

Điều khiển hệ thống treo tích cực Macpherson bằng bộ điều khiển RISE bão hòa

Đinh Thị Thanh Huyền

Tóm tắt—Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển bền vững cho hệ thống treo tích cực Macpherson với các tham số không xác định và chịu tác động của nhiễu ngoài. Dựa trên phương pháp điều khiển RISE bão hòa (Saturated Robust Integral of the Sign of the Error), lực điều khiển được đảm bảo hạn chế trong một giới hạn cho trước. Lý thuyết ổn định Lyapunov được sử dụng trong việc chứng minh sai số điều khiển gồm dịch chuyển thẳng đứng, vận tốc, gia tốc dao động của thân xe là tiến về không theo đường tiệm cận, từ đó đảm bảo nâng cao độ êm dịu chuyển động cho xe. Chương trình mô phỏng MATLAB đã kiểm chứng hiệu quả của phương pháp điều khiển trên cả miền thời gian và miền tần số, kết quả được so sánh với hệ thống treo tích cực điều khiển (Proportional Integral Derivative PID), hệ thống treo bán tích cực điều khiển Skyhook cải tiến và hệ thống treo bị động.

Từ khóa—Bộ điều khiển RISE; Điều khiển phi tuyến; Hệ thống treo tích cực Macpherson.

1 GIỚI THIỆU

Hệ thống treo Macpherson có ưu điểm là kết cấu gọn, không gian lắp đặt hẹp do đó thường được sử dụng trên trục dẫn hướng đảm bảo tính linh hoạt và không gian làm việc cho bánh xe dẫn. Việc thay thế các giảm chấn bị động bằng các giảm chấn tích cực hay lắp đặt thêm các cơ cấu chấp hành đã mang đến khả năng điều khiển cho hệ thống treo nhằm mục đích nâng cao độ êm dịu và độ an toàn chuyển động cho xe. Dù nhược điểm là chi phí chế tạo lớn, nhưng hệ thống treo tích cực có tính linh hoạt cao trong điều khiển, hứa hẹn đem đến tính tiện nghi và sự an toàn tốt nhất cho xe.

Bài báo này được gửi vào ngày 24 tháng 06 năm 2017 và được chấp nhận đăng vào ngày 11 tháng 10 năm 2017.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2015.33.

Đinh Thị Thanh Huyền, Khoa Cơ khí, Đại học Giao thông Vận Tải, Hà Nội.

Tuy vậy việc thiết kế điều khiển cho hệ thống treo tích cực Macpherson vẫn là vấn đề khó cần được nghiên cứu, do mô hình động lực học của hệ này là phi tuyến và khó xác định được chính xác [1-5], do đó luôn tồn tại các thành phần bất định trong mô hình động lực học và hệ luôn chịu tác động của nhiễu mặt đường. Yêu cầu đặt ra là cần có phương pháp điều khiển bền vững đối với sự bất định của mô hình. Nhưng để áp chế tính bất định của hệ thống thường đòi hỏi lực điều khiển có dải giá trị lớn (high-gain), điều này đưa đến nhưng khó khăn trong việc thực thi do yêu cầu cao đối với cơ cấu chấp hành.

Phương pháp điều khiển RISE bão hòa (Saturated Robust Integral of the Sign of the Error) [7] là một phương pháp điều khiển bền vững nhưng có tín hiệu điều khiển được hạn chế trong giới hạn nhất định và giới hạn này có thể thay đổi theo sự lựa chọn thích hợp của tham số điều khiển. Ngoài ra, luật điều khiển RISE là luật điều khiển liên tục nên tránh được hiện tượng “rung”. Tuy vậy, thuật toán RISE bão hòa hiện chỉ phát triển cho các mô hình bậc hai có ma trận đầu vào (control matrix) là ma trận đơn vị. Còn giải pháp đối với trường hợp ma trận đầu vào là ma trận không xác định thì vẫn là một vấn đề cần nghiên cứu.

Bài báo này đóng góp một giải pháp điều khiển bền vững cho hệ thống treo tích cực.

Macpherson với ma trận đầu vào không xác định và lực điều khiển được đảm bảo bão hòa trong giới hạn cho trước. Kết quả mô phỏng thực hiện trên MATLAB đã minh họa cho hiệu quả của phương pháp điều khiển.

2 MÔ HÌNH DAO ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG TREO VÀ MỤC TIÊU ĐIỀU KHIỂN

2.1 Mô hình dao động

Phương trình động lực học của hệ thống treo Macpherson đã được xây dựng theo phương pháp Euler – Lagrange trong các tài liệu tham khảo [1]-[5]. Mô hình dao động $\frac{1}{4}$ ô tô của hệ thống treo tích cực Macpherson được biểu diễn trên Hình 1. Lựa

chọn dao động thẳng đứng của khối lượng được treo z_s và góc quay của đòn ngang dưới θ là các tọa độ suy rộng thì phương trình dao động của hệ thống treo tích cực Macpherson được biểu diễn như sau:

$$\dot{x}(t) = F(x) + G(x_3)u_a(t) + H(x_3)z_r(t) + d(t). \quad (1)$$

Trong đó:

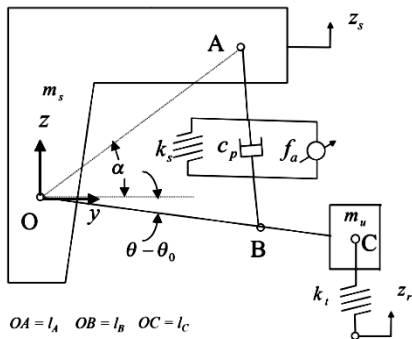
$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \triangleq [z_s \ \dot{z}_s \ \theta \ \dot{\theta}]$$
 là

vector trạng thái của hệ, $u_a \in R$ là lực điều khiển tích cực, $z_r \in R$ là kích thích từ mặt đường, $d \in R^4$ là thành phần bất định trong phương trình động lực học (1) biểu diễn các nhiễu ngoài tác động vào hệ thống hoặc các phần động lực học chưa được xét đến của hệ. Các vector $F, G, H \in R^4$ là có dạng

$$\begin{aligned} F &\triangleq [x_2 \ f_1(x) \ x_4 \ f_2(x)]^T, \\ G &\triangleq [0 \ g_1(x_3) \ 0 \ g_2(x_3)]^T, \\ H &\triangleq [0 \ h_1(x_3) \ 0 \ h_2(x_3)]^T. \end{aligned} \quad (2)$$

Các hàm $f_1(x), f_2(x), g_1(x_3), g_2(x_3), h_1(x_3), h_2(x_3)$ là các hàm liên tục như sau:

$$\begin{aligned} f_1 &\triangleq \frac{1}{M} \{ m_u l_c^2 \sin(x_3 - \theta_0) x_4^2 - \sin^2(x_3 - \theta_0) l(x) \\ &\quad + m(x_3) x_4 - \cos(x_3 - \theta_0) n(x_3) \} \end{aligned}$$



Hình 1. Mô hình dao động 1/4 ô tô với hệ thống treo tích cực Macpherson

$$\begin{aligned} f_2 &\triangleq \frac{-1}{M} \left\{ \frac{m_s + m_u}{m_u l_c} (m(x_3) x_4 - \cos(x_3 - \theta_0) n(x_3)) \right. \\ &\quad \left. + 0.5 m_u l_c \sin(2(x_3 - \theta_0)) x_4^2 + \frac{m_s}{m_u l_c} \cos(x_3 - \theta_0) l(x) \right\} \\ g_1 &\triangleq \frac{l_B \cos(x_3 - \theta_0)}{M}, \quad g_2 \triangleq -\frac{(m_s + m_u) l_B}{m_u l_c M} \end{aligned}$$

$$h_1 \triangleq \frac{k_t l_c \sin^2(x_3 - \theta_0)}{M}, \quad h_2 \triangleq \frac{m_s k_t \cos(x_3 - \theta_0)}{m_u M} \quad (3)$$

$$\text{Với } M \triangleq m_s l_c + m_u l_c \sin^2(x_3 - \theta_0),$$

$$l \triangleq k_t l_c (x_1 + l_c (\sin(x_3 - \theta_0) - \sin(-\theta_0))),$$

$$m \triangleq \frac{c_p b_1^2 \sin^2(\alpha' - x_3)}{4(a_1 - b \cos(\alpha' - x_3))},$$

$$n \triangleq \frac{1}{2} k_s \sin(\alpha' - x_3) \left[b_1 + \frac{d_1}{\sqrt{c_1 - d_1 \cos(\alpha' - x_3)}} \right]$$

và $m_s, m_u, l_A, l_B, l_c, k_s, k_t, c_p, \theta_0, \alpha'$ là các tham số không xác định của hệ, nhưng giá trị thay đổi trong một khoảng xác định (xem thêm trong tài liệu [1]). Thuật toán điều khiển RISE bão hòa được xây dựng dựa trên giả thiết:

Giả thiết 1: Thành phần bất định d và các đạo hàm \dot{d}, \ddot{d} tồn tại, liên tục và bị chặn ($d, \dot{d}, \ddot{d} \in L_\infty$). Tương tự, kích thích mặt đường z_r đủ trơn để thỏa mãn $z_r, \dot{z}_r, \ddot{z}_r \in L_\infty$.

Giả thiết 2: Đo được hoàn toàn các biến trạng thái biên độ dao động và vận tốc dao động thẳng đứng z_s, \dot{z}_s của khối lượng được treo.

2.2 Mục tiêu điều khiển

Khối lượng được treo hay thân xe luôn dao động dưới tác động của kích thích từ mặt đường, nhiệm vụ của bộ điều khiển hệ thống treo tích cực Macpherson là dập tắt nhanh gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe nhằm nâng cao độ êm dịu chuyển động, đồng thời vẫn phải đảm bảo độ an toàn chuyển động cho ô tô. Tuy nhiên, về phương diện điều khiển, hệ thống treo tích cực Macpherson là hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành (under-actuated system), tức là hệ có 2 biến trạng thái z_s, θ nhưng chỉ có một tín hiệu điều khiển u_a , do vậy rất khó để đạt đồng thời cả hai mục tiêu $z_s \rightarrow 0$ và $\theta \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Tuy nhiên, để đảm bảo độ an toàn chuyển động cho ô tô, góc quay của đòn ngang dưới θ chỉ yêu cầu bị chặn trong một giới hạn cho phép, và điều này có thể đạt được khi độ lớn của lực chủ động u_a bị hạn chế trong một giới hạn xác định. Liên hệ bị chặn giữa góc quay của đòn ngang θ với độ an toàn chuyển động của ô tô được đánh giá trong tài liệu tham khảo [6].

Do vậy, mục tiêu điều khiển đối với hệ thống treo tích cực Macpherson là thiết kế tín hiệu điều khiển u_a sao cho đồng thời cả biên độ, vận tốc, gia

tốc dao động thẳng đứng của khối lượng được treo $z_s, \dot{z}_s, \ddot{z}_s \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, với tín hiệu điều khiển bị hạn chế trong một giới hạn cho trước \bar{u} .

3 THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN

Từ mục tiêu điều khiển và các bước thiết kế luật điều khiển RISE bảo hòa, các sai số điều khiển và sai số điều khiển phụ trợ được định nghĩa như sau:

$$e_1 \triangleq z_s, \quad e_2 \triangleq \dot{e}_1 + \alpha_1 \tanh(e_1) + \tanh(e_f), \quad (4)$$

$$r \triangleq \dot{e}_2 + \alpha_2 \tanh(e_2) + \alpha_2 e_2, \quad (5)$$

Với $\alpha_1, \alpha_2 \in R^+$ là các hằng số điều khiển dương, và tín hiệu $e_f \in R$ là tín hiệu ra của hệ con có phương trình như sau:

$$\dot{e}_f \triangleq \cosh^2(e_f) \{-\gamma_1 e_2 + \tanh(e_1) - \gamma_2 \tanh(e_f)\} \quad (6)$$

Với $\gamma_1, \gamma_2 \in R^+$ cũng là các hằng số điều khiển dương. Căn cứ vào Giả thiết 2, các sai số điều khiển e_1, e_2 là các tín hiệu đo được, nên có thể sử dụng để thiết kế điều khiển; còn tín hiệu r là tín hiệu không đo lường được, được sử dụng trong quá trình phát triển luật điều khiển.

Luật điều khiển RISE bảo hòa là luật điều khiển có thể áp dụng cho các hệ phi tuyến có đặc điểm liên tục, bất định và có thể có tác động của nhiễu bên ngoài, trong đó độ lớn của tín hiệu điều khiển được hạn chế trong một giới hạn xác định, thay đổi được. Các bước phát triển của luật điều khiển RISE áp dụng cho hệ phi tuyến tổng quát và các bước chứng minh của kết quả lý thuyết rằng sai số điều khiển tiến tới 0 theo đường tiệm cận bằng lý thuyết ổn định Lyapunov có thể tham khảo cụ thể trong tài liệu [7]. Bài báo này sẽ tập trung vào việc áp dụng thuật toán điều khiển RISE bảo hòa cho hệ thống treo tích cực Macpherson và các kết quả mô phỏng kiểm chứng của thuật toán.

Mục tiêu điều khiển là dập tắt nhanh dao động của hệ thống treo tích cực Macpherson (1) có thể đạt được bằng sự lựa chọn của lực điều khiển tích cực u_a có dạng như sau:

$$u_a \triangleq -\hat{\Omega}^{-1} \gamma_1 \tanh(v) \quad (7)$$

Với các thành phần trong luật điều khiển RISE bảo hòa (7) sẽ được giải thích cụ thể sau đây: $v(t) \in R$ là tín hiệu phụ trợ và là tín hiệu ra của hệ con thứ hai như sau:

$$\dot{v} \triangleq \cosh^2(v) [\alpha_2 \tanh(e_2) + \alpha_2 e_2 + \beta_1 \operatorname{sgn}(e_2)] \quad (8)$$

với $\beta_1 \in R^+$ là hằng số điều khiển, $\hat{\Omega} \in R$ là hằng số xác định được định nghĩa bởi:

$$\hat{\Omega} \triangleq C\hat{G} \quad (9)$$

Trong đó, C là vector hằng số có dạng $C \triangleq [\alpha_2 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$ và $\hat{G} \in R^4$ là hằng số ước lượng tốt nhất cho ma trận đầu vào G trong (1). Hằng số $\hat{\Omega}$ trong (9) được giả sử là khả nghịch, hay có tồn tại nghịch đảo.

Phân tích luật điều khiển được lựa chọn trong (7), từ tính chất của hàm \tanh , ta thấy lực điều khiển tích cực u_a bị bảo hòa trong giới hạn $|\hat{\Omega}^{-1} \gamma_1|$. Bằng việc lựa chọn thích hợp các hằng số điều khiển $\gamma_1, \hat{\Omega}$ ta có thể thay đổi được giới hạn bảo hòa của lực điều khiển u_a để đảm bảo được rằng độ lớn lực điều khiển u_a nằm trong một giới hạn cho trước \bar{u} , tức là: $|u_a| \leq |\hat{\Omega}^{-1} \gamma_1| \leq \bar{u}$.

Tương tự các bước phân tích ổn định Lyapunov trong [7], ta có thể chỉ ra được các sai số điều khiển $|e_1(t)| \rightarrow 0, |e_2(t)| \rightarrow 0, |r(t)| \rightarrow 0, |e_f(t)| \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, từ đó dựa vào liên hệ tuyến tính giữa các sai số điều khiển và sai số điều khiển phụ trợ được định nghĩa trong (4), (5), (6), ta có thể đồng thời chỉ ra $|\dot{e}_1(t)| \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Điều này có nghĩa gia tốc dao động thẳng đứng của khối lượng được treo \ddot{z}_s tiến tới 0 theo tiêu chuẩn tiệm cận.

Như vậy mục tiêu điều khiển đạt được nhờ sự lựa chọn thích hợp các hằng số điều khiển của luật điều khiển RISE bảo hòa trong (7).

4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đã thiết kế, chương trình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm MATLAB, áp dụng cho hệ thống treo tích cực Macpherson có các tham số động học và động lực học cho trong Bảng 1. Chú ý rằng đây là các tham số của một hệ thống treo được sử dụng để minh họa kết quả điều khiển, còn luật điều khiển trong (7) không yêu cầu xác định chính xác các tham số này.

Nhiều tác động $d(t)$ trong phương trình trạng thái (1) được lựa chọn có dạng tổ hợp của ma sát tĩnh và ma sát động như sau: $d = [0 \quad d_1(t) \quad 0 \quad d_2(t)]$, trong đó $d_1 = 5,3x_2 + 8,5 \tanh(x_2)$ và $d_2 = 1,1x_4 + 2,4 \tanh(x_4)$. Kết quả điều khiển của phương pháp đề xuất được so sánh với hệ thống treo bị động, hệ thống treo bán tích cực sử dụng điều khiển Skyhook cải tiến [5] và hệ thống treo tích cực sử dụng bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative).

Kết quả mô phỏng của các bộ điều khiển được so sánh trên cả miền thời gian và miền tần số, khi hệ thống treo chịu tác động của biên dạng mặt đường dạng bậc và dạng điều hòa.

Bảng 1. Các tham số động học và động lực học của hệ thống treo Macpherson.

Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Khối lượng được treo	m_s	453 (kg)
Khối lượng không được treo	m_u	71 (kg)
Độ cứng của lò xo	k_s	17658 (N/m)
Độ cứng của phần tử lớp	k_r	183887 (N/m)
Hệ số cản giảm chấn	c_p	1950 (N.sec/m)
Tọa độ của điểm A	y_A / z_A	0,1074/0,5825 (m)
Chiều dài đòn ngang dưới	l_R	0,34 (m)
Khoảng cách OC	l_C	0,37 (m)
Góc quay ban đầu của đòn ngang	θ_0	-13,7°

4.1 Kết quả mô phỏng trên miền thời gian

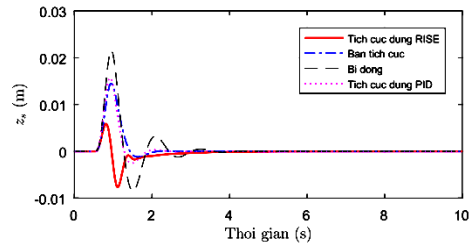
Trong mô phỏng trên miền thời gian, ô tô được giả sử di chuyển với vận tốc cố định 40mph và chịu tác động của kích thích mặt đường dạng bậc cho bởi $z_r = |z_r| [1 - \cos(\omega_r(t - 0,5))]$ với $0,5 \leq t \leq T + 0,5$ và $z_r = 0$ nếu $t < 0,5$ hoặc $t > T + 0,5$ trong đó $|z_r| = 0,01m$ là nửa chiều cao của mấp mô mặt đường, $\omega_r = 2\pi V / D_r$ là tần số kích thích của mặt đường, $D_r = 5m$ là chiều rộng của mấp mô mặt đường và $V = 40mph$ là vận tốc của ô tô.

Lực điều khiển u_a bị hạn chế trong giới hạn $|u_a| \leq \bar{u} = 2700N$, đây chính là giới hạn lớn nhất của lực giảm chấn tích cực trong [5]. Các hằng số điều khiển của bộ điều khiển đề xuất được lựa chọn như sau: $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,5$, $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 20$, $\beta_1 = 0,1$, ước lượng của ma trận đầu vào $\hat{G} = [0 \ 0,002 \ 0 \ 0,0436]^T$. Điều kiện ban đầu của hệ thống và các hệ con là $x(0) = 0$, $v(0) = 0$, $e_f(0) = 0$.

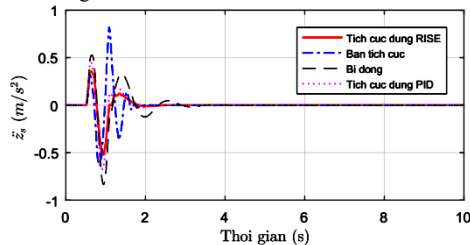
Kết quả điều khiển của bộ điều khiển RISE bão hòa trên hệ thống treo tích cực Macpherson được so sánh với 3 hệ thống treo khác: hệ thống treo bị động, hệ thống treo bán tích cực điều khiển Skyhook cải tiến [5] với các tham số điều khiển $K_1 = 200, K_2 = 20$, và hệ thống treo tích cực điều khiển bằng luật điều khiển PID, trong đó $K_p = 2400, K_i = 100, K_d = 1150$. Các tham số điều

khiển này đều được lựa chọn trong các kết quả điều khiển tốt nhất của các bộ điều khiển tương ứng trong giới hạn đã cho cho lực điều khiển.

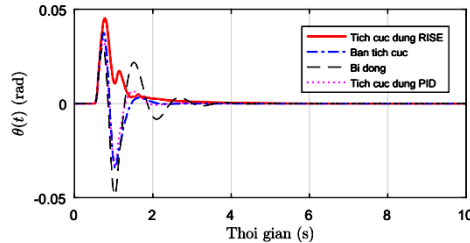
Hình 2 – 6 lần lượt là đồ thị của biên độ dao động, gia tốc dao động thẳng đứng của khối lượng được treo, góc quay của đòn ngang, biến dạng của lò xo và biến dạng của lớp dưới tác động của kích thích bậc.



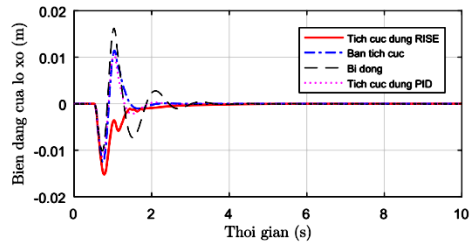
Hình 2. Biên độ dao động thẳng đứng của khối lượng được treo dưới tác động của kích thích bậc.



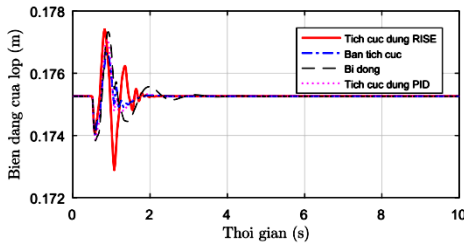
Hình 3. Gia tốc dao động thẳng đứng của khối lượng được treo dưới tác động của kích thích bậc.



Hình 4. Góc quay đòn ngang dưới tác động của kích thích bậc.



Hình 5. Biến dạng của lò xo dưới tác động của kích thích bậc.

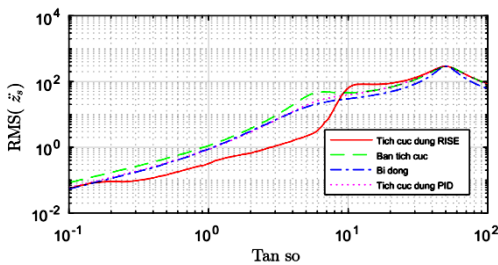


Hình 6. Biên dạng của lòp dưới tác động của kích thích bậc.

Nhận thấy, biên độ dao động và gia tốc dao động của khối lượng được treo của hệ thống treo tích cực sử dụng bộ điều khiển đề xuất dập tắt nhanh hơn và có độ vọt lố nhỏ hơn so với các trường hợp còn lại, như vậy có thể thấy độ êm dịu đã được cải thiện đáng kể khi sử dụng hệ thống treo tích cực điều khiển RISE bão hòa. Trong khi đó, góc quay của đòn quay ngang, biến dạng của lò xo và biến dạng của lòp được giữ trong giới hạn chấp nhận được.

4.2 Kết quả mô phỏng trên miền tần số

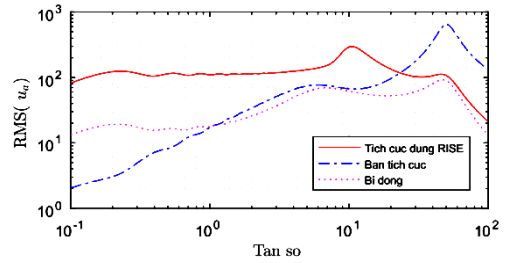
Trong mô phỏng trên miền tần số, kích thích mặt đường được lựa chọn dưới dạng hàm điều hòa hình sin có dải tần số ω thay đổi từ 10^{-1} tới 10^2 , tức $z_r = A \sin(\omega t)$ với ω thay đổi. Thời gian thực hiện mô phỏng đủ lớn để đánh giá sự thay đổi giá trị bình phương trung bình (RMS) của gia tốc dao động thẳng đứng của khối lượng được treo, độ lớn của lực tác động, biến dạng của lò xo và biến dạng của lòp trên các dải tần số khác nhau, kết quả được trình bày trên các hình vẽ từ Hình 7 – Hình 10. Kết quả mô phỏng được tập trung so sánh trên dải tần số từ 4 – 8 Hz vì đây là dải tần số nhạy cảm với cảm nhận của con người và dải tần số > 59Hz, dải tần số gây ra hiện tượng nhảy bánh xe (wheel hop).



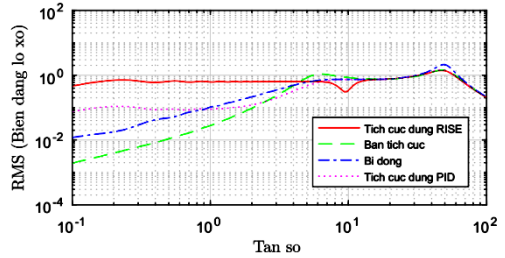
Hình 7. Giá trị bình phương trung bình của gia tốc dao động thay đổi theo tần số.

5 KẾT LUẬN

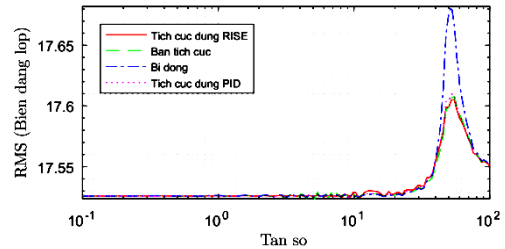
Bài báo đã giới thiệu phương pháp điều khiển RISE bão hòa cho mô hình phi tuyến của hệ thống treo tích cực Macpherson. Với lực điều khiển bị



Hình 8. Giá trị bình phương trung bình của lực điều khiển thay đổi theo tần số.



Hình 9. Giá trị bình phương trung bình của biến dạng lò xo thay đổi theo tần số.



Hình 10. Giá trị bình phương trung bình của biến dạng lòp thay đổi theo tần số.

Nhận thấy, trong dải tần số 4 – 8 Hz, giá trị bình phương trung bình của gia tốc dao động đối với hệ thống treo sử dụng bộ điều khiển RISE bão hòa là nhỏ nhất so với các trường hợp khác, như vậy có thể thấy rõ rệt sự cải thiện về độ êm dịu cho hệ thống treo Macpherson khi sử dụng bộ điều khiển đề xuất. Trong khi đó, biến dạng của lò xo, đây là đại lượng liên quan đến không gian hoạt động của hệ thống treo thì không bị chênh lệch so với các phương pháp còn lại. Thêm vào đó, biến dạng của lòp trong dải tần số lớn hơn 59Hz của trường hợp điều khiển RISE bão hòa nhỏ hơn các trường hợp còn lại, như vậy độ an toàn của xe được đảm bảo. Tuy nhiên, hạn chế là lực điều khiển yêu cầu khá lớn khi so sánh với trường hợp điều khiển PID hay điều khiển Skyhook.

hạn chế trong một giới hạn xác định, gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe đạt được kết quả ổn định tiệm cận theo lý thuyết ổn định Lyapunov dưới tác động kích thích của biên dạng mặt đường. Kết quả mô phỏng được thực hiện trên cả miền thời

gian và miền tần số đã cho thấy sự cải thiện về độ êm dịu của ô tô, bằng việc dao động của thân xe được dập tắt nhanh hơn, biên độ dao động nhỏ hơn khi so sánh với hệ thống treo không có điều khiển, hệ thống treo bán tích cực điều khiển Skyhook và hệ thống treo tích cực điều khiển PID, trong khi đó độ an toàn của xe vẫn được đảm bảo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K.-S. Hong, D.-S. Jeon, W.-S. Yoo, H. Sunwoo, S.-Y. Shin, C.-M. Kim, and B.-S. Park, *A new model and an optimal pole-placement control of the Macpherson suspension system*, SAE Technical Paper, (1999).
- [2] M. Fallah, R. Bhat, and W. Xie, *New model and simulation of Macpherson suspension system for ride control applications*, Veh. Syst. Dyn., vol. 47, no. 2, pp. 195–220, (2009).
- [3] M. H. Shojaeefard, A. Khalkhali, and S. Yarmohammadisatri, *An efficient sensitivity analysis method for modified geometry of Macpherson suspension based on Pearson correlation coefficient*, Veh. Syst. Dyn., vol. 55, no. 6, pp. 827–852, (2017).
- [4] S. Dutta, S.-M. Choi, and S.-B. Choi, *A new adaptive sliding mode control for Macpherson strut suspension system with magneto-rheological damper*, J. Intell. Mater. Syst. Struct., vol. 27, no. 20, pp. 2795–2809, (2016).
- [5] J. K. Hedrick, *Modified skyhook control of semi-active suspensions: A new model, gain*

scheduling, and hardware-in-the-loop tuning, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 124, pp. 158–167, (2002).

- [6] Olugbenga M. Anubi, Carl D. Crane III, W. E. Dixon, *Nonlinear Disturbance Rejection for Semi-active Macpherson Suspension System*, In Proc. ASME 5th Annu. Dyn. Syst. Control Conf., pp. 513-522, (2012).
- [7] N. Fischer, Z. Kan, R. Kamalapurkar, and W. E. Dixon, *Saturated RISE feedback control for a class of second-order nonlinear systems*, *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 59, no. 4, pp. 1094–1099, Apr (2014).



Đinh Thị Thanh Huyền

nhận bằng đại học tại Đại học Khoa Học và Kỹ Thuật năm 2006, nhận bằng thạc sĩ 2010 và tiến sĩ (2012) tại đại học Florida, Gainesville, Hoa Kỳ. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Cơ khí, Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội. Các hướng nghiên cứu chính của tác giả là phát triển các ứng dụng và kiểm soát điều khiển phi tuyến, điều khiển thông minh.

Robust control for Macpherson active suspension using saturated RISE controller

Dinh Thi Thanh Huyen

Abstract—This paper introduces a robust control method for car's Macpherson active suspensions included uncertainties and exogenous disturbances. Based on saturated RISE control methodology, control force is guaranteed to be limited to a priori *limit*. Lyapunov stability analysis is exploited to prove control errors including vertical displacement, velocity and acceleration of the sprung mass asymptotically go to zero, so the ride comfort is

improved. Simulations are performed to show the effectiveness of the proposed method in both time domain and frequency domain in comparison with the active suspension with PID controller, the semi-active suspension with a modified Skyhook control and the passive suspension.

Keywords—RISE control methodology, control force, Macpherson active suspensions.