



SELECTION STUDY OF STATE VARIABLES IN ACTIVE CONTROL OF SUSPENSION SYSTEMS USING HEDGE ALGEBRAS THEORY

Hai Le Bui^{1*}, Dang Khoa Do¹, Anh Tuan Le²

¹Hanoi University of Science and Technology, No 1 Dai Co Viet Street, Hanoi, Vietnam

²Song Hong Technology & Science Joint Stock Company, No 28/39/7 Dai Dong Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 25/07/2021

Revised: 30/08/2021

Accepted: 14/09/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.8>

* *Corresponding author*

Email: le.buihai@hust.edu.vn; Tel: +84 913574956

Abstract. Research on vibration control of vehicle active and semi-active suspension systems is increasingly interested. In the present work, the investigation of the state variables selection to find the control variable in the hedge-algebras-based controller is carried out for a quarter car active suspension model. State variables that can be used include vertical displacement, velocity, and acceleration of the vehicle body and wheel. By investigating the influence of state variables on the efficiency of the hedge-algebras-based controller consisting of two input state variables and one output control variable, it is possible to determine the appropriate state variables for the control targets. The numerical simulation results show that the controller is most effective when using the vehicle's body speed and acceleration as state variables. The present approach can be extended to different controlled objects to find suitable state variables, especially for controllers using qualitative rule systems such as controllers based on the fuzzy-set or hedge-algebras theories.

Keywords: vehicle suspension systems, vibration control, state variables selection, hedge-algebras theory.



KHẢO SÁT SỰ LỰA CHỌN BIẾN TRẠNG THÁI TRONG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TREO CHỦ ĐỘNG SỬ DỤNG LÝ THUYẾT ĐẠI SỐ GIA TỬ

Bùi Hải Lê^{1*}, Đỗ Đăng Khoa¹, Lê Anh Tuấn²

¹Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

²Công ty Cổ phần Khoa học và Công nghệ Sông Hồng, Số 28/39/7 Đại Đồng, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 25/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 30/08/2021

Ngày chấp nhận đăng: 14/09/2021

Ngày xuất bản Online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.8>

* Tác giả liên hệ

Email: le.buihai@hust.edu.vn; Tel: +84 913574956

Tóm tắt. Nghiên cứu về điều khiển dao động của các hệ thống treo chủ động và bán chủ động trên xe ô tô ngày càng được quan tâm. Trong bài báo này, việc khảo sát về sự lựa chọn các biến trạng thái để tìm biến điều khiển trong bộ điều khiển dựa trên lý thuyết đại số gia tử được thực hiện cho một hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô. Các biến trạng thái có thể được sử dụng bao gồm chuyển vị, vận tốc và gia tốc theo phương thẳng đứng của thân xe và bánh xe. Bằng việc khảo sát ảnh hưởng của các biến trạng thái đến hiệu quả của bộ điều khiển dựa trên đại số gia tử gồm 2 biến trạng thái đầu vào và 1 biến điều khiển đầu ra cho phép xác định được các biến trạng thái phù hợp với các mục tiêu điều khiển. Kết quả mô phỏng số cho thấy bộ điều khiển đạt hiệu quả cao nhất khi sử dụng vận tốc và gia tốc của thân xe làm biến trạng thái. Cách tiếp cận của bài báo có thể được mở rộng cho những đối tượng được điều khiển khác nhau để tìm ra các biến trạng thái phù hợp, nhất là đối với những bộ điều khiển sử dụng hệ luật định tính như các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ hay đại số gia tử.

Từ khóa: hệ thống treo của xe ô tô, điều khiển dao động, lựa chọn biến trạng thái, đại số gia tử.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với yêu cầu ngày càng cao đối với vận hành của ô tô, hệ thống treo trên xe có vai trò quan trọng trong điều khiển xe, tạo sự thoải mái cho hành khách và cách ly xe khỏi tiếng ồn, va chạm, rung lắc trên đường,...

Trên quan điểm của chế độ điều khiển, hệ thống treo của xe có thể được phân thành ba loại: bị động, bán chủ động và chủ động. Trong các loại trên, hệ thống treo chủ động có tiềm năng lớn nhất để cải thiện sự thoải mái khi lái xe và khả năng vận hành của phương tiện, và lĩnh vực nghiên cứu này vẫn nhận được sự quan tâm trong nhiều năm qua. Trong hệ thống treo chủ động, các cơ cấu sinh lực được đặt giữa thân xe và trục bánh xe song song với các bộ phận của phân tử treo, vừa có thể bổ sung và tiêu hao năng lượng từ hệ thống, giúp hệ thống treo kiểm soát được ứng xử của xe, tăng sự thoải mái khi lái xe và khả năng bám đường của xe. Mặc dù điều khiển chủ động có nhiều ưu điểm, nhưng cũng có một số hạn chế gồm: (1) thuật toán điều khiển phức tạp; (2) rủi ro tiềm ẩn về độ tin cậy; và (3) tiêu thụ thêm năng lượng [1].

Nhiều các thuật toán điều khiển hiện đại và thông minh đã được áp dụng cho bài toán này [2-9]. Trong phương pháp điều khiển thông minh, điều khiển mờ chiếm số lượng đáng kể với những ưu điểm như đơn giản, hiệu quả và sử dụng ít biến trạng thái [10-12].

Với cách tiếp cận khác với cách tiếp cận trong lý thuyết tập mờ, lý thuyết đại số gia tử (Hedge-algebras, HA) cho phép biểu diễn các biến ngôn ngữ bằng các độ đo mờ định lượng của chúng (các số thực trong khoảng từ 0 đến 1) dựa trên thứ tự ngữ nghĩa tự nhiên của các giá trị ngôn ngữ mà không cần sử dụng các hàm liên thuộc mờ [13, 14]. Do đó, lý thuyết HA đã phát triển và đạt được kết quả khả quan trong một số lĩnh vực, liên quan đến các vấn đề cơ sở dữ liệu, lập trình logic, phân lớp và hồi quy, dự báo với chuỗi thời gian mờ và tóm tắt ngôn ngữ.

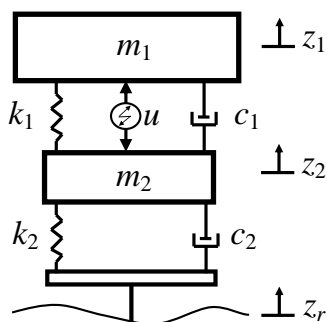
Trong lĩnh vực điều khiển dao động kết cấu hay điều khiển cân bằng của các hệ hạt dẫn động, bộ điều khiển dựa trên đại số gia tử cho thấy nhiều lợi thế so với bộ điều khiển dựa trên tập mờ, chẳng hạn như đơn giản hơn trong thiết kế và tối ưu hóa, hiệu quả điều khiển cao hơn và thời gian tính toán nhanh hơn nhiều [15-23].

Tuy nhiên, trong các nghiên cứu kể trên, các khảo sát lựa chọn được các biến trạng thái phù hợp cho bộ điều khiển dựa trên HA chưa được thực hiện. Vì vậy, trong nghiên cứu này, hiệu quả của các bộ điều khiển dựa trên HA, gồm 2 biến trạng thái đầu vào và 1 biến điều khiển đầu ra, được đánh giá thông qua các cặp biến trạng thái khác nhau để tìm ra cặp biến trạng thái phù hợp nhất với đối tượng được điều khiển – hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô.

2. HỆ THỐNG TREO CHỦ ĐỘNG

Xét hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô như Hình 1. Trong đó, m_1 và m_2 là khối lượng của thân xe và bánh xe; k_1, k_2, c_1, c_2 lần lượt là độ cứng và hệ số cản của hệ thống treo và lốp xe; z_1, z_2, z_r lần lượt chuyển vị của thân xe, của lốp và biên dạng mặt đường. Lực điều khiển u được sinh ra từ máy kích động đặt vào giữa các khối lượng m_1 và m_2 . Hệ phương trình trạng thái của hệ được viết dưới dạng ma trận như sau [1]:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ c_2 \dot{z}_r + k_2 z_r \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u \\ -u \end{Bmatrix} \quad (1)$$



Hình 1. Hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô.

Các vấn đề cần giải quyết đối với hệ thống treo kể trên bao gồm [24]: (1) Giá trị tuyệt đối cực đại của gia tốc thân xe $\max|\ddot{z}_1|$, đại lượng này cần giảm thiểu để đảm bảo sự thoải mái cho hành khách; (2) Biến dạng của bộ phận treo $\max|z_1 - z_2|$ và biến dạng của lốp xe $\max|z_2 - z_r|$, các đại lượng này cũng cần giảm thiểu để đảm bảo an toàn của hệ thống; (3) Giới hạn vật lý của máy kích động $\max|u| \leq u_{\max}$, trong đó u_{\max} lực điều khiển cho phép của máy kích động; (4) Thời gian dao động của hệ thống cần được giảm thiểu.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Xét một cấu trúc đại số gia tử của biến ngôn ngữ X như sau:

$$AX = (X, G, C, H, \leq) \quad (2)$$

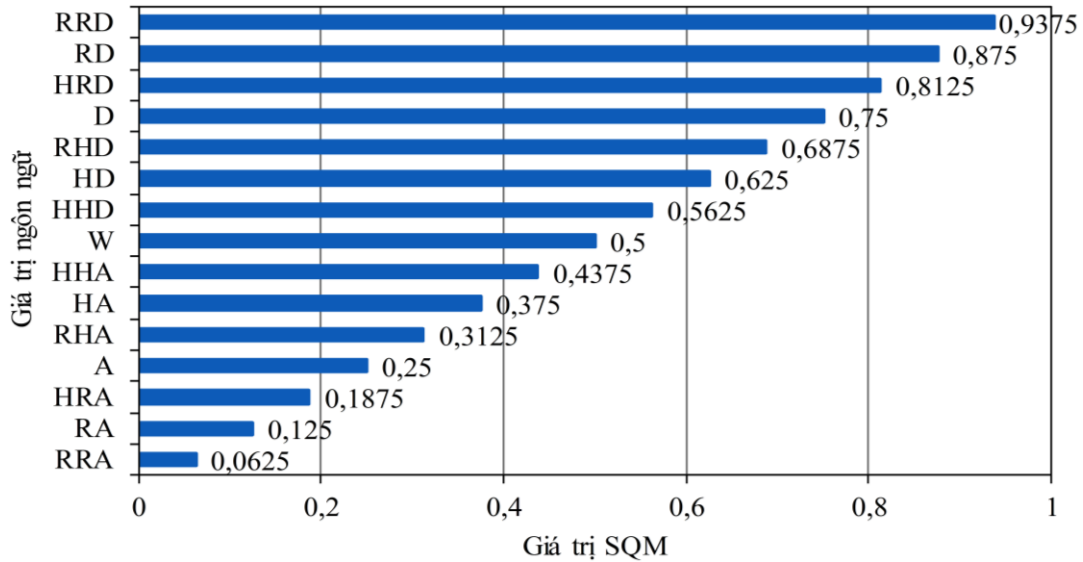
trong đó G , C , và H lần lượt là các nhãn ngôn ngữ gốc, các hằng số và các gia tử. Dấu “ \leq ” thể hiện quan hệ thứ tự của X .

Thông thường, lý thuyết HA cho phép xác định tất cả các giá trị ngôn ngữ của biến ngôn ngữ X bằng cách kết hợp 2 nhãn ngôn ngữ gốc Âm và Dương (ký hiệu là A và D); 3 hằng số 0 (tuyệt đối Âm), W (trung hòa) và 1 (tuyệt đối Dương); và 2 gia tử Hoi và Rất (ký hiệu là H và R) như sau:

$$\begin{aligned} G &= \{c^-, c^+\} = \{A, D\} \\ C &= \{0, W, 1\} \\ H &= \{h^-, h^+\} = \{H, R\} \end{aligned} \quad (3)$$

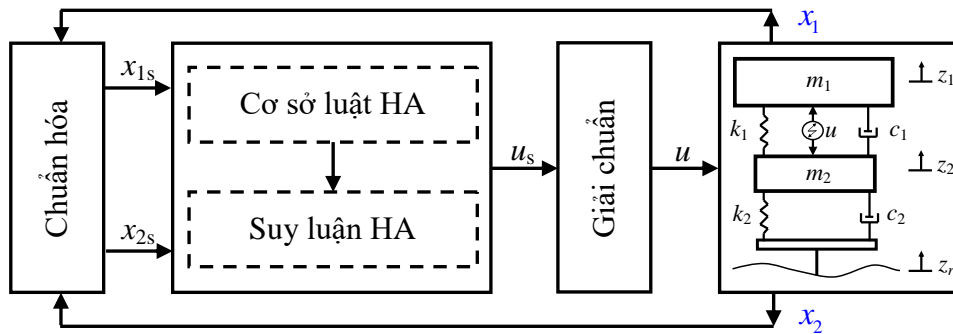
Trong lý thuyết HA, các giá trị ngôn ngữ được biểu diễn bởi các giá trị độ đo tính mờ của chúng trong khoảng $[0,1]$, và vì vậy, các thao tác đối với các giá trị ngôn ngữ được thực hiện trên các số thực thay vì sử dụng các tập mờ như trong lý thuyết tập mờ. Các công thức để xác định một giá trị độ đo tính mờ, còn gọi là giá trị ánh xạ ngữ nghĩa định lượng (semantically quantifying mapping, SQM), đã được tóm tắt trong [18]. Một số giá trị SQM φ của các giá trị ngôn ngữ điển hình được thể hiện trên Hình 2 với trường hợp $fm(c^-) = \mu(h^-) = 0,5$ (mô hình hóa đối xứng). Trong đó, $fm(c^-)$ và $\mu(h^-)$ lần lượt là độ đo tính mờ của c^- và h^- .

Từ Hình 2, có thể thấy mối quan hệ giữa các giá trị ngôn ngữ và giá trị SQM của chúng là đồng biến, nghĩa là lý thuyết HA đảm bảo thứ tự ngữ nghĩa tự nhiên của các giá trị ngôn ngữ của một biến ngôn ngữ.



Hình 2. Giá trị SQM của một số giá trị ngôn ngữ điển hình.

Bộ điều khiển dựa trên HA gồm 2 biến trạng thái đầu vào, x_1 và x_2 , và 1 biến điều khiển đầu ra u . Trong đó, x_1 và x_2 được tổ hợp từ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của thân xe và bánh xe. Sơ đồ nguyên lý của bộ điều khiển được thể hiện trên Hình 3, trong đó x_{1s} , x_{2s} , và u_s lần lượt là giá trị SQM của z_1 , z_2 , và u . Các giá trị ngôn ngữ với giá trị SQM và khoảng xác định của các biến trạng thái và biến điều khiển được lựa chọn và thể hiện trên Bảng 1.

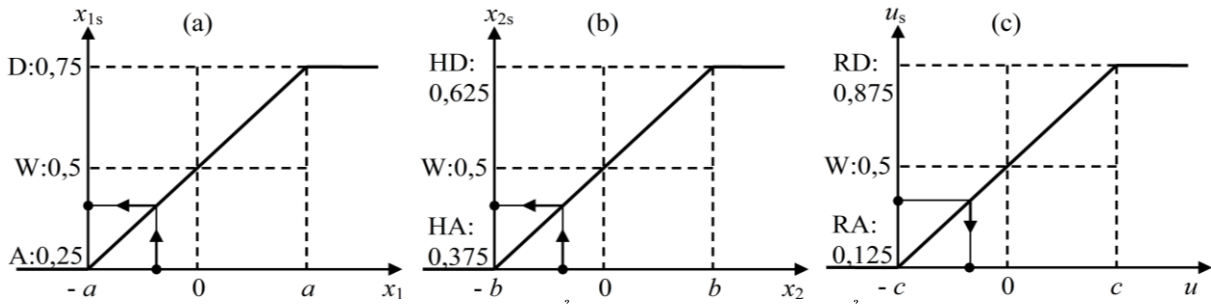


Hình 3. Sơ đồ nguyên lý của bộ điều khiển.

Bảng 1. Tham số của các biến.

Biến	Khoảng xác định	Các giá trị ngôn ngữ với giá trị SQM
x_1	$[-a, a]$	A: 0,25 ; HA: 0,375 ; W: 0,5 ; HD: 0,625 ; D: 0,75
x_2	$[-b, b]$	HA: 0,375 ; W: 0,5 ; HD: 0,625
u	$[-c, c]$	RA: 0,125; A: 0,25; HA: 0,375; W: 0,5; HD: 0,625; D: 0,75; RD: 0,875

Các bước Chuẩn hóa và Giải chuẩn để chuyển đổi giữa các giá trị thực và giá trị SQM của các biến, vì vậy các bước này tương đương với các bước Mờ hóa và Giải mờ của một bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ. Các bước Chuẩn hóa và Giải chuẩn được thể hiện trên Hình 4 sử dụng các phép nội suy tuyến tính.

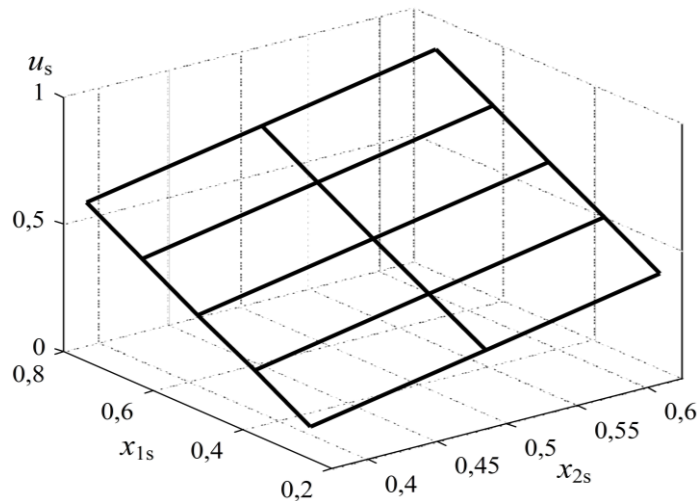


Hình 4. Các bước Chuẩn hóa (a, b) và Giải chuẩn (c).

Bảng 2 thể hiện cơ sở luật của bộ điều khiển dựa trên HA, gồm 15 luật, với các giá trị SQM của các giá trị ngôn ngữ. Các số liệu trên Bảng 2 cho phép vẽ mặt cơ sở luật $u_s(x_{1s}, x_{2s})$, như được thể hiện trên Hình 5. Như vậy, việc xác định u_s từ những cặp giá trị (x_{1s}, x_{2s}) , được coi là bước suy luận của bộ điều khiển dựa trên HA, có thể được thực hiện dựa trên phép nội suy tuyến tính trên mặt cơ sở luật $u_s(x_{1s}, x_{2s})$.

Bảng 2. Cơ sở luật của bộ điều khiển

x_{2s}	HA: 0,375	W: 0,5	HD: 0,625
x_{1s}			
A: 0,25	RA: 0,125	A: 0,25	HA: 0,375
HA: 0,375	A: 0,25	HA: 0,375	W: 0,5
W: 0,5	HA: 0,375	W: 0,5	HD: 0,625
HD: 0,625	W: 0,5	HD: 0,625	D: 0,75
D: 0,75	HD: 0,625	D: 0,75	RD: 0,875



Hình 5. Mặt cơ sở luật của bộ điều khiển.

Như vậy, có thể thấy rằng bộ điều khiển dựa trên lý thuyết HA có các đặc điểm sau:

- Sơ đồ nguyên lý của bộ điều khiển giống với các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ. Tuy nhiên, các lập luận và phép toán thao tác trên các giá trị ngôn ngữ của các bộ điều khiển dựa trên HA chặt chẽ hơn về mặt thứ tự ngữ nghĩa; các bước Chuẩn hóa, Suy luận, và Giải chuẩn của bộ điều khiển dựa trên HA đơn giản và trực quan hơn so với các bước Mờ

hóa, Suy luận, và Giải mờ của các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ. Điều này cho phép giảm thời gian tính toán của các bộ điều khiển dựa trên HA so với các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ.

- Số lượng biến thiết kế liên quan đến bộ điều khiển khi muốn tối ưu bộ điều khiển dựa trên HA (gồm 2 biến $fm(c^-)$ và $\mu(h^-)$) ít hơn nhiều so với khi tối ưu các bộ điều khiển dựa trên lý thuyết tập mờ (thường dùng tọa độ của các hàm thuộc làm biến thiết kế).

- Mỗi bộ điều khiển dựa trên HA chỉ sử dụng 2 biến trạng thái đầu vào, x_1 và x_2 . Đây là lợi thế của bộ điều khiển dựa trên HA so với các bộ điều khiển phải sử dụng nhiều hơn biến trạng thái đầu vào, bao gồm cả biên dạng mặt đường và các tổ hợp biến trạng thái khác nhau [5, 11, 25-29].

- Có thể dễ dàng thiết lập hệ luật điều khiển như trên Bảng 2 nếu các biến trạng thái là chuyển vị và vận tốc của thân xe hoặc chuyển vị và vận tốc tương đối của thân xe so với bánh xe. Bởi vì hệ luật điều khiển dạng này đã trở thành phổ biến trong các bài toán điều khiển dao động kết cấu [15-23]. Tuy nhiên, khi các biến trạng thái liên quan đến gia tốc của thân xe và bánh xe thì khó có thể thiết lập được hệ luật điều khiển này vì đại lượng gia tốc khó có thể quan sát và rút ra kinh nghiệm để thiết lập hệ luật điều khiển. Vì vậy, việc khảo sát các cặp biến trạng thái khác nhau là cần thiết để tìm kiếm cặp biến trạng thái phù hợp nhất với đối tượng được điều khiển.

4. MÔ PHÒNG SỐ

Các tham số của hệ được cho như sau [1]: $m_1 = 320$ kg; $m_2 = 40$ kg; $k_1 = 18000$ N/m; $k_2 = 200000$ N/m; $c_1 = 1000$ Ns/m; $c_2 = 10$ Ns/m; $u_{\max} = 2500$ N; biên dạng cho phép của bộ phận treo $z_{12\max} = 0,1$ m; biên dạng cho phép của lớp xe $z_{2r\max} = 0,01764$ m; và thời gian mô phỏng = 5 s. Kích động từ biên dạng mặt đường dạng xung đơn điều hòa, với chiều dài $L = 5$ m, chiều cao $A = 0,08$ m và vận tốc xe là $V = 12,5$ m/s (45km/h), như sau:

$$x_r = \frac{1}{2} A \left(1 - \cos \left(2\pi t \frac{V}{L} \right) \right) \text{ khi } 0 \leq t \leq \frac{L}{V}; = 0 \text{ khi } t > \frac{L}{V} \quad (4)$$

Bộ điều khiển dựa trên HA được khảo sát với những trường hợp khác nhau của các biến trạng thái được thể trên Bảng 3.

Bảng 3. Các bộ điều khiển dựa trên HA.

Biến trạng thái	Ký hiệu	Biến trạng thái	Ký hiệu
$x_1 = z_1 - z_2; x_2 = \dot{z}_1 - \dot{z}_2$	H_DV12	$x_1 = z_1; x_2 = \ddot{z}_1$	H_DA1
$x_1 = z_1; x_2 = \dot{z}_1$	H_DV1	$x_1 = \dot{z}_1 - \dot{z}_2; x_2 = \ddot{z}_1 - \ddot{z}_2$	H_VA12
$x_1 = z_1 - z_2; x_2 = \ddot{z}_1 - \ddot{z}_2$	H_DA12	$x_1 = \dot{z}_1; x_2 = \ddot{z}_1$	H_VA1

Ngoài ra, trường hợp không điều khiển (open loop, ký hiệu là OL) và bộ điều khiển bền vững trong [1] (ký hiệu là Hinf) cũng được bao gồm để so sánh. Trong đó, lực điều khiển của Hinf được xác định như sau [1]:

$$u = 10^4 [1,0098 \quad 4,9655 \quad -0,1896 \quad 0,0909] \times [z_1 - z_2 \quad z_2 - z_r \quad \dot{z}_1 \quad \dot{z}_2]^T \quad (5)$$

Khoảng xác định của các biến trạng thái và biến điều khiển trong các bộ điều khiển dựa trên HA (a, b, c) được lựa chọn dựa trên giá trị tuyệt đối cực đại của các biến trạng thái ở trạng thái không điều khiển (OL) và để giá trị tuyệt đối cực đại của lực điều khiển giữa các bộ điều khiển dựa trên HA và bộ điều khiển bền vững (Hinf) trong [1] là bằng nhau, khoảng 918N (xem Hình 6).

Đáp ứng theo thời gian của gia tốc thân xe (\ddot{z}_1 , m/s²), biến dạng tương đối của bộ phận treo ($(z_1 - z_2) / z_{12max}$, relative suspension deflection - RSD), biến dạng tương đối của lốp xe ($(z_2 - z_r) / z_{2rmax}$, relative tyre deflection - RTD) và lực điều khiển (u , N) được thể hiện trên Hình 6. Trong đó, ký hiệu oH_VA1 được giải thích sau.

Sự thay đổi (%) so với trường hợp không điều khiển (OL) đối với các giá trị tuyệt đối cực đại của gia tốc thân xe (\ddot{z}_1), biến dạng của bộ phận treo ($z_1 - z_2$, suspension deflection - SD), biến dạng của lốp xe ($z_2 - z_r$, tyre deflection - TD) và lực điều khiển (u) được thể hiện trên Hình 7.

Từ các kết quả trên các Hình 6 và 7, có thể thấy rằng các bộ điều khiển đều có khả năng đưa hệ về vị trí cân bằng theo phương thẳng đứng với cùng giá trị tuyệt đối cực đại của lực điều khiển, tuy nhiên, hiệu quả điều khiển của chúng có sự khác biệt đáng kể, cụ thể như sau:

- Đối với bộ điều khiển Hinf [1], sử dụng 4 biến trạng thái là chuyển vị tương đối giữa thân xe và bánh xe, giữa bánh xe và biên dạng đường, vận tốc của thân xe và của bánh xe theo phương thẳng đứng ($z_1 - z_2; z_2 - z_r; \dot{z}_1; \dot{z}_2$), tỉ lệ giảm của gia tốc thân xe (\ddot{z}_1), biến dạng của bộ phận treo (SD) và biến dạng của lốp (TD) so với trường hợp không điều khiển lần lượt là khoảng 32%, 27% và 16%. Thời gian dập tắt dao động của hệ là ngắn, khoảng 2s.

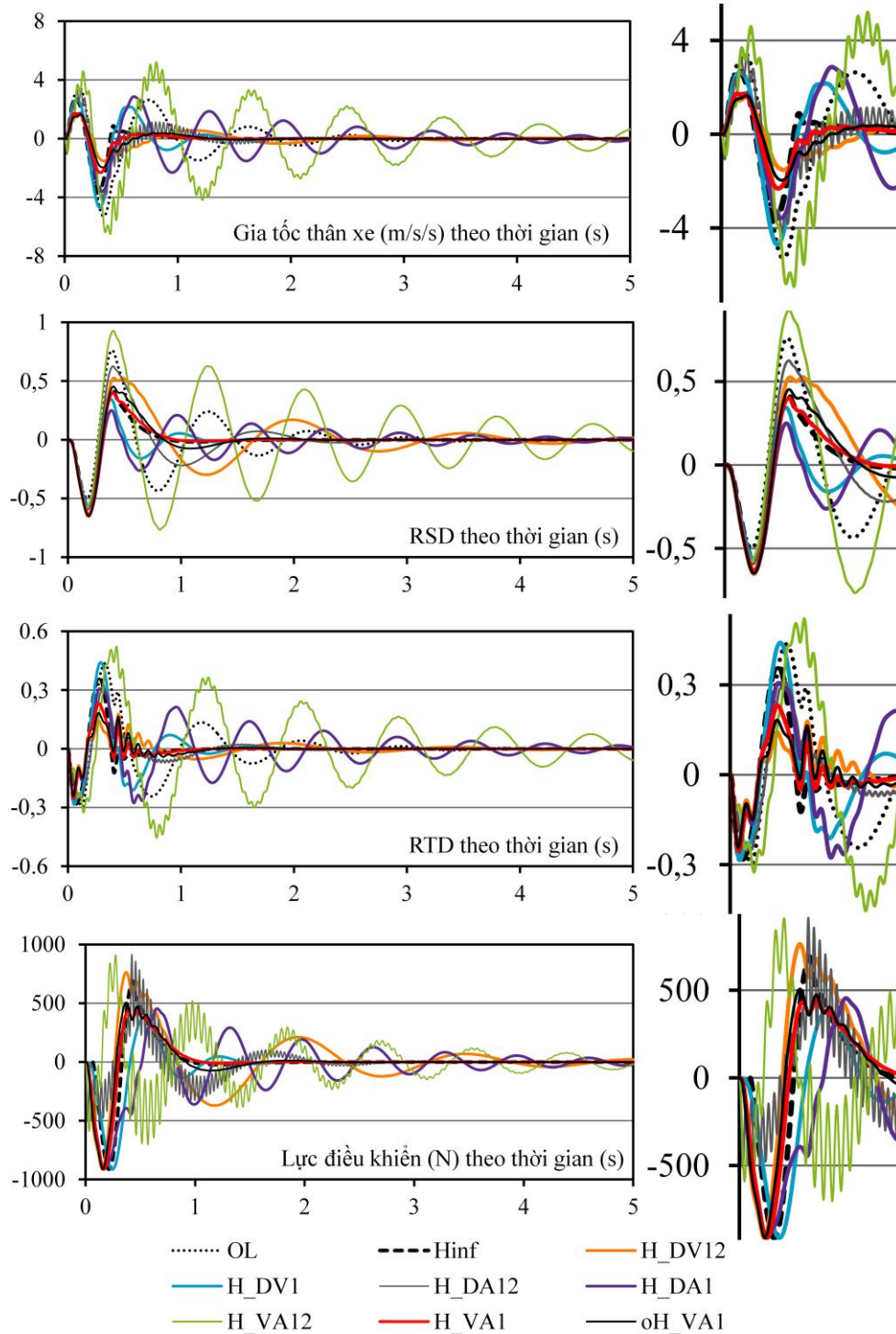
- Đối với bộ điều khiển H_DV12, sử dụng 2 biến trạng thái là chuyển vị và vận tốc tương đối giữa thân xe và bánh xe ($x_1 = z_1 - z_2; x_2 = \dot{z}_1 - \dot{z}_2$), tỉ lệ giảm của \ddot{z}_1 , SD và TD lần lượt là khoảng 69%, 14% và 44%. Như vậy, H_DV12 cho hiệu quả điều khiển vượt trội so với Hinf đối với các chỉ tiêu \ddot{z}_1 và TD. Tuy nhiên, thời gian dập tắt dao động của hệ bị kéo dài, lớn hơn 5s.

- Hiệu quả điều khiển của H_DV1, sử dụng 2 biến trạng thái $x_1 = z_1; x_2 = \dot{z}_1$, là kém khi chỉ tiêu \ddot{z}_1 và SD chỉ giảm khoảng 11% và 27%, trong khi TD tăng khoảng 1%. Thời gian dập tắt dao động khá tốt, khoảng 2s.

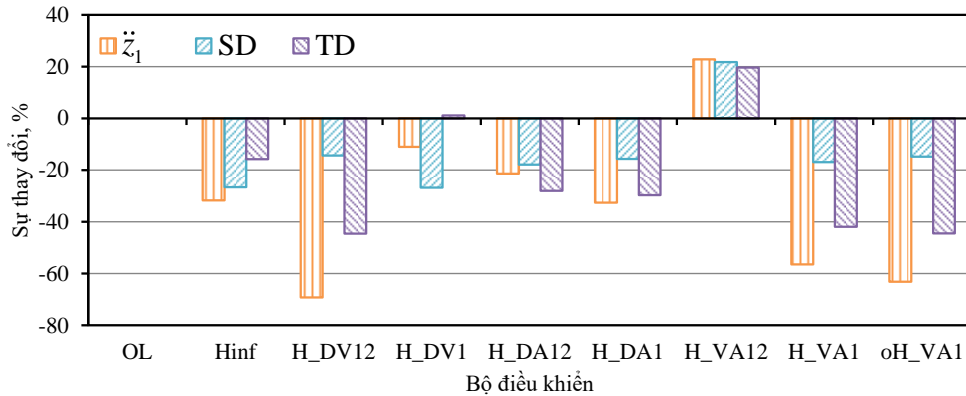
- Đối với bộ điều khiển H_DA12, sử dụng 2 biến trạng thái $x_1 = z_1 - z_2; x_2 = \ddot{z}_1 - \ddot{z}_2$, tỉ lệ giảm của \ddot{z}_1 , SD và TD lần lượt là khoảng 21%, 18% và 28%. Tuy nhiên, đáp ứng theo thời gian của \ddot{z}_1 , TD và u xảy ra hiện tượng chattering, không đảm bảo độ tin cậy và ổn định khi điều khiển. Tương tự đối với bộ điều khiển H_VA12, sử dụng 2 biến trạng thái $x_1 = \dot{z}_1 - \dot{z}_2; x_2 = \ddot{z}_1 - \ddot{z}_2$, hiện tượng chattering cũng xảy ra đối với \ddot{z}_1 , TD và u . Ngoài ra, bộ điều khiển này có hiệu quả kém nhất trong số các bộ điều khiển được khảo sát.

- Đối với bộ điều khiển H_DA1, sử dụng 2 biến trạng thái $x_1 = z_1; x_2 = \ddot{z}_1$, tỉ lệ giảm của \ddot{z}_1 , SD và TD lần lượt là khoảng 32%, 16% và 30%. Như vậy, có thể coi H_DA1 cho hiệu quả điều khiển tương đương với Hinf. Tuy nhiên, thời gian dập tắt dao động của H_DA1 lên đến hơn 5s.

- Đối với bộ điều khiển H_VA1, sử dụng 2 biến trạng thái là vận tốc và gia tốc của thân xe và bánh xe ($x_1 = \dot{z}_1; x_2 = \ddot{z}_1$), tỉ lệ giảm của \ddot{z}_1 , SD và TD lần lượt là khoảng 56%, 20% và 42%. Như vậy, có thể thấy H_VA1 cho hiệu quả điều khiển vượt trội so với Hinf và gần bằng H_DV12. Thời gian dập tắt dao động của hệ là ngắn, khoảng 2s, tương đương với Hinf và nhanh nhiều so với H_DV12. Từ các phân tích trên có thể kết luận rằng bộ điều khiển H_VA1 cho hiệu quả điều khiển tốt nhất đối với hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô đang được khảo sát.



Hình 6. Đáp ứng theo thời gian của hệ.



Hình 7. Sự thay đổi (%) của các đại lượng.

Có thể thấy rằng các khoảng xác định (a, b, c) của các biến trạng thái và biến điều khiển ảnh hưởng đến hiệu quả của các bộ điều khiển dựa trên HA (xem Hình 4). Vì vậy, trong phần tiếp theo bộ điều khiển H_VA1 được tối ưu dựa trên sự thay đổi của các khoảng xác định này. Bài toán tối ưu được phát biểu như sau:

- Hàm mục tiêu:

$$\max |\ddot{z}_1| \rightarrow \min \quad (6)$$

- Biến thiết kế:

$$a \in [a_1, a_2]; b \in [b_1, b_2]; c \in [c_1, c_2] \quad (7)$$

Trong đó, cận dưới (a_1, b_1, c_1) = $0,1 \times (a, b, c)$ của H_VA1 và cận trên (a_2, b_2, c_2) = $10 \times (a, b, c)$ của H_VA1.

- Ràng buộc:

$$\max |z_1 - z_2| \leq 1.1 \times SD^*; \max |z_2 - z_r| \leq 1.1 \times TD^*; u \leq 918 \quad (8)$$

Trong đó, SD^* và TD^* lần lượt là giá trị tuyệt đối cực đại của biến dạng của bộ phận treo và biến dạng của lớp xe trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển H_VA1.

Như đã phân tích ở mục 2, các chỉ tiêu quan trọng đối với mô hình hệ thống treo của xe ô tô là giảm các đại lượng gồm gia tốc thân xe \ddot{z}_1 , biến dạng của bộ phận treo (SD) và biến dạng của lớp xe (TD). Vì vậy, hàm mục tiêu khi tối ưu H_VA1 được chọn như phương trình (6). Các chỉ tiêu biến dạng của bộ phận treo và lớp xe được đưa vào ràng buộc (8) vì so với trường hợp không điều khiển, các chỉ tiêu này của H_VA1 đã giảm được nhiều, lần lượt khoảng 56% và 20%.

Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển tối ưu, được ký hiệu là oH_VA1, cũng được thể hiện trên các Hình 6 và 7. Có thể thấy rằng, với cùng lực điều khiển cực đại, hiệu quả của oH_VA1 cao hơn so với H_VA1 đối với các chỉ tiêu \ddot{z}_1 và TD. Thời gian dập tắt dao động của hệ khi sử dụng oH_VA1 cũng chỉ khoảng 2s.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, việc khảo sát về sự lựa chọn các biến trạng thái để tìm biến điều khiển phù hợp cho bộ điều khiển dựa trên lý thuyết đại số gia tử được tiến hành đối với một

đối tượng được điều khiển là hệ thống treo chủ động của mô hình một phần tư xe ô tô. Các kết quả khảo sát trong bài báo cho thấy, cặp biến trạng thái vận tốc và gia tốc của thân xe là phù hợp nhất đối mô hình khảo sát thông qua việc giảm các đáp ứng động lực cũng như giảm thời gian dao động của hệ khi sử dụng bộ điều khiển dựa trên HA với 2 biến trạng thái này để tính toán lực điều khiển. Như vậy, các mô hình khác khi được điều khiển bằng các bộ điều khiển dựa trên hệ luật định tính cũng cần được khảo sát để lựa chọn được các biến trạng thái phù hợp nhất đối với mô hình và mục tiêu điều khiển. Hướng nghiên cứu của bài báo có thể mở rộng đối với các hệ thống treo của mô hình xe ô tô một nửa hoặc đầy đủ và có thể kể đến dao động của ghế ngồi cũng như của hành khách.

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

- [1]. W. Sun, H. Gao, P. Shi, *Advanced Control for Vehicle Active Suspension Systems*, Springer, Switzerland, 2020.
- [2]. J. Theunissen, A. Tota, P. Gruber, M. Dhaens, A. Sorniotti, Preview-based techniques for vehicle suspension control: a state-of-the-art review, *Annual Reviews in Control*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.010>
- [3]. H.E. Tseng, D. Hrovat, State of the art survey: active and semi-active suspension control, *Vehicle system dynamics*, 53 (2015) 1034-1062. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1037313>
- [4]. J.J. Rath, M. Defoort, H.R. Karimi, K.C. Veluvolu, Output feedback active suspension control with higher order terminal sliding mode, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (2016) 1392-1403. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611587>
- [5]. G. Wang, C. Chen, S. Yu, Robust non-fragile finite-frequency H_∞ static output-feedback control for active suspension systems, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91 (2017) 41-56. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.039>
- [6]. S.-A. Chen, J.-C. Wang, M. Yao, Y.-B. Kim, Improved optimal sliding mode control for a non-linear vehicle active suspension system, *Journal of Sound and Vibration*, 395 (2017) 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.017>
- [7]. F. Zhao, S.S. Ge, F. Tu, Y. Qin, M. Dong, Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation, *IET control theory & applications*, 10 (2016) 1696-1705. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2015.1317>
- [8]. Y.-J. Liu, Q. Zeng, L. Liu, S. Tong, An adaptive neural network controller for active suspension systems with hydraulic actuator, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2875187>
- [9]. Y.-J. Liu, Q. Zeng, S. Tong, C.P. Chen, L. Liu, Adaptive neural network control for active suspension systems with time-varying vertical displacement and speed constraints, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66 (2019) 9458-9466. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2893847>
- [10]. S.D. Nguyen, Q.H. Nguyen, Design of active suspension controller for train cars based on sliding mode control, uncertainty observer and neuro-fuzzy system, *Journal of Vibration and Control*, 23 (2017) 1334-1353. <https://doi.org/10.1177/1077546315592767>
- [11]. H. Li, Z. Zhang, H. Yan, X. Xie, Adaptive event-triggered fuzzy control for uncertain active suspension systems, *IEEE transactions on cybernetics*, 49 (2018) 4388-4397. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2864776>

- [12]. F. Cao, H. Sun, Y. Li, S. Tong, Fuzzy Adaptive Fault-Tolerant Control for a Class of Active Suspension Systems with Time Delay, *International Journal of Fuzzy Systems*, 21 (2019) 2054-2065. <https://doi.org/10.1007/s40815-019-00719-6>
- [13]. N. Ho, H. Nam, Towards an algebraic foundation for a zadeh fuzzy logic, *Fuzzy Set and System*, 129 (2002) 229-254.
- [14]. N.C. Ho, N. Van Long, Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras, *Fuzzy sets and Systems*, 158 (2007) 452-471. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2006.10.023>
- [15]. H.-L. Bui, D.-T. Tran, N.-L. Vu, Optimal fuzzy control of an inverted pendulum, *Journal of vibration and control*, 18 (2012) 2097-2110. <https://doi.org/10.1177/1077546311429053>
- [16]. N.D. Duc, 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 (2012) 2186-2200.
- [17]. N.D. Anh, 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 (2013) 483-495. <https://doi.org/10.1002/stc.508>
- [18]. H.-L. Bui, 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 (2015) 251-275. <https://doi.org/10.1007/s10489-014-0638-6>
- [19]. H.-L. Bui, 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 (2017) 1984-2002. <https://doi.org/10.1177/1077546315606601>
- [20]. H.-L. Bui, T.-A. Le, V.-B. Bui, Explicit formula of hedge-algebras-based fuzzy controller and applications in structural vibration control, *Applied Soft Computing*, 60 (2017) 150-166. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.045>
- [21]. V.-B. Bui, Q.-C. Tran, H.-L. Bui, Multi-objective optimal design of fuzzy controller for structural vibration control using Hedge-algebras approach, *Artificial Intelligence Review*, 50 (2018) 569-595. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9549-3>
- [22]. D.-T. Tran, V.-B. Bui, T.-A. Le, H.-L. Bui, Vibration control of a structure using sliding-mode hedge-algebras-based controller, *Soft Computing*, 23 (2019) 2047-2059.
- [23]. H.-L. Bui, Q.-C. Tran, A new approach for tuning control rule based on hedge algebras theory and application in structural vibration control, *Journal of Vibration and Control*, (2020) 1077546320964307. <https://doi.org/10.1177/1077546320964307>
- [24]. H. Gao, W. Sun, P. Shi, Robust sampled-data H-infinity control for vehicle active suspension systems, *IEEE Transactions on control systems technology*, 18 (2009) 238-245.
- [25]. H. Du, N. Zhang, H_∞ control of active vehicle suspensions with actuator time delay, *Journal of sound and vibration*, 301 (2007) 236-252. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.09.022>
- [26]. H. Gao, W. Sun, P. Shi, Robust Sampled-Data H_∞ Control for Vehicle Active Suspension Systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18 (2009) 238-245. <https://doi.org/10.1109/TCST.2009.2015653>
- [27]. W. Sun, Y. Zhao, J. Li, L. Zhang, H. Gao, Active suspension control with frequency band constraints and actuator input delay, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2011) 530-537. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2134057>
- [28]. S. Bououden, M. Chadli, H.R. Karimi, A robust predictive control design for nonlinear active suspension systems, *Asian Journal of Control*, 18 (2016) 122-132. <https://doi.org/10.1002/asjc.1180>
- [29]. J.-S. Lin, C.-J. Huang, Nonlinear backstepping control design of half-car active suspension systems, *International Journal of Vehicle Design*, 33 (2003) 332-350. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2003.003581>