

## ẢNH HƯỞNG CỦA TRỌNG SỐ LUẬT MỜ ĐẾN HIỆU QUẢ ĐIỀU KHIỂN KẾT CẤU CHỊU TẢI ĐỘNG ĐẤT

Bùi Hải Lê<sup>1\*</sup>, Nguyễn Tiến Duy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Viện Cơ khí - Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội,*

<sup>2</sup>*Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên*

### TÓM TẮT

Điều khiển mờ (Fuzzy control – FC), dựa trên lý thuyết tập mờ của Zadeh, có nhiều ưu điểm như đơn giản vì không cần mô hình toán học của đối tượng trong quá trình thiết kế bộ điều khiển, tận dụng kinh nghiệm chuyên gia thông qua hệ luật điều khiển định tính,... Tuy nhiên, hệ luật mờ thường có dạng chung cho nhiều lớp đối tượng được điều khiển khác nhau nên có thể không phù hợp hoàn toàn với một đối tượng được điều khiển cụ thể. Vì vậy, trong bài báo này các tác giả khảo sát ảnh hưởng của trọng số luật mờ đến hiệu quả điều khiển dao động của kết cấu nhiều bậc tự do chịu tải trọng động đất. Từ đó, bài báo đưa ra mức độ quan trọng của các luật trong hệ luật mờ cũng như đề xuất hệ luật điều khiển phù hợp hơn đối với đối tượng khảo sát này. Các kết quả mô phỏng số cho thấy hệ luật mới làm tăng hiệu quả điều khiển và giảm thời gian tính toán của bộ điều khiển.

**Từ khóa:** *Dao động kết cấu; động đất; điều khiển mờ; điều chỉnh hệ luật; trọng số luật.*

*Ngày nhận bài: 24/10/2019; Ngày hoàn thiện: 24/4/2020; Ngày đăng: 28/4/2020*

## INFLUENCE OF WEIGHT OF FUZZY RULE ON CONTROL PERFORMANCE OF STRUCTURE SUBJECTED TO EARTHQUAKE

Bui Hai Le<sup>1\*</sup>, Nguyen Tien Duy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering - Hanoi University of Science and Technology,*

<sup>2</sup>*TNU - University of Technology*

### ABSTRACT

Fuzzy control, FC, based on the fuzzy set theory of Zadeh, has many advantages: easy because the mathematical model of the controlled object is not necessary when designing the controller, the expert's knowledge is used in terms of the qualitative control rule, ... However, the fuzzy rule bases are often used in the same form for different controlled object classes, hence, they can be not entirely appropriate for a specific controlled object. Therefore, in the present work, the influence of weight of fuzzy rules on control performance of a multi-degree of freedom structure subjected to earthquake. Then, important level of each control rule is investigated as well as a new rule base which is more appropriate for the studied model is proposed. The numerical simulation results indicate that the new rule base improves the performance and decreases the computational time of the controller.

**Keywords:** *Structural vibration; earthquake; fuzzy control; tuning rule base; weight of rule.*

*Received: 24/10/2019; Revised: 24/4/2020; Published: 28/4/2020*

\* Corresponding author. Email: le.buihai@hust.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Lý thuyết tập mờ được phát minh bởi Zadeh năm 1965 [1] đã đưa ra một công cụ toán học hữu ích để mô hình hóa các dữ liệu không chắc chắn, không rõ ràng và đã được ứng dụng nhiều trong thực tế.

Điều khiển mờ dựa trên lý thuyết tập mờ, có nhiều ưu điểm như: đơn giản vì sử dụng suy luận định tính thay cho biến đổi toán học; tận dụng được kinh nghiệm, suy luận định tính của con người khi thiết lập cơ sở luật điều khiển; tính khả thi cao ngay cả đối với hệ phức tạp, phi tuyến, chịu lực ngẫu nhiên và khó có lời giải tường minh; không phụ thuộc hoàn toàn vào các tham số của hệ nên có thể sử dụng lại khi hệ thay đổi [2].

Vì vậy, điều khiển mờ được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển quá trình nói chung và trong điều khiển dao động của các kết cấu chịu tải trọng động nói riêng [3].

Một bộ điều khiển mờ (FC) gồm 4 thành phần: các luật mờ, mờ hóa, suy luận mờ và giải mờ. Thành phần quan trọng nhất trong FC là cơ sở luật để chuyển đổi từ đầu vào sang đầu ra dựa trên lý thuyết các tập mờ.

Việc lựa chọn các luật điều khiển là bài toán cơ bản trong thiết kế các FC. Hiểu biết và kinh nghiệm của người thiết kế thường được sử dụng để thu được một tập hợp của các luật điều khiển mờ [4]. Vì vậy, các luật thu được phụ thuộc chủ yếu vào các quan điểm chủ quan của người thiết kế.

Với mỗi lớp bài toán trong các ứng dụng thực tế, các hệ luật mờ thường được sử dụng ở dạng giống nhau.

Ví dụ, các hệ luật mờ trong bài toán điều khiển dao động kết cấu có dạng giống nhau như trong các công trình nghiên cứu [5-9]. Như vậy, hệ luật mờ chung có thể không phù hợp hoàn toàn với một đối tượng cụ thể được điều khiển. Vì vậy, việc điều chỉnh cơ sở luật mờ cho mỗi mô hình cụ thể là cần thiết để tăng hiệu quả điều khiển của các FC, xem [10-15]. Trong đó, các tác giả đã dùng các

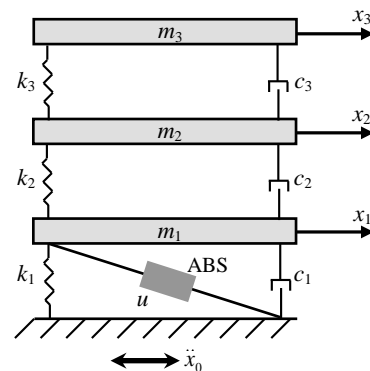
thuật toán khác nhau để sinh luật và điều chỉnh hệ luật điều khiển phù hợp với đối tượng được điều khiển.

Mô đun Fuzzy trong phần mềm Matlab cũng cung cấp tính năng điều chỉnh hệ luật mờ thông qua trọng số của các luật.

Vì những lí do trên, trong bài báo này các tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của trọng số luật mờ đến hiệu quả điều khiển với đối tượng khảo sát là một hệ nhiều bậc tự do chịu tải trọng động đất, từ đó đưa ra mức độ quan trọng của các luật trong hệ luật mờ đối với đối tượng khảo sát này cũng như là đưa ra các hệ luật mờ mới phù hợp hơn với đối tượng khảo sát so với hệ luật mờ ban đầu.

## 2. Đối tượng khảo sát

Xét mô hình kết cấu nhà 3 tầng với máy kích động ABS (Active Bracing System) gắn ở tầng 1, chịu lực kích thích động đất  $\ddot{x}_0$  như Hình 1 [16, 17].



Hình 1. Kết cấu nhà 3 tầng với ABS

Gia tốc kích động  $\ddot{x}_0$  lấy từ số liệu của các trận động đất El Centro 1940, được nhân với một tỉ lệ để gia tốc cực đại bằng 0,112g. Các thông số kết cấu bao gồm:  $m_i = 1000$  kg,  $c_i = 1.407$  kNs/m, and  $k_i = 980$  kN/m, trong đó  $i = 1 \div 3$  [16, 17]. Hệ phương trình chuyển động của kết cấu được viết dưới dạng ma trận như sau [18]:

$$[M]\ddot{[x]} + [C][\dot{x}] + [K][x] = [B]sat(u) - [\delta]\ddot{x}_0 \quad (1)$$

Trong đó,  $[x] = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ ;  $[\delta] = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$  và  $[B] = [1 \ 0 \ 0]^T$ . Ma trận khối lượng  $[M]$ ,

ma trận cản  $[C]$  và ma trận độ cứng  $[K]$  có kích thước  $n \times n$  ( $n = 3$ ) như sau:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} c_i + c_{i+1} & i = j \neq n \\ c_n & i = j = n \\ -c_i & i - j = 1 \\ -c_{i+1} & j - i = 1 \\ 0 & \text{Khác} \end{cases} \quad (3)$$

$$K_{ij} = \begin{cases} k_i + k_{i+1} & i = j \neq n \\ k_n & i = j = n \\ -k_i & i - j = 1 \\ -k_{i+1} & j - i = 1 \\ 0 & \text{Khác} \end{cases} \quad (4)$$

Lực điều khiển  $u$  với giới hạn của máy kích động  $u_{\max} = 700\text{N}$  như sau:

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} u_{\max} & \text{khi } u \geq u_{\max} \\ u & \text{khi } -u_{\max} \leq u \leq u_{\max} \\ -u_{\max} & \text{khi } u \leq -u_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Mục đích của bài toán là tìm quy luật của  $u$  để giảm đáp ứng động lực của hệ, trong đó,  $u$  được xác định từ bộ điều khiển FC, được trình bày trong mục 3.

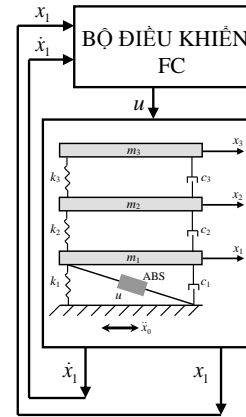
### 3. Thiết kế bộ điều khiển

Trong mục này, các bước thiết kế bộ điều khiển mờ được trình bày. Sơ đồ điều khiển của hệ, gồm hai biến trạng thái đầu vào và một biến điều khiển đầu ra, được thể hiện trên Hình 2.

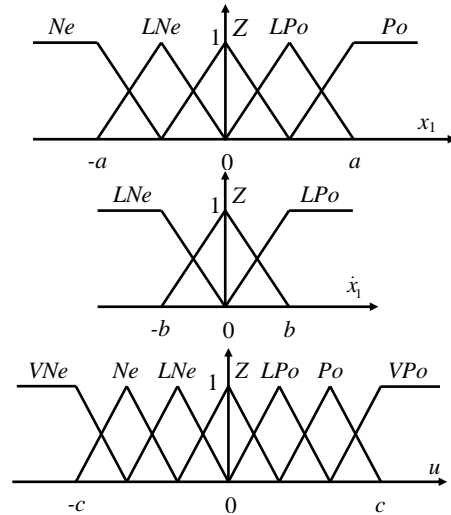
Khoảng xác định của các biến được lựa chọn theo kinh nghiệm (bằng phương pháp thử - sai) như sau:

$$\begin{aligned} x_1 &\in [-a, a] = [-4.6, 4.6] \text{ mm} \\ \dot{x}_1 &\in [-b, b] = [-50, 50] \text{ mm/s} \\ u &\in [-c, c] = [-1500, 1500] \text{ N} \end{aligned} \quad (6)$$

Sơ đồ mờ hóa các biến trạng thái và biến điều khiển được thể hiện trên Hình 3.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển của hệ



Hình 3. Sơ đồ mờ hóa các biến

Trong đó,  $Ne$ ,  $Po$ ,  $L$  và  $V$  lần lượt là ký hiệu của *Negative*, *Positive*, *Little* và *Very*.

Cơ sở luật điển hình gồm 15 luật của FC cho bài toán điều khiển dao động kết cấu được cho trên Bảng 1 [18]. Trong đó, chỉ số trong ngoặc đơn thể hiện số thứ tự của luật.

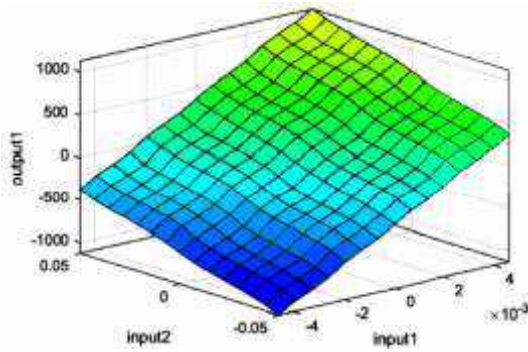
Bảng 1. Cơ sở luật của bộ điều khiển FC

$\dot{x}_1$	$x_1$	$LNe$	$Z$	$LPo$
$Ne$	$VNe$ (1)	$Ne$ (2)	$LNe$ (3)	
$LNe$	$Ne$ (4)	$LNe$ (5)	$Z$ (6)	
$Z$	$LNe$ (7)	$Z$ (8)	$LPo$ (9)	
$LPo$	$Z$ (10)	$LPo$ (11)	$Po$ (12)	
$Po$	$LPo$ (13)	$Po$ (14)	$VPo$ (15)	

Suy luận mờ dùng phương pháp Mamdani Max – Min và bước giải mờ sử dụng phương pháp trọng tâm.

Trong trường hợp trọng số của các luật đều bằng 1, mặt luật của hệ luật trên bảng 1 thể hiện trên hình 4.

Khi thay đổi giá trị các trọng số này trong khoảng từ 0 đến 1, hình dạng của mặt luật sẽ có sự thay đổi đáng kể.



Hình 4. Mặt luật khi trọng số của các luật đều bằng 1

**4. Mô phỏng số**

Trong phần này, phần mô phỏng số cho bài toán điều khiển dao động kết cấu nhà 3 tầng chịu tải động đất, như được trình bày trong mục 2, được thực hiện cho các trường hợp:

- Trọng số của các luật đều bằng 1.
  - Khảo sát ảnh hưởng của trọng số luật đến hiệu quả điều khiển dao động kết cấu trên.
- Các chỉ tiêu quan trọng trong bài toán điều khiển dao động kết cấu bao gồm:
- Chuyển vị tương đối cực đại, liên quan đến an toàn của kết cấu, thường xảy ra ở tầng 1:

$$F_1 = \max_{t,i} \left( \frac{|d_i(t)|}{d_{\max}} \right) \quad (7)$$

- Gia tốc tuyệt đối cực đại của kết cấu, liên quan đến khả năng chịu đựng của con người, thường xảy ra ở tầng đỉnh:

$$F_2 = \max_{t,i} \left( \frac{|\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_{a\max}} \right) \quad (8)$$

Trong đó,  $d_i(t)$  và  $\ddot{x}_{ai}(t)$  là chuyển vị tương đối và gia tốc tuyệt đối của tầng thứ  $i$  trong trường hợp được điều khiển;  $d_{\max}$  và  $\ddot{x}_{a\max}$  là chuyển vị tương đối và gia tốc tuyệt đối của tầng thứ  $i$  trong trường hợp không được điều khiển.

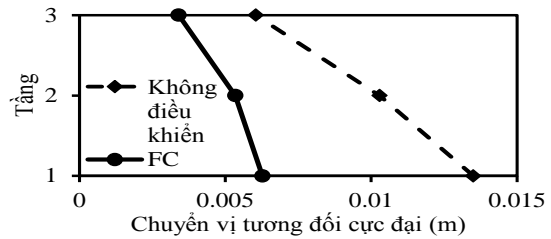
Các kết quả mô phỏng số cho trường hợp trọng số của các luật đều bằng 1 bao gồm:

- Giá trị của các chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$  được thể hiện trên bảng 2, trong đó, các kết quả thu được từ các phương pháp cũng được bao gồm để so sánh.

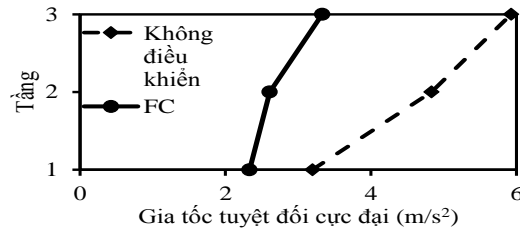
Bảng 2. Giá trị của các chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$

Phương pháp	$F_1$	$F_2$
LQR [17]	0,657	0,584
MBBC [17]	0,381	0,548
SSMC [17]	0,388	0,560
Lim và cộng sự [17]	0,396	0,543
Du và cộng sự [16]	0,41	0,53
FC	0,4645	0,5619

- Chuyển vị tương đối cực đại và gia tốc tuyệt đối cực đại của các tầng được thể hiện trên các Hình 5 và 6.

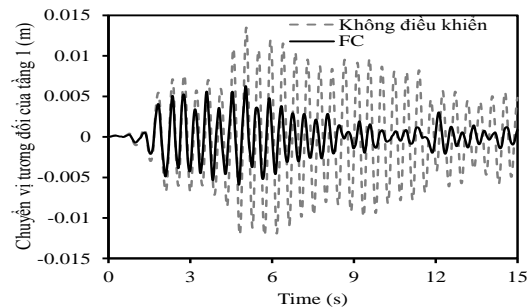


Hình 5. Chuyển vị tương đối cực đại của các tầng

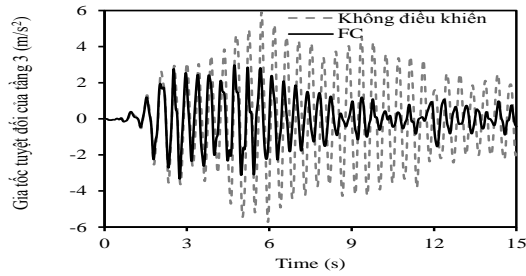


Hình 6. Gia tốc tuyệt đối cực đại của các tầng

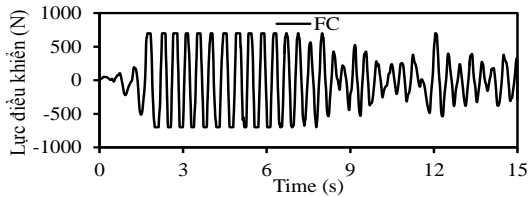
Đáp ứng theo thời gian của chuyển vị tương đối của tầng 1, gia tốc tuyệt đối tại tầng 3 và lực điều khiển được thể hiện trên các Hình 7, 8 và 9.



Hình 7. Chuyển vị tương đối của tầng 1



**Hình 8.** Gia tốc tuyệt đối của tầng 3



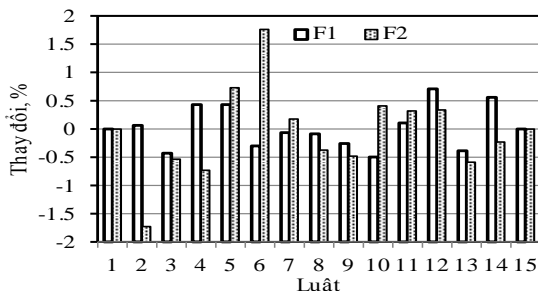
**Hình 9.** Lực điều khiển

Như vậy, có thể thấy rằng:

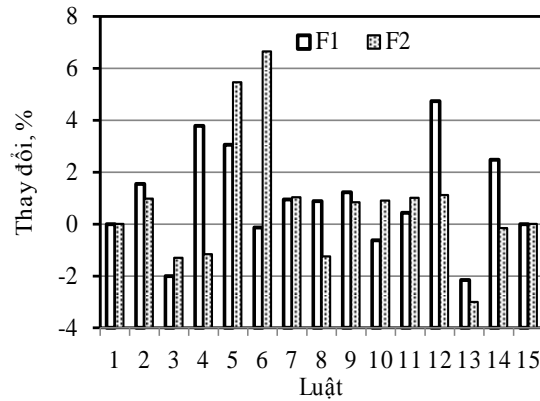
- Bộ điều khiển FC được thiết kế đã đáp ứng mục tiêu điều khiển, nghĩa là, giảm chuyển vị tương đối cực đại và gia tốc tuyệt đối cực đại của kết cấu. Điều này góp phần làm tăng độ an toàn cho kết cấu cũng như giảm những ảnh hưởng xấu đến sức khỏe con người.
- Hiệu quả điều khiển của FC tương đối tốt so với kết quả thu được từ những phương pháp khác với cả 2 chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$ .

Phần tiếp theo, các tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của trọng số luật đến hiệu quả điều khiển dao động kết cấu trên để đưa ra mức độ quan trọng của các luật cũng như để tìm ra hệ luật điều khiển phù hợp hơn đối với đối tượng cụ thể này.

Hình 10 và 11 đưa ra sự thay đổi (%) của các chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$  khi lần lượt thay đổi trọng số của các luật bằng 0,5 và 0, trong đó, khi thay đổi trọng số của một luật nào đó thì các luật còn lại có trọng số đều bằng 1.



**Hình 10.** Trọng số luật bằng 0,5



**Hình 11.** Trọng số luật bằng 0

Từ các Hình 10 và 11 có thể thấy rằng:

Việc điều chỉnh trọng số của từng luật có ảnh hưởng đến hiệu quả điều khiển (các chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$ ) ở các mức độ khác nhau.

Các luật 4, 5, 6, 12 và 14 có ảnh hưởng lớn đến hiệu quả điều khiển của FC.

Các luật 1 và 15 hoàn toàn không ảnh hưởng đến hiệu quả điều khiển. Điều này cũng phù hợp với quy luật vật lý của mô hình kết cấu dao động. Có thể giải thích về điều này như sau: đối với kết cấu dao động, không thể có trường hợp giá trị tuyệt đối của chuyển vị và vận tốc cùng đạt cực đại đồng thời nên các luật 1 và 15 không hoạt động trong quá trình điều khiển.

Đối với các luật 3 và 13, khi giảm trọng số dần về 0, hiệu quả điều khiển tốt hơn so với trường hợp trọng số của các luật này bằng 1. Như vậy, sự có mặt của các luật 3 và 13 gây ảnh hưởng xấu đến hiệu quả điều khiển.

Đối với các luật 8 và 9, khi giảm trọng số về 0,5, hiệu quả điều khiển tốt hơn so với trường hợp trọng số của các luật này bằng 1 đối với cả hai chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$ .

Đối với các luật còn lại, khi giảm trọng số, hiệu quả điều khiển cũng giảm ở một trong hai hoặc cả hai chỉ tiêu  $F_1$  và  $F_2$ .

Từ các phân tích trên, các tác giả đề xuất cơ sở luật mới như trên Bảng 3, trong đó, giá trị trong ngoặc kép là trọng số tương ứng với luật.

**Bảng 3.** Cơ sở luật mới của bộ điều khiển FC

$x_1$	$\dot{x}_1$	<i>LNe</i>	<i>Z</i>	<i>LPo</i>
<i>Ne</i>			<i>Ne</i> "1"	
<i>LNe</i>	<i>Ne</i> "1"		<i>LNe</i> "1"	<i>Z</i> "1"
<i>Z</i>	<i>LNe</i> "1"		<i>Z</i> "0.5"	<i>LPo</i> "0.5"
<i>LPo</i>	<i>Z</i> "1"		<i>LPo</i> "1"	<i>Po</i> "1"
<i>Po</i>			<i>Po</i> "1"	

Như vậy, so với hệ luật ban đầu trong Bảng 1, hệ luật mới được đề xuất trên Bảng 3 có các thay đổi sau:

- Các luật 1, 3, 13 và 15 bị loại bỏ.
- Trọng số của các luật 8 và 9 điều chỉnh thành 0,5.

Hiệu quả điều khiển và thời gian tính toán (CPU time) khi sử dụng hệ luật mới được đề xuất trên Bảng 3 được thể hiện trên bảng 4.

**Bảng 4.** Hiệu quả điều khiển và CPU time khi sử dụng hệ luật mới

Hệ luật	Bảng 1	Bảng 3	Thay đổi, %
$F_1$	0,4645	0,4446	-4,3
$F_2$	0,5619	0,5360	-4,6
CPU time, s	168	153	-8,8

Như vậy, khi sử dụng hệ luật mới được đề xuất trên bảng 3 để điều khiển dao động kết cấu nhà, đã trình bày trong mục 2, hiệu quả điều khiển tăng và CPU time giảm (do có ít luật hơn dẫn đến giảm thời gian suy luận của bộ điều khiển). Điều này cũng có nghĩa là hệ luật mới trên bảng 3 phù hợp hơn với đối tượng điều khiển cụ thể này. CPU time trên Bảng 4 được đo trên máy tính có cấu hình: core i7-2640M, RAM 8GB, hệ điều hành Windows 10.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, bài toán khảo sát ảnh hưởng của trọng số luật mờ đến hiệu quả điều khiển dao động của kết cấu nhiều bậc tự do chịu tải trọng động đất được nghiên cứu. Các kết quả chính được tóm tắt như sau:

- Bộ điều khiển FC cho hiệu quả tương đối tốt khi giảm các đáp ứng động lực của kết cấu chịu tải trọng động đất.
- Mức độ quan trọng của các luật đối với hiệu quả điều khiển đã được khảo sát và phân tích.

- Hệ luật mới được đề xuất phù hợp hơn với đối tượng điều khiển, làm tăng hiệu quả điều khiển cũng như làm giảm CPU time của bộ điều khiển.

Các tiếp cận trong bài báo có thể được mở rộng để điều chỉnh (tuning) và tối ưu hệ luật điều khiển mờ nhằm thu được hệ luật phù hợp nhất cho từng đối tượng cụ thể được điều khiển.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số "107.01-2017.306".

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [2]. H. L. Bui, C. H. Nguyen, N. L. Vu, and C. H. Nguyen, "General design method of hedge-algebras-based fuzzy controllers and an application for structural active control," *Applied Intelligence*, vol. 43, no. 2, pp. 251-275, 2015.
- [3]. R. E. Precup and H. Hellendoorn, "A survey on industrial applications of fuzzy control," *Computers in industry*, vol. 62, no. 3, pp. 213-226, 2011.
- [4]. K. Wiktorowicz, "Output feedback direct adaptive fuzzy controller based on frequency-domain methods," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 622-634, 2016.
- [5]. R. Guclu and H. Yazici, "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 318, no. 1, pp. 36-49, 2008.
- [6]. E. Allam, H. F. Elbab, M. A. Hady, and S. Abouel-Seoud, "Vibration control of active vehicle suspension system using fuzzy logic algorithm," *Fuzzy Information and Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 361-387, 2010.
- [7]. K. S. Park and S. Y. Ok, "Modal-space reference-model-tracking fuzzy control of earthquake excited structures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 334, pp. 136-150, 2015.
- [8]. A. Shehata, H. Metered, and W. A. Oraby, "Vibration control of active vehicle suspension system using fuzzy logic controller," in *Vibration Engineering and*

- Technology of Machinery*: Springer, 2015, pp. 389-399.
- [9]. D. Singh and M. Aggarwal, "Passenger seat vibration control of a semi-active quarter car system with hybrid Fuzzy-PID approach," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 5, pp. 287-296, 2017.
- [10]. F. Herrera, M. Lozano, and J. L. Verdegay, "Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 12, no. 3, pp. 299-315, 1995.
- [11]. K. Shimozima, T. Fukuda, and Y. Hasegawa, "Self-tuning fuzzy modeling with adaptive membership function, rules, and hierarchical structure based on genetic algorithm," *Fuzzy sets and systems*, vol. 71, no. 3, pp. 295-309, 1995.
- [12]. Y. Shi and M. Mizumoto, "A new approach of neuro-fuzzy learning algorithm for tuning fuzzy rules," *Fuzzy sets and systems*, vol. 112, no. 1, pp. 99-116, 2000.
- [13]. Y. Shi and M. Mizumoto, "An improvement of neuro-fuzzy learning algorithm for tuning fuzzy rules," *Fuzzy sets and systems*, vol. 118, no. 2, pp. 339-350, 2001.
- [14]. M. Jamei, M. Mahfouf, and D. A. Linkens, "Elicitation and fine-tuning of fuzzy control rules using symbiotic evolution," *Fuzzy sets and systems*, vol. 147, no. 1, pp. 57-74, 2004.
- [15]. E. Onieva, U. Hernandez-Jayo, E. Osaba, A. Perallos, and X. Zhang, "A multi-objective evolutionary algorithm for the tuning of fuzzy rule bases for uncoordinated intersections in autonomous driving," *Information Sciences*, vol. 321, pp. 14-30, 2015.
- [16]. H. Du, N. Zhang, and F. Naghdy, "Actuator saturation control of uncertain structures with input time delay," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 18, pp. 4399-4412, 2011.
- [17]. C. Lim, Y. Park, and S. Moon, "Robust saturation controller for linear time-invariant system with structured real parameter uncertainties," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 294, no. 1, pp. 1-14, 2006.
- [18]. N. D. Anh, H. L. Bui, N. L. Vu, and D. T. Tran, "Application of hedge algebra-based fuzzy controller to active control of a structure against earthquake," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, no. 4, pp. 483-495, 2013, doi: 10.1002/stc.508.