

Bộ điều khiển FLC-Sugeno tối ưu dựa trên PSO cho hệ thống giảm chấn tích cực

Nguyễn Hoàng Việt^{1,2}, Feiqi Deng¹, Nguyễn Tiến Duy^{2*}, Nguyễn Duy Minh³

¹School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

²Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen, Vietnam;

³University of Information and Communication Technology, Thai Nguyen, Vietnam.

*Email: duy.infor@tnut.edu.vn

Nhận bài: 11/9/2023; Hoàn thiện: 09/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.55-63>

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một phương pháp thiết kế bộ điều khiển mờ theo mô hình Sugeno (FLC-sugeno) tối ưu cho hệ thống giảm chấn tích cực. Các tham số của bộ điều khiển được xem xét một cách tổng thể và được tìm kiếm tối ưu bằng thuật toán PSO (Particle Swarm Optimization algorithm). Bộ điều khiển này có 16 tham số được tối ưu bao gồm: 03 tham số hiệu chỉnh miền xác định của các biến trạng thái đầu vào và biến điều khiển ở đầu ra của bộ điều khiển, 04 tham số hiệu chỉnh tập mờ của các biến ngôn ngữ và 09 tham số là trọng số luật mờ của hệ luật điều khiển. Để đánh giá và so sánh tính hiệu quả của bộ điều khiển FLC-Sugeno tối ưu, một bộ điều khiển PID tối ưu bằng PSO cũng được thực hiện. Kết quả mô phỏng hệ thống giảm chấn tích cực với các bộ điều khiển khi cùng chịu tác động một loại kích thích mặt đường tiêu chuẩn cho thấy FLC-Sugeno tối ưu cho thấy biên độ chuyển vị của thân xe là giảm đáng kể. Kết quả này cho thấy, một hướng mở rộng khi áp dụng hướng thiết kế cho các hệ thống giảm chấn tích cực phức tạp hơn.

Từ khóa: FLC-sugeno; Tối ưu bầy đàn; Hệ thống giảm chấn tích cực; Mô hình giảm chấn 1/4.

1. MỞ ĐẦU

Hệ thống giảm chấn được ứng dụng chủ yếu trên các hệ thống xe trong lĩnh vực giao thông vận tải. Ngoài ra, nó còn được sử dụng trong các hệ thống giảm chấn của nhà cao tầng, hệ thống cầu đường hay các hệ thống máy móc trong công nghiệp. Với nhu cầu tiện nghi và bảo vệ sức khỏe ngày càng cao thì hệ thống giảm chấn trong các phương tiện giao thông vận tải đặc biệt vận tải hành khách càng phải nâng cao về chất lượng để đáp ứng nhu cầu khẩn trương của con người. Đối với một xe ô tô, hệ thống giảm chấn được phân bố đều ở các bánh xe. Nếu giả thiết tải trọng phân bố đều thì việc nghiên cứu giảm chấn trên một bánh xe cũng tương tự như hệ thống giảm chấn cho cả xe.

Đối với mô hình giảm chấn một phần tư (Quarter-vehicle models), có thể phân ra làm 3 loại là: mô hình giảm chấn thụ động, mô hình giảm chấn bán tích cực và mô hình giảm chấn tích cực. Mô hình giảm chấn thụ động có cấu tạo đơn giản nhất, tuy nhiên, việc lựa chọn hệ số độ cứng của lò xo và cơ cấu cản dộ là sự thỏa hiệp giữa chất lượng giảm chấn và phạm vi tải trọng. Mô hình giảm chấn bán tích cực có thể thay đổi hệ số độ cứng lò xo và cơ cấu cản dộ trong phạm vi hẹp. Mô hình giảm chấn tích cực có chất lượng tốt hơn cả, tuy nhiên, nó có kết cấu phức tạp vì có thêm bộ điều khiển để điều khiển giảm chấn. Các thuật toán khác nhau cho hiệu quả điều khiển là rất khác nhau. Việc lựa chọn, thiết kế được một mô hình bộ điều khiển theo thuật toán tối ưu là mục tiêu của nghiên cứu trên đối tượng là mô hình giảm chấn tích cực. Hệ giảm chấn tích cực ngoài cơ cấu lò xo và bộ phận cản dộ, còn có một thành phần tạo ra lực điện từ từ động cơ điện tham gia vào quá trình hoạt động với mục đích nhanh chóng dập tắt quá trình dao động theo phương thẳng đứng (vertical) của hệ, hay nói cách khác là giảm thiểu tối đa sự tác động của mặt đường đến thân xe.

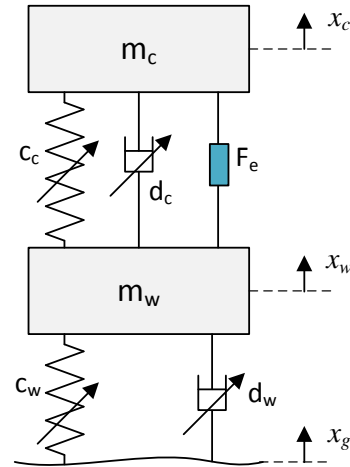
Bộ điều khiển FLC được tối ưu bằng giải thuật di truyền [1]. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã thực hiện việc chỉnh định hàm thuộc bằng thuật toán tối ưu GA. Hạn chế ở đây là mới chỉ dừng lại ở tối ưu hàm thuộc mà chưa tối ưu các tham số khác của bộ điều khiển mờ. Hơn nữa, ngày nay có nhiều nghiên cứu chỉ ra có nhiều thuật toán tối ưu vượt trội hơn GA, ví dụ như PSO mà chúng tôi sử dụng trong nghiên cứu này. Ngoài ra, nhiều nhà khoa học đã nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển mờ (FLC) trong các hệ giảm chấn [2-7]. Đã có nghiên cứu so sánh, đánh giá hiệu quả của FLC so với PID. Bộ điều khiển PID cho hiệu quả điều khiển trong vùng làm việc hẹp, ngoài dải thì bộ điều khiển kém hiệu quả [3]. Bộ điều khiển PID cũng có thể được điều chỉnh các hệ số bởi một bộ mờ để tạo thành một bộ điều khiển PID mờ thích nghi [8], tuy nhiên, cấu trúc bộ điều khiển thường phức tạp. Bộ điều khiển mờ được nghiên cứu ứng dụng nhiều trong các hệ giảm chấn tích cực [9-11], bộ điều khiển mờ FLC có tối ưu hàm thuộc ngay trong khi hệ thống làm việc [12].

Một đặc điểm chung của các nghiên cứu trước đây khi ứng dụng bộ điều khiển FLC cho các hệ thống giảm chấn nói chung đó là thiết kế bộ điều khiển mờ mà không có công đoạn tối ưu hoá các tham số của bộ điều khiển hoặc có tối ưu nhưng chỉ dừng lại ở sử dụng giải thuật tối ưu “lỗi thời” GA để tối ưu hàm thuộc của các tập mờ [1]. Để vượt qua hạn chế như đã phân tích, trong nghiên cứu này giải pháp được đề xuất là đưa ra phương án thiết kế bộ điều khiển FLC-Sugeno tối ưu đồng thời cả về tập mờ của các hàm thuộc và trọng số của hệ luật điều khiển. Kỹ thuật tối ưu được sử dụng là PSO [13, 14]. Đề xuất mới này có thể được khẳng định rằng đây là sự khác biệt so với các nghiên cứu trước đây.

2. MÔ HÌNH GIẢM CHẤN TÍCH CỰC

2.1. Mô hình giảm chấn tích cực

Mô hình giảm chấn tích cực một phần tử được trình bày như hình 1. Trong đó, khối thân dưới m_w đại diện cho lớp xe, bánh xe, phanh và các bộ phận trong bánh xe tác động lên hệ thống treo, m_c đại diện cho một phần tử khối lượng của xe bao gồm hành khách và tải trọng. Lớp xe được đặc trưng bởi thông số độ cứng c_w và hệ số cản dộ d_w . Khối thân trên và khối thân dưới được liên kết với nhau bằng cơ cấu lò xo c_c , cơ cấu cản dộ d_c và cơ cấu tạo nên lực điện từ F_e . Gọi các chuyển vị của mặt đường, khối thân dưới, khối thân trên lần lượt là x_g , x_w và x_c . Động cơ tuyến tính (*Linear Brushless Permanent Magnet - LBM*) tạo ra lực F_e với mục đích nhằm giảm thiểu quá trình giao động của hệ hay giảm thiểu tối đa sự tác động của mặt đường x_g đến khối thân trên. Như vậy, hệ bao gồm hai đầu vào là x_g nhiễu tác động từ mặt đường và lực F_e , đầu ra của hệ x_c , x_w , mục đích của quá trình điều khiển là $x_c \rightarrow 0$. Hệ phương trình vi phân mô tả hệ như sau:



Hình 1. Mô hình giảm chấn tích cực.

$$\begin{cases} m_c \ddot{x}_c = -c_c(x_c - x_w) - d_c(t)(\dot{x}_c - \dot{x}_w) + F_e(t) \\ m_w \ddot{x}_w = c_c(x_c - x_w) + d_c(t)(\dot{x}_c - \dot{x}_w) - c_w(t)(x_w - x_g) + d_w(t)(\dot{x}_w - \dot{x}_g) - F_e(t) \end{cases} \quad (1)$$

Theo [15], lò xo giảm chấn c_c được chọn sao cho hoạt động tuyến tính trong phạm vi làm việc giả sử c_c là hằng số. Các hệ số $d_c(t)$, $c_w(t)$ và $d_w(t)$ thay đổi trong phạm vi nhỏ quanh vị trí điểm làm việc.

$$d_c(t) = d_{c0} + \Delta d_c; \quad c_w(t) = c_{w0} + \Delta c_w; \quad d_w(t) = d_{w0} + \Delta d_w \quad (2)$$

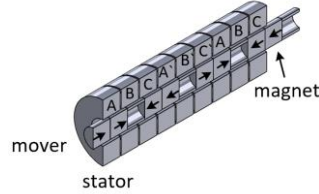
Trong đó, d_{c0} , c_{w0} , d_{w0} là các giá trị tại điểm làm việc; Δd_c , Δc_w , Δd_w là các thay đổi giá trị của chúng xung quanh điểm làm việc.

2.2. Mô hình động cơ tuyến tính (LBM)

Theo [16], cấu tạo của LBM như hình 2 với các giả thiết: Điện cảm các cuộn dây sator của động cơ là hằng số, chiều dài của roto là vô hạn để bỏ qua các hiệu ứng đầu cuối, cường độ từ thông của nam châm không đổi và bỏ qua hiệu ứng bão hoà từ, mô hình LBM viết dưới dạng hệ tọa độ dq như công thức (3):

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{dx}{dt} \frac{\pi}{\tau_p} \Psi_q; & u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \frac{dx}{dt} \frac{\pi}{\tau_p} \Psi_d \\ F_e = \frac{\pi}{\tau_p} \Psi_m i_q; & F_e - \left(K_1 \frac{dx}{dt} + K_2 + F_t \right) = I \frac{d^2 x}{dt^2} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, u_d, u_q, i_d, i_q là điện áp và dòng điện trên sator, R_s là điện trở sator của động cơ, Ψ_d và Ψ_q từ thông trên trục d và q , F_e là lực điện từ, I là lực quán tính của trục động cơ, x là khoảng cách di chuyển của trục động cơ, K_d và K_e là hệ số cản động và hệ số cản tĩnh, F_t là lực cản bên ngoài.



Hình 2. Cấu trúc động cơ tuyến tính dạng ống [16].

2.3. Mô hình của hệ giảm chấn tích cực sử dụng LBM

Thay (2) vào phương trình (1) ta được hệ phương trình vi phân mô tả hệ giảm chấn như sau:

$$\begin{cases} m_c \ddot{x}_c = -c_c(x_c - x_w) - (d_{c0} + \Delta d_c)(\dot{x}_c - \dot{x}_w) + F_e(t) \\ m_w \ddot{x}_w = c_c(x_c - x_w) + (d_{c0} + \Delta d_c)(\dot{x}_c - \dot{x}_w) - (c_{w0} + \Delta c_w)(x_w - x_g) + \\ \quad + (d_{w0} + \Delta d_w)(\dot{x}_w - \dot{x}_g) - F_e(t) \end{cases} \quad (4)$$

Đặt các biến trạng thái như sau:

$$\underline{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [(x_c - x_w) \ \dot{x}_c \ (x_w - x_g) \ \dot{x}_w]^T \quad (5)$$

Biến đầu ra là:

$$y = [\ddot{x}_c \quad F \quad (x_c - x_w)]^T \quad (6)$$

Với F là lực tải động do bánh xe tạo nên.

$$F = (c_{w0} + \Delta c_w)(x_g - x_w) + (d_{w0} + \Delta d_w)(\dot{x}_g - \dot{x}_w) \quad (7)$$

Từ cách đặt biến trạng thái này, ta đưa (4) về hệ phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A\underline{x} + BF + \Delta\underline{x} + N\dot{x}_g \\ y = C\underline{x} + DF + M\dot{x}_g \end{cases} \quad (8)$$

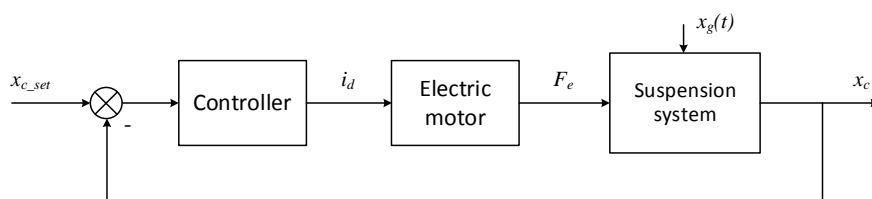
Với các ma trận là:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{c_c}{m_c} & -\frac{d_{c0}}{m_c} & 0 & \frac{d_{c0}}{m_c} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_c}{m_w} & \frac{d_{c0}}{m_w} & \frac{c_c}{m_w} & \frac{d_{w0}}{m_w} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta d_{c0}}{m_c} & 0 & \frac{\Delta d_{c0}}{m_c} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{\Delta d_{c0}}{m_w} & -\frac{\Delta c_c}{m_w} & -\frac{\Delta d_{w0}}{m_w} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{c_c}{m_c} & -\frac{d_c}{m_c} & 0 & \frac{d_c}{m_c} \\ 0 & 0 & -c_w & -d_t \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ d_{c0} + \Delta d_{w0} & 0 \end{bmatrix}; N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ \frac{d_{w0}}{m_w} \end{bmatrix}$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO MÔ HÌNH GIẢM CHẤN TÍCH CỰC

Với mục đích điều khiển là giảm thiểu tác động của nhiễu mặt đường đến khối thân trên, tức là giảm biên độ x_c tiến đến 0 trong thời gian ngắn nhất, tác giả sử dụng bộ điều khiển phản hồi đầu ra như hình 3.



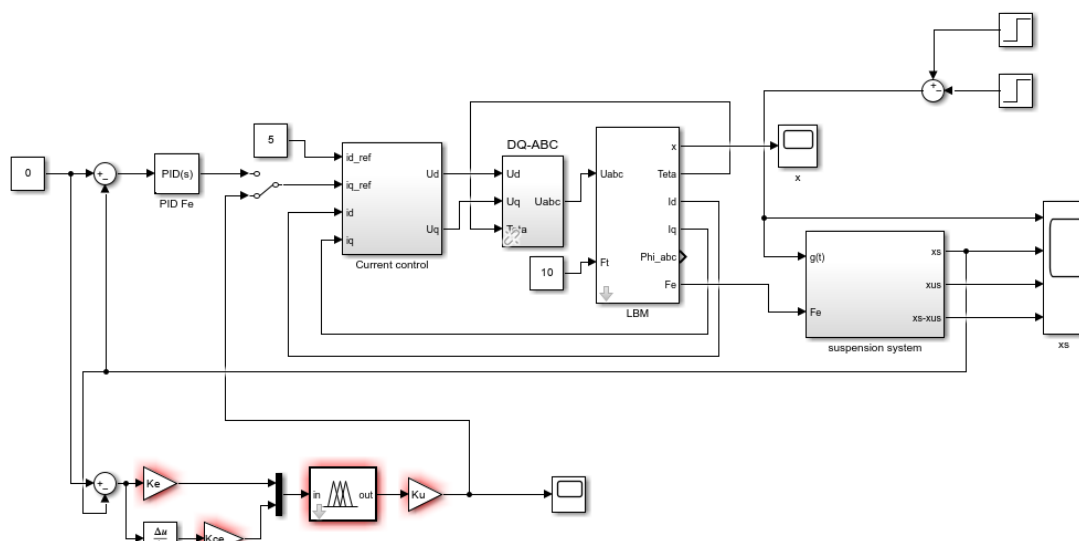
Hình 3. Cấu trúc điều khiển HTGC tích cực.

Trong đó, khối Electric motor bao gồm động cơ tuyến tính, bộ điều khiển dòng điện và khối chuyển đổi sang hệ dq . Khối giảm chấn Suspension system chịu sự chi phối của nhiễu mặt đường $g(t)$ tác động và nhận được lực tác động F_e từ khối Electric motor.

3.1. Thiết kế bộ điều khiển mờ FLC-Sugeno

Bộ điều khiển mờ được lựa chọn theo mô hình mờ Sugeno. Trong đó, hai đầu vào là e và ce , một đầu ra là u . Các tập mờ cho các biến ngôn ngữ vào/ra như sau:

- Các biến đầu vào: e , ce gồm các tập mờ NB, N, ZE, PS, PB, với 5 tập mờ hình tam giác được xác định trên miền $[-1, 1]$. Các tập mờ được thiết kế là phân hoạch mờ mạnh, có nghĩa là với giá trị thực x bất kỳ, tổng độ thuộc của x vào các tập mờ là bằng 1.
- Biến đầu ra u gồm 7 tập mờ dạng singleton gồm NB, N, NS, ZE, PS, P, PB được xác định trên miền $[-1, 1]$.



Hình 4. Sơ đồ mô phỏng hệ giảm chấn tích cực sử dụng bộ điều khiển FLC-Sugeno.

Bộ điều khiển FLC-Sugeno được thiết kế với miền giá trị của các biến vào/ra được chuẩn hoá trên khoảng $[-1, 1]$. Khi ghép vào hệ thống, các hệ số K_e , K_{ce} và K_u sẽ hiệu chỉnh giá trị của chúng về miền thực của tính hiệu. Bằng cách này, ta có thể linh hoạt trong việc ghép bộ điều khiển FLC-Sugeno vào các hệ thống điều khiển khác nhau. Hệ thống điều khiển được mô phỏng như trên hình 4.

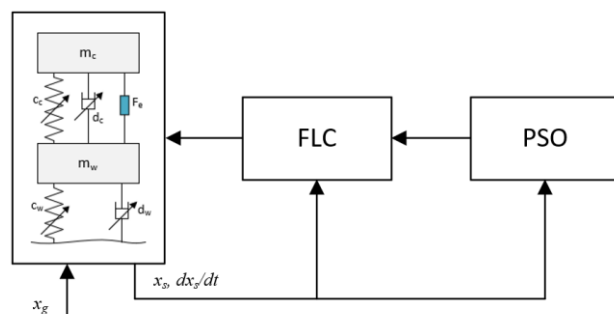
3.2. Tối ưu hoá tham số các bộ điều khiển bằng PSO

Thuật toán tối ưu PSO được Kennedy và Eberhar đề xuất năm 1995 [9]. Đây là thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên dựa trên mô phỏng hành vi và sự tương tác của bầy chim khi đi tìm nguồn thức ăn. Mỗi cá thể (hay phân tử) trong bầy đàn được đặc trưng bởi hai thành phần là véc tơ vận tốc dịch chuyển v_i và véc tơ vị trí x_i . Trong đó, mỗi phân tử trong bầy đàn có một giá trị thích nghi (*fitness value*), giá trị này được đánh giá bằng hàm độ đo thích nghi (*fitness fuction*).

Hàm mục tiêu của quá trình tối ưu được chọn là tiêu chuẩn IAE (Integral of the Absolute magnitude of the Error – tích phân trị tuyệt đối biên độ sai số).

$$fitness = IAE = \sum_{n=1}^j |e(n)| \rightarrow min \tag{9}$$

Sơ đồ tối ưu bộ điều khiển mờ được thể hiện như hình sau:

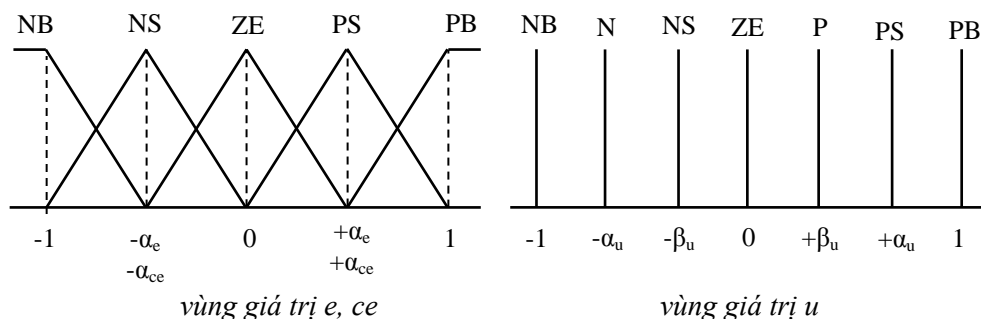


Hình 5. Sơ đồ tối ưu bộ điều khiển FLC bằng PSO.

3.2.1. Tối ưu hoá các tập mờ

Để tìm hình dạng tập mờ tối ưu, trong bài báo này, chúng tôi giới hạn một số điều kiện sau:

- Tập mờ ZE là tam giác cân, có đỉnh tại giá trị 0.
- Tập mờ PB và tập mờ NB đối xứng qua điểm 0. Tương ứng ta có các cặp tập mờ đối xứng qua điểm 0 khác là (N, P), (NS, PS).



Hình 6. Thiết kế các tập mờ tối ưu dựa trên PSO.

Khi này, việc xác định các tập mờ có tính đối xứng cho bộ điều khiển tối ưu là tìm 4 tham số α_e , α_{ce} , α_u và β_u . Miền tìm kiếm cho các tham số này được chọn trong khoảng: $\alpha_e, \alpha_{ce} \in [0.25,$

0.75]; $\beta_u \in [0.25, 0.5]$; $\alpha_u \in [0.5, 0.75]$.

3.2.2. Tối ưu hoá trọng số các luật mờ

Mỗi luật điều khiển mang một trọng số xác định mức độ tin cậy của luật. Hầu hết các nhà khoa học chỉ tập trung nghiên cứu thiết kế tập mờ mà xác định hệ luật mà chưa quan tâm tới trọng số của luật. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng thuật toán PSO để tìm kiếm trọng số của mỗi luật. Hệ luật điều khiển khiên và trọng số mỗi luật được thể hiện trên bảng 1.

Trong bảng 1, ta có 25 luật với w_i ($i=1, 9$) là trọng số của mỗi luật. Phát hiện ra rằng theo tính chất của hệ thống điều khiển này thì hệ luật có tính đối xứng qua tâm của bảng luật, vì vậy các luật ở vị trí đối xứng sẽ có trọng số bằng nhau. Cụ thể, các luật “if $e=NB$ and $ce=NB$ then $u=NB$ ” và luật “if $e=PB$ and $ce=PB$ then $u=PB$ ” có cùng trọng số là w_1 , luật “if $e=NB$ and $ce=NS$ then $u=NB$ ” và luật “if $e=PB$ and $ce=PS$ then $u=PB$ ” có cùng trọng số là w_2 , v.v. Với tính chất đối xứng đó giúp ta giảm được số biến cần tối ưu từ 25 xuống còn 9.

Bảng 1. Hệ luật điều khiển với trọng số.

e \ ce	NB		NS		ZE		PS		PB	
	NB	NB	w_1	NB	w_2	N	w_3	NS	w_4	ZE
NS	NB	w_4	N	w_5	NS	w_6	ZE	w_7	PS	w_8
ZE	N	w_7	NS	w_8	ZE	w_9	PS	w_8	P	w_7
PS	NS	w_8	ZE	w_7	PS	w_6	P	w_5	PB	w_4
PB	ZE	w_5	PS	w_4	P	w_3	PB	w_2	PB	w_1

Như vậy, để thiết kế được bộ điều khiển FLC-Sugeno tối ưu theo đề xuất của nghiên cứu này, thuật toán PSO sẽ thực hiện tìm kiếm 16 tham số cho bộ điều khiển.

- 03 tham số hiệu chỉnh K_e , K_{ce} và K_u .
- 04 tham số chỉnh định tập mờ α_e , α_{ce} , α_u và β_u .
- 09 tham số (w_i) là trọng số của hệ luật điều khiển.

Trong Matlab simulink, chúng tôi sử dụng hàm *particleswarm()*. Đây là hàm này hỗ trợ thuật toán tối ưu PSO.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hệ thống mô phỏng được xây dựng và nhận các thông số vật lý của mô hình như trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số vật lý của mô hình giảm chấn.

Thành phần	Thông số
m_c	256 kg
m_w	31 kg
c_{c0}	20200 N/m
Δc_c	1010 N/m
d_{c0}	1140 Ns/m
Δd_c	57 Ns/m
c_{w0}	128000 N/m
Δc_w	1280 N/m
d_{w0}	0 Ns/m

Các thông số của động cơ tuyệt tính được cho như trong bảng 3.

Bảng 3. Thông số của động cơ LBM.

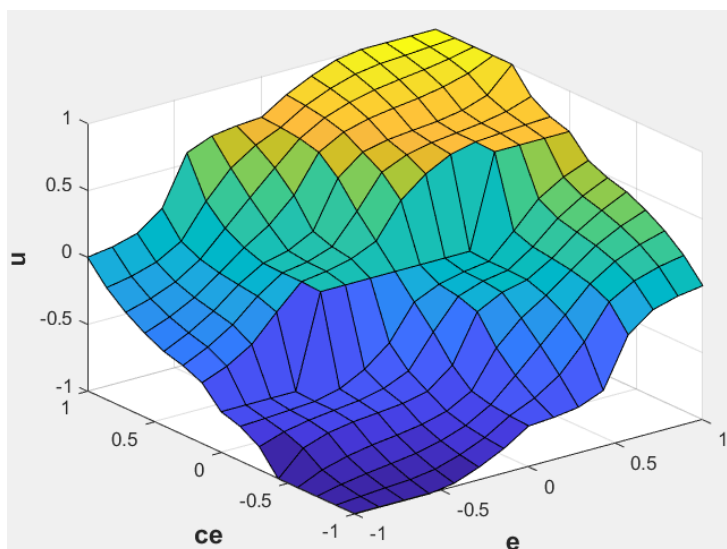
Thành phần	Thông số
R_s	0.2 Ω
L_s	8.5 mH
M_s	2 mH
τ_p	10 mm
Ψ_m	10 mH
F_t	10N
R_{abc}	0.2 Ω
L_{abc}	8.5 mH
$\Psi_{abc} = 2$ mH	$I = 10$
K_d	50 N
K_e	5N

Sau khi chạy tối ưu, ta nhận được kết quả như *Bảng 4*. Để đánh giá hiệu quả điều khiển của bộ FLC-Sugeno tối ưu, chúng tôi cũng thiết kế một bộ điều khiển PID tối ưu với các tham số K_p , K_I và K_D cũng được tìm kiếm tối ưu bằng PSO.

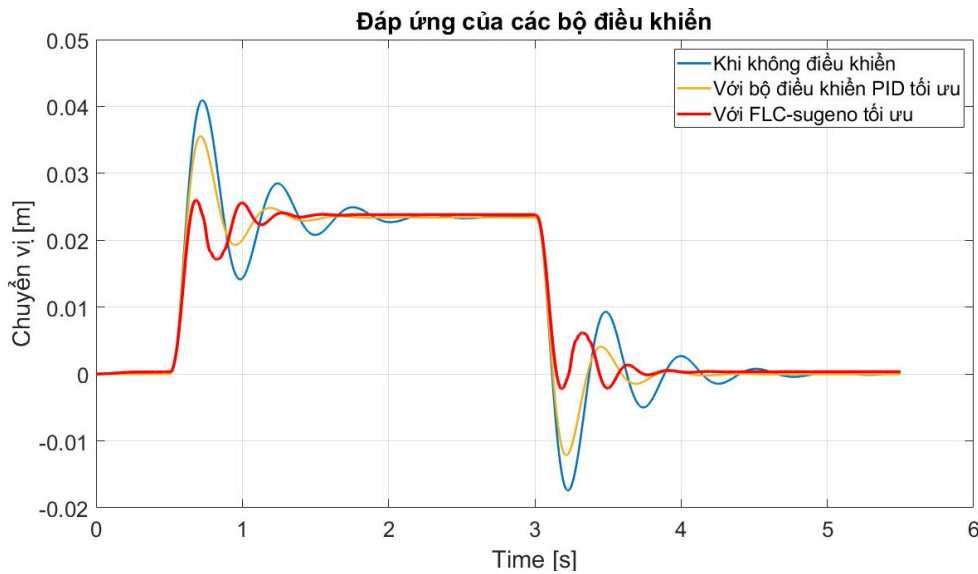
Bảng 4. Các giá trị tham số tối ưu của FLC-Sugeno.

Tham số tập mờ	Trọng số hệ luật
$\alpha_e = 0.398389$	$w_1 = 0.198813$
$\alpha_{ce} = 0.625307$	$w_2 = 0.257075$
$\alpha_u = 0.636611$	$w_3 = 0.0747781$
$\beta_u = 0.406224$	$w_4 = 1$
Tham số hiệu chỉnh miền giá trị các biến	$w_5 = 0.337037$
$Ke = 0.3$	$w_6 = 0.723424$
$Kce = 0.289315$	$w_7 = 0.905881$
$Ku = 4101.68$	$w_8 = 0.868694$
	$w_9 = 0.125044$

Kịch bản dành cho mô phỏng được thiết lập với tổng thời gian mô phỏng là 5.5 s. Tại thời điểm 0.5 s, đưa kích thích step với biên độ 0.3. Đến thời điểm 3 s, đưa thêm kích thích step với biên độ -0.3. Kết quả mô phỏng như sau:



Hình 7. Mối quan hệ vào ra của bộ điều khiển mờ.



Hình 8. Đáp ứng của của hệ giảm chấn cùng kích thích với các bộ điều khiển tối ưu.

5. KẾT LUẬN

Quan sát trên hình 8, tại thời điểm 0.5 s, khi kích thích mặt đường được đưa vào hệ thống: đường màu xanh lam là đáp ứng chuyển vị thân xe khi không có điều khiển, phải sau 03 chu kỳ dao động mới đạt giá trị ổn định. Độ lớn tối đa của chuyển vị thân xe khi không điều khiển lớn hơn 15.5% so với có điều khiển bằng PID tối ưu. Trong khi đó, với bộ điều khiển PID tối ưu, đường màu vàng là đáp ứng cho thấy chỉ sau 02 chu kỳ điều khiển đã đạt giá trị ổn định nhưng biên độ chuyển vị còn khá lớn. Đường màu đỏ là đáp ứng chuyển vị thân xe ứng với bộ điều khiển FLC-Sugeno tối ưu. Có thể thấy rõ là, đáp ứng còn có nhiều đỉnh dao động nhưng biên độ chuyển vị thì giảm rất nhiều. Tại thời điểm 3 s, đưa kích thích bằng -0.3 vào hệ thống, các đáp ứng đều có dáng dấp và xu hướng như tại thời điểm 0.5 s.

Qua những kết quả trên có thể thấy rằng, FLC-Sugeno tối ưu đáp ứng tốt khi điều khiển hệ giảm chấn có tính phi tuyến cao. Khi cùng được thực hiện tối ưu hoá bằng PSO thì FLC-Sugeno cho đáp ứng điều khiển là tốt hơn nhiều so với PID. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, với đề xuất thực hiện tối ưu một cách tổng thể cả về hàm thuộc của tập mờ và trọng số luật mờ bằng PSO thì FLC-Sugeno tối ưu làm việc rất tốt. Từ đây, có thể áp dụng thiết kế bộ điều khiển cho mô hình phức tạp hơn như mô hình $\frac{1}{2}$ hoặc mô hình tổng thể của cả một xe.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pekgökgöz, Recep Kadir, et al. "Active suspension of cars using fuzzy logic controller optimized by genetic algorithm." *International journal of engineering and applied sciences* 2.4: 27-37, (2010).
- [2]. Allam, Essam, et al. "Vibration control of active vehicle suspension system using fuzzy logic algorithm." *Fuzzy Information and Engineering* 2.4: 361-387, (2010).
- [3]. Changizi, Nemat, and Modjtaba Rouhani. "Comparing PID and fuzzy logic control a quarter car suspension system." *The journal of mathematics and computer science* 2.3: 559-564, (2011).
- [4]. Chen, Zhengke. "Research on fuzzy control of the vehicle's semi-active suspension." 2015 International Conference on Management, Education, Information and Control. Atlantis Press, (2015).
- [5]. Palanisamy, Senthilkumar, and Sivakumar Karuppan. "Fuzzy control of active suspension system." *Journal of Vibroengineering* 18.5: 3197-3204, (2016).
- [6]. Bhangal, Narinder Singh, and Kumar Amit Raj. "Fuzzy control of vehicle active suspension system." *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 5.2: 144, (2016).

- [7]. Basari, A. A., et al. "Fuzzy logic controller for half car active suspension system." Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC) 10.2: 125-129, (2018).
- [8]. Han, Shi-Yuan, et al. "Adaptive fuzzy PID control strategy for vehicle active suspension based on road evaluation." Electronics 11.6: 921, (2022).
- [9]. Robert, J. Joshua, et al. "Fuzzy control of active suspension system based on quarter car model." Materials Today: Proceedings 66: 902-908, (2022).
- [10]. Yazid, N. E. H., et al. "New Fuzzy Logic Control for Quarter Vehicle Suspension System." Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities: Case Study: Tipasa, Algeria. Springer International Publishing, (2022).
- [11]. T. A. Arslan et al. "Quarter Car Active Suspension System Control Using Fuzzy Controller", Engineering Perspective 2 (4): 33-39, (2022).
- [12]. Zhang, Zhenxing, and Jiuxiang Dong. "A new optimization control policy for fuzzy vehicle suspension systems under membership functions online learning." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems 53.5: 3255-3266, (2022).
- [13]. Takagi, Tomohiro, and Michio Sugeno. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control." IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 1: 116-132, (1985).
- [14]. Kennedy, James, and Russell Eberhart. "Particle swarm optimization." Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. Vol. 4. IEEE, (1995).
- [15]. Koch, G.P.A.. "Adaptive Control of Mechatronic Vehicle Suspension". PhD Thesis, Technical University of Munich, Munich, Germany, (2011).
- [16]. Bryan Craig Murphy, "Design and construction of a precision tubular linear motor and controller", Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.

ABSTRACT

Optimal controller FLC-Sugeno based on PSO for an active damping system

In this article, a method of designing an optimal fuzzy logic controller Sugeno model (FLC-Sugeno) control for active suspension system Quarter-vehicle models is presented. The parameters of FLC-Sugeno controller are considered a whole and optimally searched using the Particle Swarm Optimization algorithm (PSO). The 16 optimized parameters include: 03 parameters for adjusting the domain of the input state variables and control variables at the controller's output, 04 fuzzy set adjustment numbers of the linguistic variables and 09 parameters, which are the fuzzy rule weights of the rule system control. To compare and evaluate the effectiveness of the optimal FLC-Sugeno controller, and optimal PID controller using PSO is also implemented. Simulation results of the active damping system with controllers when affected by the same type and standard road surface excitation show that FLC-Sugeno controller is optimal for the vehicle bodies displacement amplitude to be significantly and quickly end the oscillation cycles, establishing a stable balance. This result shows an extension when applying the design direction to more complex active damping system models.

Keywords: FLC-Sugeno; Particle Swarm Optimization; Active suspension system; Quarter-vehicle models.