}) + d_1(t)) + \beta_1(c_2x_4 + f_2 + g_2(u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2}) + d_2(t))]$$

$$\frac{dV}{dt} = S \left[ \lambda_1(c_1x_2 + f_1 + g_1u_{eq1} + d_1(t)) + \beta_1(c_2x_4 + f_2 + g_2u_{eq2} + d_2(t)) + u_{sw2}(\lambda_1g_1 + \beta_1g_2) + u_{sw1}(\lambda_1g_1 + \beta_1g_2) + \lambda_1g_1u_{eq2} + \beta_1g_2u_{eq1} + kS + \eta \text{sat}(S) - (kS + \eta \text{sgn}(S)) \right] \tag{9}$$

Để đảm bảo tính ổn định của mặt trượt S, nghĩa là xác định (9) âm, thu được các kết quả sau:

$$\begin{cases} u_{eq1} = \frac{-(c_1x_2 + f_1 + d_1(t))}{g_1} \\ u_{eq2} = \frac{-(c_2x_4 + f_2 + d_2(t))}{g_2} \\ u_{sw2} = -u_{sw1} - \frac{\lambda_1g_1u_{eq1} + \beta_1g_2u_{eq2}}{\lambda_1g_1 + \beta_1g_2} - \frac{k.S + \eta.\text{sgn}(S)}{\lambda_1g_1 + \beta_1g_2} \end{cases} \tag{10}$$

Từ (7) và (8) ta nhận được:

$$\frac{dV}{dt} = S \frac{dS}{dt} = -(k.S + \eta.S.\text{sgn}(S)) \leq 0 \tag{11}$$

Tín hiệu điều khiển được xác định bởi:

$$u = u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2} = \frac{\lambda_1.(f_1(X) + d_1(t)) + \beta_1.(f_2(X) + d_2(t)) + \lambda_1c_1x_2 + \beta_1c_2x_4 + kS + \eta \text{sgn}(S)}{\lambda_1g_1(X) + \beta_1g_2(X)} \tag{12}$$

Tóm lại, hàm sat được đề xuất để thay thế hàm sgn:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s), & |s| > 1 \\ s, & |s| \leq 1 \end{cases} \tag{13}$$

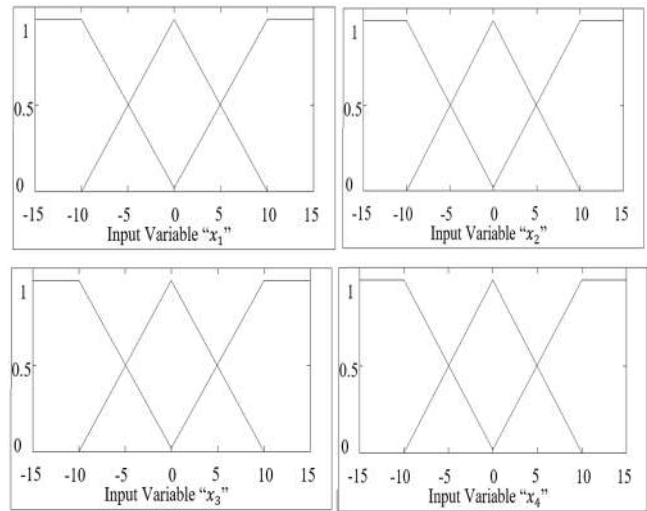
Tín hiệu điều khiển chế độ trượt của hệ thống (10) có dạng sau (theo 12, 13):

$$u = - \frac{\lambda_1.(f_1(X) + d_1(t)) + \beta_1.(f_2(X) + d_2(t)) + \lambda_1c_1x_2 + \beta_1c_2x_4 + kS + \eta \text{sat}(S)}{\lambda_1g_1(X) + \beta_1g_2(X)} \tag{14}$$

### 2.2. Luật thích nghi

Khi  $\lambda_1, \beta_1$  được coi là cố định, có nhiều rung động trong hệ thống. Để giảm độ rung, bài báo đề xuất phương pháp điều chỉnh  $\lambda_1$  và  $\beta_1$  dựa trên hệ mờ. Các hệ thống mờ được thiết kế để thay đổi mặt trượt dựa trên sự điều chỉnh của  $\lambda_1$  và  $\beta_1$ .

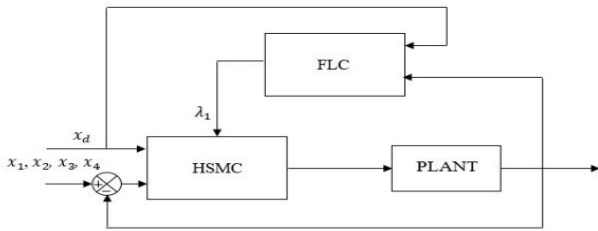
Hai bộ điều khiển mờ có cấu trúc giống nhau, với hai đầu vào và một đầu ra. FLC1 với biến đầu vào  $x_1$  và  $x_2$  biến đầu ra  $u_1$  để xử lý rung ở tầng 1. FLC2 với biến đầu vào  $x_3$  và  $x_4$  biến đầu ra  $u_2$  để xử lý rung ở tầng 2. Mỗi biến đầu vào ngôn ngữ bao gồm 3 bộ tam giác mờ với tên được số hóa tương ứng là [-1 0 1]. Các hàm liên thuộc của các biến đầu vào ngôn ngữ được thể hiện trong hình 2. Các biến đầu ra không đổi có tên được số hóa là [-2 -1 0 1 2], tương ứng với các giá trị  $[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5] = [5 \ 3 \ 0,1 \ 3 \ 5]$ . Các quy tắc suy luận được trình bày trong bảng 1.



Hình 2. Tập mờ của các biến ngôn ngữ đầu vào FLC1, FLC2

Bảng 1. Các quy tắc suy luận FLC1, FLC2

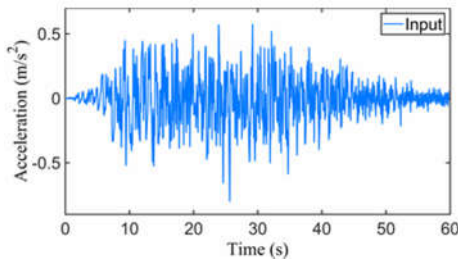
$\lambda_1$		$x_1$		
		-1	0	1
$x_2$	1	0	-1	-2
	0	1	0	-1
	-1	2	1	0
$\beta_1$		$x_3$		
		-1	0	1
$x_4$	1	0	-1	-2
	0	1	0	-1
	-1	2	1	0



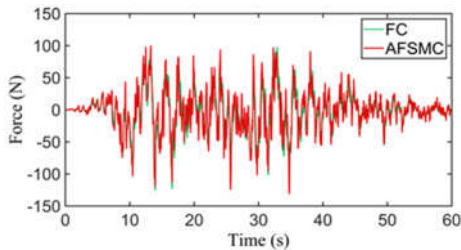
Hình 3. Cấu trúc của điều khiển chế độ trượt mờ thích nghi (FLC - Bộ điều khiển logic mờ; HSMC - Bộ điều khiển chế độ trượt)

**3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG**

Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển chế độ trượt mờ thích nghi với các thông số của mô hình như sau:  $m_0 = m_i = 30, M = m_e = 725, c_1 = 4,910^2, c_2 = 5,210^2, k_1 = 1,9 \cdot 10^3, k_2 = 2 \cdot 10^3, c_1 = 3, c_2 = 1, k = 3,5, \eta = 5$ .

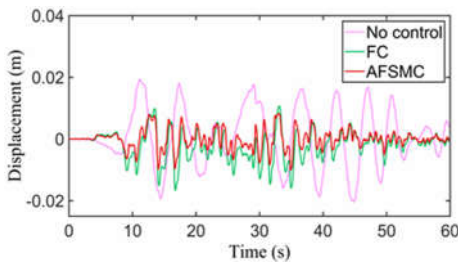


(a) Dao động do động đất gây ra

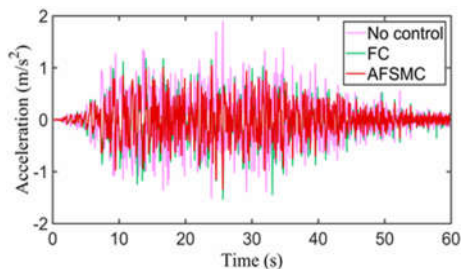


(b) Lực điều khiển

Hình 4. Dao động do trận động đất Duzce và lực điều khiển sử dụng AFSMC

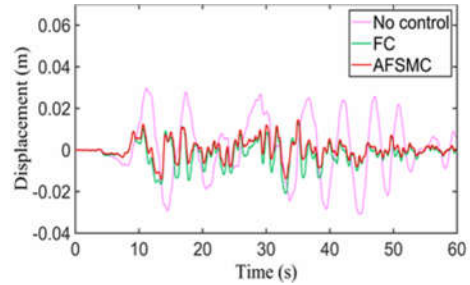


(a) Chuyển vị

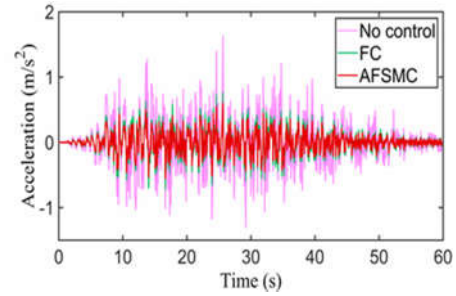


(b) Gia tốc

Hình 5. Đáp ứng của tầng dưới đối với trận động đất Duzce

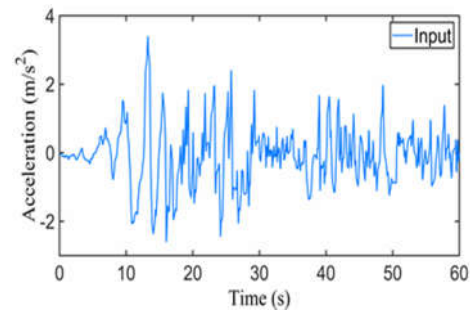


(a) Chuyển vị

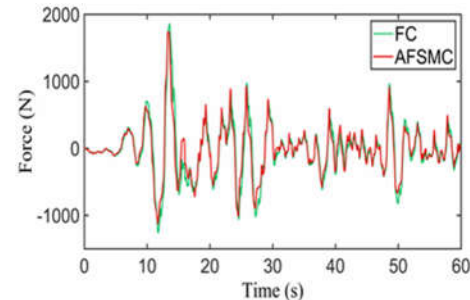


(b) Gia tốc

Hình 6. Đáp ứng của tầng trên đối với trận động đất Duzce

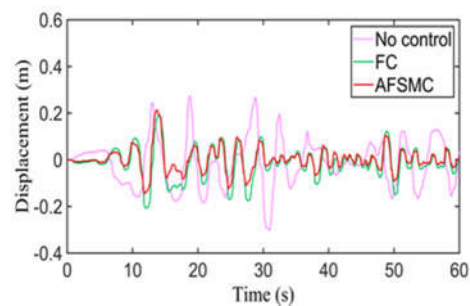


(a) Dao động do động đất gây ra

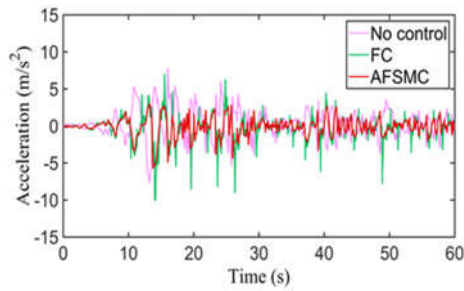


(b) Lực điều khiển

Hình 7. Dao động do trận động đất Kocaeli và lực điều khiển sử dụng AFSMC

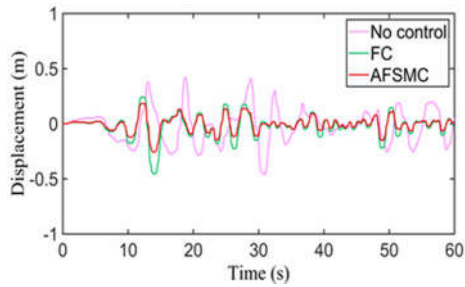


(a) Chuyển vị

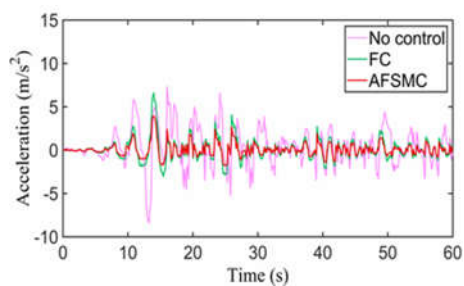


(b) Gia tốc

Hình 8. Đáp ứng của tầng dưới đối với trận động đất Kocaeli

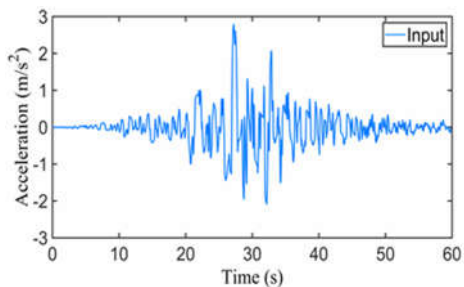


(a) Chuyển vị

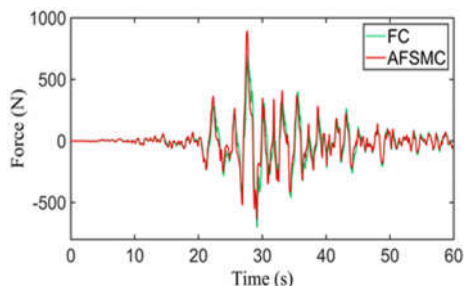


(b) Gia tốc

Hình 9. Đáp ứng của tầng trên đối với trận động đất Kocaeli

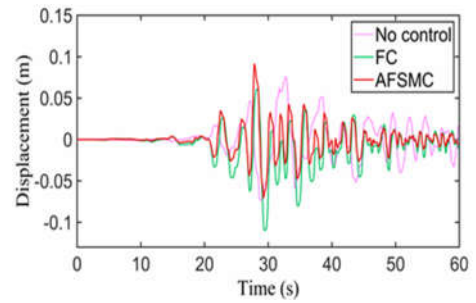


(a) Dao động do động đất gây ra

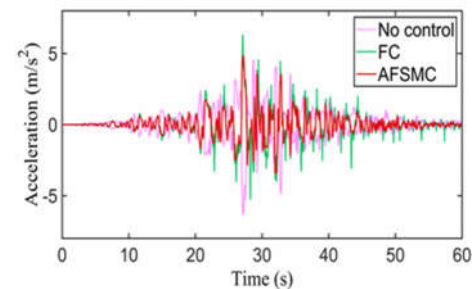


(b) Lực điều khiển

Hình 10. Dao động do trận động đất Livermore và lực điều khiển sử dụng AFSMC

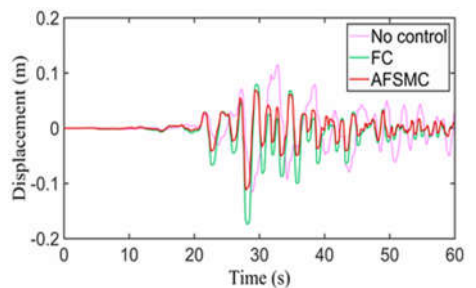


(a) Chuyển vị

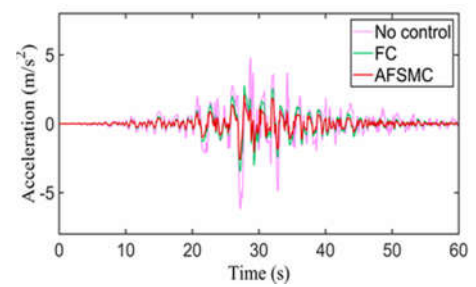


(b) Gia tốc

Hình 11. Đáp ứng của tầng dưới đối với trận động đất Livermore



(a) Chuyển vị



(b) Gia tốc

Hình 12. Đáp ứng của tầng trên đối với trận động đất Livermore

Các phản ứng tối đa của hệ thống có thể được xem trong bảng 2. Trong EL Centro, kết quả của AFSMC làm cho độ rung của tầng trên giảm 44% so với độ rung tự do của hệ thống, trong khi sử dụng FC giảm 23%. Gia tốc đáng kể trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển được đề xuất. Mức giảm trung bình của AFSMC là 53%, trong khi FC là 12%. Ở Duzce và Livermore động đất cũng cho kết quả tương tự. Có thể thấy, hiệu suất kiểm soát của SMC vượt trội hơn so với FC. Biên độ dịch chuyển đáy của tầng dưới lớn hơn. Tuy nhiên, gia tốc giảm đáng kể khi các rung động truyền từ dưới lên trên (mức giảm trung bình của các trận động đất là 46%). Điều này rất quan trọng để đảm bảo thiết



bị không bị phá hủy. Điều đó cho thấy hiệu quả của việc sử dụng hệ thống cách ly 2 giai đoạn.

Bảng 2. Các đáp ứng tối đa của bộ điều khiển ở 3 trận động đất

Trận động đất	Bộ điều khiển	Vị trí tầng 1 (m)	Gia tốc của tầng thứ nhất (m/s <sup>2</sup> )	Vị trí tầng 2 (m)	Gia tốc của tầng thứ hai (m/s <sup>2</sup> )
Duzce	Không điều khiển	0,020	1.894	0,031	1.626
	FC	0,017	1.531	0,021	0,767
	AFHSMC	0,01	1,34	0,014	0,554
Kocaeli	Không điều khiển	0,301	7.802	0,461	8.354
	FC	0,207	10	0,41	6.6
	AFHSMC	0,214	5.722	0,214	3,901
Livermore	Không điều khiển	0,076	6.314	0,115	6.176
	FC	0,12	6.287	0,174	3,442
	AFHSMC	0,091	4.839	0,111	2,6

**4. KẾT LUẬN**

Hệ thống cách ly địa chấn 2 tầng chủ động được đề xuất dựa trên bộ điều khiển AFSMC. Thiết kế 2 tầng, với bộ truyền động ở tầng 1 giúp giảm thiểu tác động lên tải trọng chuyển động đặt trên tầng 2. Nhóm tác giả đã giới thiệu sơ đồ điều khiển chế độ trượt thông thường và tạo ra tín hiệu điều khiển bằng cách sử dụng lý thuyết Lyapunov. Nhóm tác giả cũng đề xuất luật trượt mờ thích nghi để giảm độ rung. Sự ổn định và hiệu suất của hệ thống đã được chứng minh. Kết quả mô phỏng xác minh rằng bộ điều khiển chế độ trượt mờ thích nghi tốt hơn trong việc giảm độ rung của hệ thống so với bộ điều khiển chế độ trượt khi có tiếng ồn bên ngoài. Trong trường hợp không có nhiễu, cả hai bộ điều khiển đều cho kết quả như nhau.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. F. Casella, A. Locatelli, N. Schiavoni, 1996. *Nonlinear controllers for vibration suppression in a large flexible structure*. Control Engineering Practice, Volume 4, Issue 6, Pages 791-806.

[2]. QS Li, YH Zhang, JR Wu, JH Lin, 2004. *Seismic Random Vibration Analysis of Tall Buildings*. Engineering Structures, Vol. 26, No. 12, pp. 1767-1778. doi:10.1016/j.engstruct.2004.06.013.

[3]. D. Bindi, B. Petrovic, S. Karapetrou, M. Manakou, T. Boxberger, D. Raptakis, KD Pitilakis, S. Parolai, 2015. *Seismic response of an 8-story RC-building from ambient vibration analysis*. Bulletin of Earthquake Engineering 13(7), doi: 10.1007/s10518-014-9713-y.

[4]. M. Takahashi, T. Kabori, T. Nasu, N. Niwa, N. Kurata, 1998. *Active response control of buildings for large earthquakes - seismic response control system with variable structural characteristics*. Smart Materials and Structures, Volume 7, Number 4.

[5]. S. Chang, D. Kim, DH Kim, K.W. Kang, 2012. *Earthquake Response Reduction of Building Structures Using Learning-Based Lattice Pattern Active Controller*. Journal of Earthquake Engineering 16(3):317-328, doi: 10.1080/13632469.2011.626104.

[6]. N. Wang, H. Adeli, 2015. *Robust vibration control of wind-excited highrise building structures*. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 21, Issue 8, p. 967-976.

[7]. S. Pourzeynali, S. Salimi, 2015. *Robust multi-objective optimization design of active tuned mass damper system to mitigate the vibrations of a high-rise building*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science

[8]. A. Yanik, U. Aldemir, M. Bakioglu, 2014. *A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures*. Journal of Engineering Structures, Volume 62, pp. 53-64.

[9]. S. Thenozhi, W. Yu, 2014. *Stability analysis of active vibration control of building structures using PD/PID control*. Journal of Engineering Structures, Volume 81, pp 208-218.

[10]. Nguyen X.B., et al., 2018. *Modeling and semi-active fuzzy control of magnetorheological elastomer-based isolator for seismic response reduction*. Mechanical Systems and Signal Processing, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.08.040.

[11]. Azizi Mahdi, et al., 2020. *Optimization of fuzzy controller for nonlinear buildings with improved charged system search*. Structural Engineering and Mechanics 76.6.

[12]. Marji, Muchammad Harly, Sumarli, Erwin Mindarta, 2020. *Design and Investigation of Fuzzy Control For Independent Full Car Suspension Model in Random Road And Braking Excitation*. International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 7, (2020), pp. 20-3

[13]. Azizi Mahdi, et al., 2019. *Upgraded Whale Optimization Algorithm for fuzzy logic based vibration control of nonlinear steel structure*. Engineering Structures 192: 53-70.

[14]. Baygi, Seyed Mahdi Hadad, Ali Karsaz, Azar Elahi, 2018. *A hybrid optimal PID-Fuzzy control design for seismic excited structural system against earthquake: a salp swarm algorithm*. 2018 6<sup>th</sup> Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS). IEEE, 2018.

**AUTHORS INFORMATION**

**Vu Tuan Anh, Nguyen Hoai Son, Luu Vu Hai**  
 Faculty of Mechanical Engineering, Hanoi University of Industry