

Điều khiển dao động kết cấu sử dụng bộ điều khiển trượt dựa trên đại số gia tử

Vibration control of a structure using sliding-mode hedge-algebras-based controller

Bùi Hải Lê¹, Bùi Thanh Lâm^{2,*}, Lê Tùng Anh^{1,3}, Đào Ngọc Anh²

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Cục Đường thủy nội địa Việt Nam

*Email: thanhlam710@gmail.com

Mobile: 0902010109

Tóm tắt

Từ khóa:

Đại số gia tử; Điều khiển mờ - trượt; Điều khiển trượt; Tối ưu.

Điều khiển trượt (SMC) được biết đến như một phương pháp phổ biến trong các phương pháp điều khiển. Phương pháp điều khiển mờ - trượt (FSMC) thường được sử dụng để giảm hiện tượng “chattering”, thay đổi mạnh của tham số điều khiển, xung quanh bề mặt trượt trong chế độ điều khiển trượt. Trong lý thuyết Đại số gia tử, trật tự các mối quan hệ giữa các giá trị ngôn ngữ của mỗi biến ngôn ngữ luôn được đảm bảo và các giá trị này được xác định bằng ánh xạ ngữ nghĩa định lượng dựa trên một vài tham số mờ của mỗi biến ngôn ngữ thay vì sử dụng các tập mờ. Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt dựa trên Đại số gia tử (sHAC) được thiết kế và áp dụng trong điều khiển dao động của kết cấu chịu động đất để cho thấy ưu điểm của phương pháp đề xuất.

Abstract

Keywords:

Fuzzy sliding-mode control; Hedge-algebras; Optimization; Sliding-mode control.

Sliding-mode control (SMC) is known as a popular approach of robust control methods. Fuzzy sliding-mode control (FSMC) method has been commonly used to prevent chattering phenomenon, drastical change of control factor, around sliding surface in sliding-mode control. In Hedge-algebras theory, inherent order relationships among linguistic values of each linguistic variable are always guaranteed and these values are determined by isomorphism mapping called semantically quantifying one based on a few fuzziness parameters of each linguistic variable instead of using fuzzy sets. In this paper, sliding-mode hedge-algebras-based controller (sHAC) is designed and applied in active control of a structure subjected to earthquake in order to show advantages of the proposed method.

Ngày nhận bài: 05/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 07/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Các dao động có hại làm giảm độ bền và độ an toàn của kết cấu, giảm độ chính xác và độ tin cậy của các thiết bị. Chính vì vậy, bài toán giảm các dao động có hại của các kết cấu, các thiết

bị, ... luôn có tính thời sự. Một chỉ tiêu quan trọng khi thiết kế các kết cấu công trình là giảm các đáp ứng động do tác động từ môi trường (tải trọng động đất, tải trọng gió, tải trọng sóng, ...) và đây cũng là hướng nghiên cứu đang được quan tâm hiện nay.

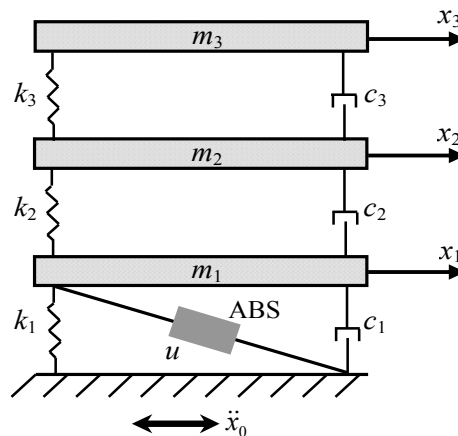
Lý thuyết Mờ được Zadeh phát triển vào năm 1965 đã giới thiệu một công cụ toán học hữu dụng để mô hình hóa các dữ liệu định tính, không chắc chắn và đã được dùng trong nhiều ứng dụng thực tế nói chung và trong điều khiển dao động kết cấu nói riêng. Mặc dù một bộ điều khiển mờ truyền thống (Classical Fuzzy Controller, FC) linh hoạt và đơn giản khi thiết kế nhưng thứ tự ngữ nghĩa của các giá trị ngôn ngữ không được đảm bảo chặt chẽ và các bước mờ hóa, hợp thành và giải mờ của bộ điều khiển khá phức tạp và rắc rối về mặt thao tác [1].

Lý thuyết Đại số gia tử (HA) được giới thiệu từ năm 1990 [2-9] đã phát triển được những kết quả quan trọng: các giá trị ngôn ngữ có thể được thiết lập được dưới dạng một cấu trúc đại số và đó là một cấu trúc đại số gia tử đầy đủ với một thuộc tính chính là thứ tự ngữ nghĩa của các giá trị ngôn ngữ luôn được đảm bảo. Cấu trúc này có thể mô tả đầy đủ quá trình suy luận định tính của con người. Ứng dụng của HAC trong điều khiển nói chung và điều khiển dao động kết cấu nói riêng [1, 10-15] đã thu được những kết quả tích cực.

Do các đặc trưng về tính thích nghi và bền vững, các bộ điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) đã được sử dụng rộng rãi trong điều khiển nói chung và điều khiển dao động kết cấu nói riêng. Tuy nhiên, hiện tượng "chattering", với quá nhiều thay đổi dạng xung của biến điều khiển, thường xảy ra đối với các bộ điều khiển SMC truyền thống, và như vậy, lực điều khiển theo thời gian khó có thể thực hiện trong thực tế. Bộ điều khiển mờ - trượt dựa trên sự kết hợp của điều khiển mờ và điều khiển trượt sẽ có được những ưu điểm kết hợp của các bộ điều khiển này và có thể làm giảm một cách hiệu quả hiện tượng "chattering" [16].

Trong báo cáo này, bộ điều khiển trượt dựa trên đại số gia tử trong điều khiển dao động kết cấu được trình bày.

2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU



Hình 1. Mô hình kết cấu

Xét mô hình kết cấu 3 tầng với thiết bị ABS (Active Bracing System - hệ thanh giằng chủ động) gắn ở tầng 1, chịu lực kích thích động đất \ddot{x}_0 như Hình 1 [17, 19]. 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: $m_1 = m_2 = m_3 = 1000$ kg, $c_1 = c_2 = c_3 = 1.407$ kNs/m, và $k_1 = k_2 = k_3 = 980$ kN/m [17, 19]. Các phương trình chuyển động của hệ như sau [1]:

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

ở đây $\{x\} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$; $\{\delta\} = [m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ và $\{B\} = [1 \ 0 \ 0]^T$. Ma trận khối lượng $[M]$, ma trận cản $[C]$ và ma trận độ cứng $[K]$ được mô tả như [1]. Lực điều khiển u được xác định như sau:

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} u_{\max} & \text{if } u \geq u_{\max} \\ u & \text{if } -u_{\max} \leq u \leq u_{\max} \\ -u_{\max} & \text{if } u \leq -u_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

Phương trình (1) có thể viết dưới dạng không gian trạng thái như sau:

$$\{\dot{z}\} = [A]\{z\} + \{A_1\}u + \{A_2\}\ddot{x}_0 \quad (3)$$

$$\text{ở đây } \{z\}_{2n \times 1} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3]^T \quad (4)$$

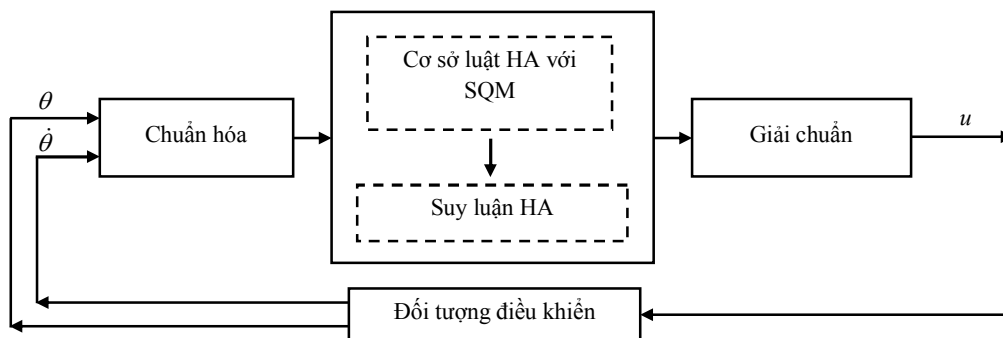
$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad \{A_1\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{B\} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad \{A_2\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{\delta\} \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (5)$$

3. BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰA TRÊN ĐẠI SỐ GIA TỬ

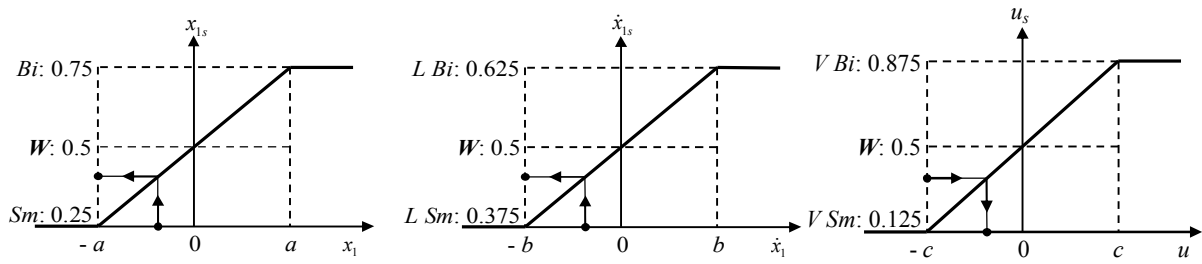
Các định nghĩa, định lý và các công thức cơ bản của lý thuyết Đại số gia tử được trình bày trong [2-9] cho phép xác định tất cả ánh xạ ngữ nghĩa định lượng (Semantically Quantifying Mapping - SQM) có thể có của các giá trị ngôn ngữ của biến ngôn ngữ X (Bảng 1). Tiếp theo, bộ điều khiển HAC tỉ lệ - vi phân, gồm 2 biến trạng thái (x_1 và \dot{x}_1) và 1 biến điều khiển (u), được trình bày với sơ đồ điều khiển như trên Hình 2 [15]. Các giá trị ngôn ngữ với các SQM của các biến được lựa chọn như trong [15]. Sơ đồ chuẩn hóa của các biến trạng thái, chuyển đổi từ miền xác định sang miền SQM, trong đó x_{1s} và \dot{x}_{1s} lần lượt là các giá trị SQM của x_1 và \dot{x}_1 . Sau đó, giá trị SQM thu được phải được chuyển đổi sang giá trị thực của biến điều khiển u , gọi là bước giải chuẩn (Hình 3).

Bảng 1. Một số các giá trị ngôn ngữ

Các giá trị ngôn ngữ SQM	$V Sm$	Sm	$L Sm$	W	$L Bi$	Bi	$V Bi$
$\text{fm}(c^-) = \mu(h^-) = 0,5$	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875



Hình 2. Sơ đồ điều khiển của HAC



Hình 3. Chuẩn hóa các biến trạng thái và giải chuẩn biến điều khiển

Có thể thấy qua Hình 3 rằng các bước hoạt động của bộ điều khiển HAC đơn giản và rõ ràng dựa trên các nội suy tuyến tính.

4. BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DỰA TRÊN ĐẠI SỐ GIA TỬ

Bộ điều khiển trượt dựa trên Đại số gia tử (sHAC) được thiết kế để điều khiển chủ động dao động của kết cấu trên. Nó bao gồm 2 bước: Đầu tiên, bộ điều khiển trượt trong [16, 18] được sử dụng; Thứ hai, sự kết hợp của HAC và bộ điều khiển trượt được đề xuất để thiết lập sHAC.

4.1. Bộ điều khiển trượt

Lực điều khiển phi tuyến trong SMC có thể được biểu diễn bằng [16, 18]:

$$u(t) = u_{eq}(t) - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (6)$$

ở đây u_{eq} là phần tuyến tính của lực điều khiển, được gọi là lực điều khiển tương đương, η là tham số thiết kế không đổi và sgn là hàm signum. Bề mặt trượt được định nghĩa là:

$$\sigma = \{S\} \{z(t)\} \quad (7)$$

trong đó, ma trận hệ số bề mặt trượt $\{S\}_{1 \times 2n}$ là ma trận thiết kế, thường là hằng số và bề mặt trượt được chọn để thỏa mãn các điều kiện:

$$\sigma = 0; \dot{\sigma} = 0 \quad (8)$$

Lực điều khiển tương đương có thể thu được từ phương pháp Utkin – Drazenovic [16, 18]:

$$u_{eq}(t) = -\left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \left[\{S\}[A]\{z(t)\} + \{S\}\{A_2\}\ddot{x}_0\right] \quad (9)$$

Gia tốc nền trong phương trình (9) bị bỏ qua và thay vào đó, một tham số thích hợp η được chọn để bù cho sự không chắc chắn của kích thích bên ngoài. Sự lựa chọn của η phải đảm bảo sự tồn tại và khả năng tiếp cận của chế độ trượt. Điều kiện $\sigma \times \dot{\sigma} < 0$ phải được thỏa mãn [16, 18]:

$$\sigma \left[-\eta \operatorname{sgn}(\sigma) + \left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \{S\}\{A_2\}\ddot{x}_0 \right] < 0 \quad (10)$$

$$\eta \geq \left| \left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \{S\}\{A_2\}\ddot{x}_0^* \right| \quad (11)$$

ở đây, \ddot{x}_0^* là giá trị tuyệt đối cực đại của gia tốc nền \ddot{x}_0 . Do đó, lực điều khiển khả dĩ là:

$$u(t) = -\left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \{S\}[A]\{z(t)\} - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (12)$$

Do giới hạn của bộ truyền động, lực điều khiển $u(t)$ phải thỏa mãn điều kiện bão hòa trong phương trình (2). Có thể thấy được hiện tượng “chattering”, do có quá nhiều chuyển mạch trong giới hạn điều khiển, có thể dễ dàng xảy ra trong SMC do hàm signum $\text{sgn}(\sigma)$ trong phương trình (12). Đây là điểm bất lợi của SMC.

4.2. Bộ điều khiển trượt dựa trên Đại số gia tử

Thay vì sử dụng phương trình (12), trong bộ điều khiển trượt dựa trên Đại số gia tử (sHAC), lực điều khiển được xem như sau:

$$u(t) = -\left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \{S\}[A]\{z(t)\} - \eta u_{\text{HAC}} \quad (13)$$

và điều kiện trong phương trình (10) trở thành:

$$\sigma \left[-\eta u_{\text{HAC}} + \left(\{S\}\{A_1\}\right)^{-1} \{S\}\{A_2\} \ddot{x}_0 \right] < 0 \quad (14)$$

ở đây, u_{HAC} được xác định từ HAC trong tiêu mục 4.1 khi thay thế lần lượt x_1 , \dot{x}_1 và u bởi σ , $\dot{\sigma}$ và u_{HAC} . Có thể nhấn mạnh rằng sHAC dựa trên cơ sở luật HA với các SQM thể hiện trong Bảng 1 đáp ứng các điều kiện $\sigma \times \dot{\sigma} < 0$ và thay thế hàm signum $\text{sgn}(\sigma)$ bằng u_{HAC} làm giảm hiện tượng “chattering” của biến điều khiển trong sHAC.

5. MÔ PHỎNG SỐ

Hai chỉ tiêu quan trọng của kết cấu được định nghĩa như sau:

* Chuyển vị tương đối F_1 , liên quan đến an toàn kết cấu, xảy ra ở tầng 1:

$$F_1 = \max_{t,i} \left(\frac{|d_i(t)|}{d_{\text{max}}} \right) \quad (15)$$

* Gia tốc tuyệt đối F_2 , liên quan đến khả năng chịu đựng của con người, xảy ra ở tầng đỉnh:

$$F_2 = \max_{t,i} \left(\frac{|\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_{a\text{max}}} \right) \quad (16)$$

ở đây, $d_i(t)$ và d_{max} là chuyển vị của tầng thứ i và chuyển vị cực đại trong các trường hợp điều khiển và không điều khiển, $\ddot{x}_{ai}(t)$ và $\ddot{x}_{a\text{max}}$ gia tốc tuyệt đối của tầng thứ i và gia tốc tuyệt đối cực đại trong các trường hợp điều khiển và không điều khiển.

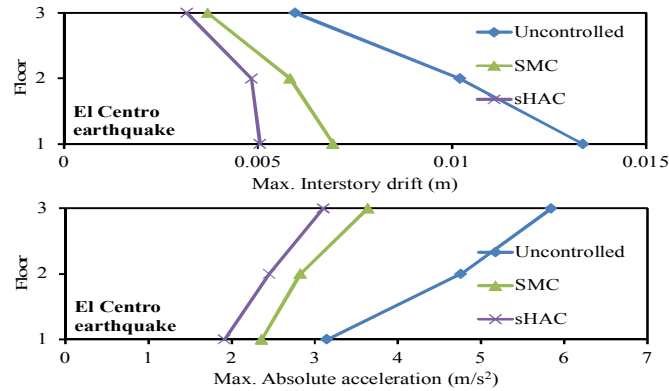
Các giá trị cực đại được chuẩn hóa của các phản ứng của kết cấu được sắp xếp trong Bảng 2, trong đó các kết quả thu được từ các phương pháp khác cũng được đưa vào để so sánh. Có thể thấy rằng bộ điều khiển được đề xuất cung cấp kết quả tốt đối với cả 2 chỉ tiêu F_1 và F_2 . Tiêu chí F_1 có tỷ lệ giảm cao hơn đối với bộ điều khiển sHAC so với các bộ điều khiển còn lại. Hiệu quả điều khiển của sHAC cao hơn so với SMC cho cả hai tiêu chí F_1 và F_2 .

Chuyển vị cực đại và gia tốc tuyệt đối cực đại của các tầng được thể hiện trong Hình 4; có thể thấy rằng bộ điều khiển sHAC cho hiệu quả giảm chuyển vị tương đối giữa các tầng cao hơn so với SMC. Đáp ứng thời gian của chuyển vị của tầng 1, gia tốc tuyệt đối của tầng đỉnh, chuyển vị của tầng đỉnh và lực điều khiển được thể hiện trong Hình 5. Như vậy, các kết quả trong Hình 5

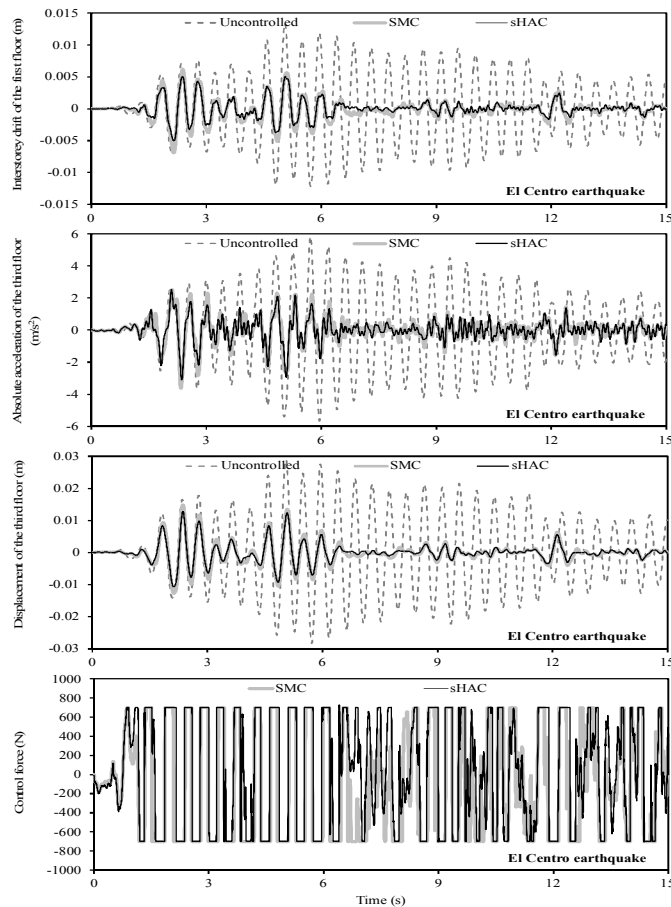
minh họa rõ hơn về hiệu quả điều khiển cũng như khả năng giảm hiện tượng “chattering” của sHAC so với SMC, nghĩa là lực điều khiển của sHAC “mềm” hơn so với SMC.

Bảng 2. So sánh 2 chỉ tiêu F_1 và F_2 của các bộ điều khiển

Bộ điều khiển	LQR	MBBC	SSMC	Lim et al.	Du et al.	SMC	sHAC
F_1	0,657	0,381	0,388	0,396	0,41	0,519	0,378
F_2	0,584	0,548	0,560	0,543	0,53	0,623	0,531



Hình 4. Chuyển vị cực đại và gia tốc tuyệt đối cực đại của các tầng



Hình 5. Chuyển vị của tầng 1, gia tốc tuyệt đối của tầng đỉnh, chuyển vị của tầng đỉnh và lực điều khiển

6. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt dựa trên Đại số gia tử (sHAC) điều khiển dao động của một kết cấu chịu tải trọng động đất được đề xuất. Các kết quả thu được cho thấy bộ điều khiển đề xuất có hiệu quả điều khiển cao hơn và khả năng giảm hiện tượng “chattering” tốt hơn so với bộ điều khiển SMC. Như vậy, sHAC là một cách tiếp cận hiệu quả trong điều khiển dao động của các kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Anh, N. D., H.-L. Bui, N.-L. Vu, D.-T. Tran. Application of hedge algebra-based fuzzy controller to active control of a structure against earthquake. *Structural Control and Health Monitoring*, **20**, (4), (2013), pp. 483-495.
- [2]. Ho, N. C., W. Wechler. Hedge algebras: an algebraic approach to structure of sets of linguistic truth values. *Fuzzy sets and systems*, **35**, (3), (1990), pp. 281-293.
- [3]. Ho, N. C., W. Wechler. Extended hedge algebras and their application to fuzzy logic. *Fuzzy sets and systems*, **52**, (3), (1992), pp. 259-281.
- [4]. D. K. Tran, H. Van Nam, H. C. Nguyen. Hedge algebras, linguistic-value logic and their application to fuzzy reasoning. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **7**, (4), (1999), pp. 347-361.
- [5]. Ho, N. C.. A topological completion of refined hedge algebras and a model of fuzziness of linguistic terms and hedges. *Fuzzy Sets and Systems*, **158**, (4), (2007), pp. 436-451.
- [6]. Ho, N. C., N. Van Long. Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras. *Fuzzy Sets and Systems*, **158**, (4), (2007), pp. 452-471.
- [7]. Nguyen, C. H., W. Pedrycz, T. L. Duong, T. S. Tran. A genetic design of linguistic terms for fuzzy rule based classifiers. *International Journal of Approximate Reasoning*, **54**, (1), (2013), pp. 1-21.
- [8]. Nguyen, C. H., T. S. Tran, D. P. Pham. Modeling of a semantics core of linguistic terms based on an extension of hedge algebra semantics and its application. *Knowledge-Based Systems*, **67**, (2014), pp. 244-262.
- [9]. Nguyen, C.-H., W. Pedrycz. A construction of sound semantic linguistic scales using 4-tuple representation of term semantics. *International Journal of Approximate Reasoning*, **55**, (3), (2014), pp. 763-786.
- [10]. Ho, N. C., V. N. Lan. Optimal hedge-algebras-based controller: Design and application. *Fuzzy Sets and Systems*, **159**, (8), (2008), pp. 968-989.
- [11]. Bui, H.-L., D.-T. Tran, N.-L. Vu. Optimal fuzzy control of an inverted pendulum. *Journal of vibration and control*, **18**, (14), (2012), pp. 2097-2110.
- [12]. Duc, N. D., N.-L. Vu, D.-T. Tran, H.-L. Bui. A study on the application of hedge algebras to active fuzzy control of a seism-excited structure. *Journal of Vibration and Control*, **18**, (14), (2012), pp. 2186-2200.
- [13]. Vukadinović, D., M. Bašić, C. H. Nguyen, N. L. Vu, T. D. Nguyen. Hedge-algebra-based voltage controller for a self-excited induction generator. *Control Engineering Practice*, **30**, (2014), pp. 78-90.

[14]. Bui, H.-L., C.-H. Nguyen, V.-B. Bui, K.-N. Le, H.-Q. Tran. Vibration control of uncertain structures with actuator saturation using hedge-algebras-based fuzzy controller. *Journal of Vibration and Control*, **23**, (12), (2015), pp. 1984-2002.

[15]. Bui, H.-L., C.-H. Nguyen, N.-L. Vu, C.-H. Nguyen. General design method of hedge-algebras-based fuzzy controllers and an application for structural active control. *Applied Intelligence*, **43**, (2), (2015), pp. 251-275.

[16]. Alli, H., O. Yakut. Fuzzy sliding-mode control of structures. *Engineering Structures*, **27**, (2), (2005), pp. 277-284.

[17]. Du, H., N. Zhang, F. Naghdy. Actuator saturation control of uncertain structures with input time delay. *Journal of Sound and Vibration*, **330**, (18), (2011), pp. 4399-4412.

[18]. R. Adhikari, H. Yamaguchi. Sliding mode control of buildings with ATMD. *Earthquake engineering & structural dynamics*, **26**, (1997), pp. 409-422.

[19]. C. Lim, Y. Park, S. Moon. Robust saturation controller for linear time-invariant system with structured real parameter uncertainties. *Journal of Sound and Vibration*, **294**, (2006), pp. 1-14.