

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID TRONG HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC Ô TÔ

STUDY ON THE APPLICATION OF PID CONTROLLER IN AUTOMOTIVE SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM

Nguyễn Trọng Hoan, Hoàng Ngọc Sơn

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Hệ thống treo bán tích cực đang được sử dụng ngày càng phổ biến trên ô tô con hiện đại. Để đạt được đồng thời hai mục tiêu là độ êm dịu và an toàn chuyển động, nó cần có cơ chế điều khiển phù hợp. Đã có nhiều công trình nghiên cứu công bố về việc sử dụng các bộ điều khiển khác nhau trên hệ thống treo bán tích cực, trong đó có bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, khả năng ứng dụng của PID trong thực tế vẫn chưa được khẳng định rõ ràng. Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu tính toán lý thuyết nhằm đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển PID trong hệ thống treo bán tích cực.

Từ khóa: *Hệ thống treo thụ động; Hệ thống treo bán tích cực; Bộ điều khiển PID; Độ êm dịu; Hệ số tắt chấn.*

ABSTRACT

Semi-active suspension systems are increasingly being used in modern passenger cars. In order to achieve two goals at the same time: ride comfort and safety, it needs a suitable control. There have been many published studies on the use of different controllers on semi-active suspension systems, including the PID controller. However, the applicability of PID in practice has not been clearly confirmed. The article presents some results of theoretical calculation to evaluate the effectiveness of PID controller in semi-active suspension system.

Keywords: *Passive suspension; Semi-active suspension; PID controller; Ride comfort; Damping coefficient.*

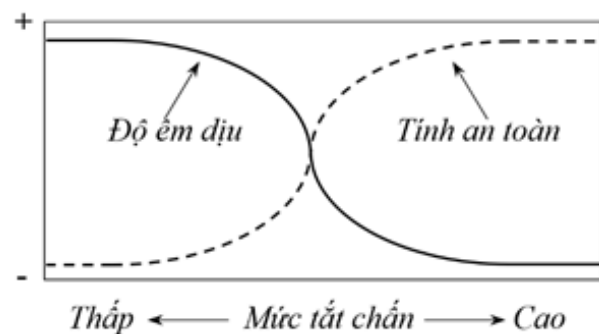


1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống treo thụ động truyền thống, không thể cùng một lúc đạt được cả hai mục tiêu là êm dịu và an toàn. Các kết quả nghiên cứu thể hiện trên hình 1 cho thấy, khi hệ số tắt chấn nhỏ, thì hệ thống treo rất êm dịu, nhưng tính an toàn lại không cao và ngược lại [5].

Ở đây, tính an toàn được thể hiện thông qua độ bám đường của lốp, vì độ bám đường kém làm giảm khả năng truyền lực theo tất cả các phương và các bánh xe phải hoạt động với độ trượt cao.

Khi đó, các tác động điều khiển như tăng tốc, phanh và chuyển hướng đều có hiệu quả thấp. Hơn nữa, sự trượt của bánh xe dẫn đến mất ổn định và hệ quả là mất an toàn.



Hình 1. Mối quan hệ giữa độ êm dịu và tính an toàn

Vì những lý do trên, để có thể đạt được đồng thời cả hai mục tiêu là êm dịu và an toàn, người ta buộc phải sử dụng các hệ thống treo có điều khiển. Trong đó, hệ thống treo bán tích cực (semi-active suspension) được sử dụng rộng rãi hơn cả nhờ có hệ thống điều khiển không quá phức tạp và mức độ sử dụng năng lượng thấp [4].

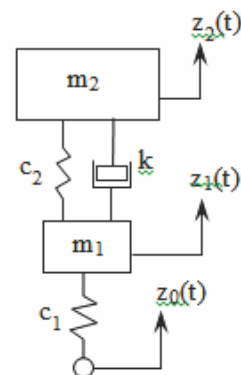
Trên thực tế, việc điều khiển hệ thống treo bán tích cực được thực hiện bằng cách thay

đổi hệ số cản của giảm chấn. Có hai phương pháp thông dụng: thay đổi hệ số cản bằng cách thay đổi diện tích lưu thông (Orifice based Semi-Active Suspension) và bằng cách thay đổi độ nhớt nhờ từ tính (Magnetorheological Fluid based Semi-Active Suspension).

Như vậy, bản chất chung của hệ thống treo bán tích cực là điều khiển thay đổi hệ số cản giảm chấn nhằm đạt được đồng thời tính êm dịu và an toàn. Với quan điểm xây dựng một hệ thống điều khiển đơn giản và hiệu quả, bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng bộ điều khiển PID trên hệ thống treo bán tích cực.

2. MÔ HÌNH DAO ĐỘNG HỆ THỐNG TREO THỤ ĐỘNG (PS)

Để nghiên cứu hệ thống treo có điều khiển (tích cực hoặc bán tích cực) có thể sử dụng mô hình đơn giản với hai khối lượng như trên hình 2. Trong đó, m_1 là khối lượng không được treo, m_2 là khối lượng được treo. Lốp được coi như một bộ phận đàn hồi với độ cứng c_1 . Hệ thống treo được mô tả thông qua phần tử đàn hồi với độ cứng c_2 và giảm chấn với hệ số cản k . Để xác định vị trí của các khối lượng dao động, ta sử dụng các hệ tọa độ z_1 và z_2 . Biên dạng mặt đường được thể hiện qua tọa độ z_0 .



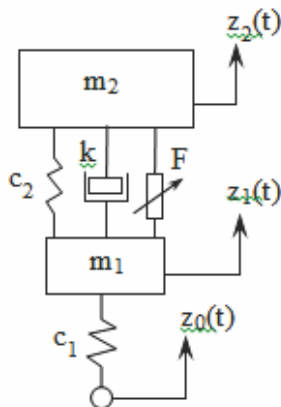
Hình 2. Mô hình hệ thống treo

Hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của các khối lượng có thể được thiết lập bằng nhiều phương pháp khác nhau. Với sơ đồ như trên hình 2, hệ phương trình vi phân được viết như sau:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 &= c_1(z_0 - z_1) - c_2(z_1 - z_2) - k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2 \ddot{z}_2 &= c_2(z_1 - z_2) + k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - F \end{aligned} \quad (1)$$

Các số liệu tính toán cho mô hình động lực học được lấy theo [1]: $m_1 = 59 \text{ kg}$; $m_2 = 338,5 \text{ kg}$; $c_1 = 190000 \text{ N/m}$; $c_2 = 15000 \text{ N/m}$; $k_n = 450 \text{ Ns/m}$; $k_t = 1070 \text{ Ns/m}$.

3. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC (SAS)



Hình 3. Mô hình hệ thống treo bán tích cực

Trong hệ thống treo bán tích cực, lực cản của giảm chấn được thay đổi liên tục bởi bộ điều khiển nhằm đáp ứng tốt nhất cả hai mục tiêu: êm dịu và an toàn. Để mô tả hoạt động của hệ thống, có thể sử dụng các dạng sơ đồ mô phỏng khác nhau. Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp bù lực với sơ đồ như trên hình 3. Dựa trên các thông tin về trạng thái của các khối lượng m_1 và m_2 , bộ điều khiển liên tục điều chỉnh lực F sao cho đạt được các mục tiêu đã đề ra. Với sơ đồ như trên hình 3, hệ phương trình vi phân mô tả hệ thống được viết như sau:

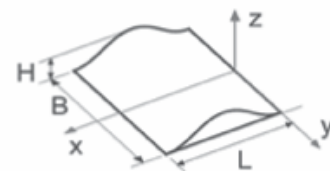
$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 &= c_1(z_0 - z_1) - c_2(z_1 - z_2) - k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + F \\ m_2 \ddot{z}_2 &= c_2(z_1 - z_2) + k(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - F \end{aligned} \quad (2)$$

Để giảm thiểu khả năng tách bánh xe khỏi mặt đường, nên giới hạn $F \leq m_1 g$ [4].

Mấp mô đường

Trong các nghiên cứu về dao động ô tô, kích thích từ mặt đường có thể được mô tả thông qua các dạng mấp mô đơn (dạng sin, chữ nhật, hình thang,...) hoặc mấp mô ngẫu nhiên.

Mấp mô dạng sin (hình 4) thường được sử dụng để mô tả va chạm đột ngột của bánh xe với vật cản trên đường do có kết cấu đơn giản, dễ thực hiện. Hơn nữa, chiều cao của mấp mô tăng dần nên bánh xe có thể lăn qua mấp mô một cách liên tục, tránh được hiện tượng nảy lên khỏi bề mặt tiếp xúc.



Hình 4. Mấp mô dạng sin

Biến thiên chiều cao mấp mô theo trục dọc x được viết dưới dạng:

$$z(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}H \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \right) & \text{khi } 0 < x < L \\ 0 & \text{khi } x \leq 0, x \geq L \end{cases} \quad (3)$$

Để khảo sát hoạt động của hệ thống treo trong điều kiện sát với thực tế, người ta thường sử dụng mấp mô mặt đường dạng ngẫu nhiên.

Theo ISO 8608, mấp mô mặt đường được mô tả thông qua ba thông số cơ bản là tần

số không gian, biên dạng đường và hàm mật độ phổ PSD (Power Spectral Density). Tần số không gian n được tính bằng số chu kỳ trên một mét đường. Biên dạng đường được hiểu là biến thiên chiều cao mấp mô theo trục dọc của đường. PSD là hàm mật độ phổ của chiều cao mấp mô của mặt đường tính theo tần số n :

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (4)$$

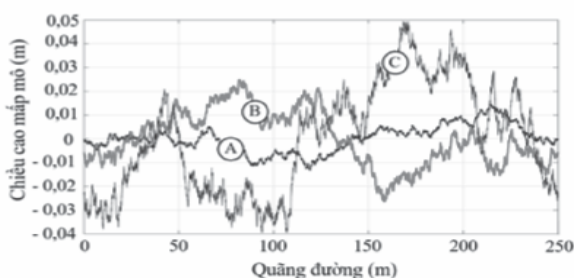
Trong công thức trên, n là tần số không gian (chu kỳ/m), n_0 là giá trị tham chiếu của n (được lấy $n_0 = 0,1$ chu kỳ/m), $G_d(n_0)$ là mật độ phổ ở tần số n_0 . Khi tính toán các loại đường ô tô, chỉ số w thường được chọn bằng 2.

Từ hàm mật độ phổ (4), biến thiên chiều cao mấp mô mặt đường theo trục dọc (x) được mô tả bằng công thức:

$$z(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} \cdot 2^k \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n_0}{i \Delta n} \right) \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \quad (5)$$

Trong đó, φ_i là pha ngẫu nhiên (biến thiên trong khoảng $0, 2\pi$), hệ số k được xác định theo loại đường (được quy định cụ thể trong ISO 8608).

Trong nghiên cứu này đã sử dụng ba loại đường mấp mô ngẫu nhiên (A, B, C) theo ISO 8608 như trên hình 5.



Hình 5. Mấp mô ngẫu nhiên theo ISO 8608

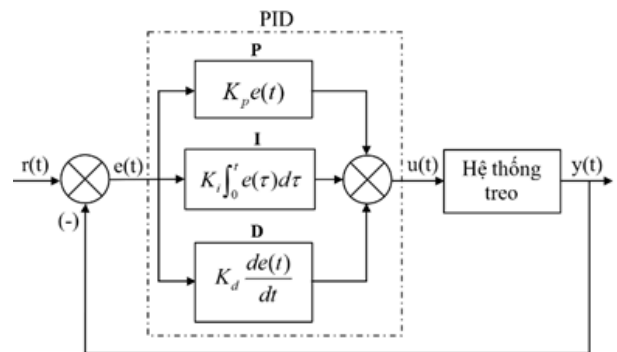
Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID (hình 6) gồm có ba khâu: tỷ lệ (Proportional), tích phân (Integral) và vi phân (Derivative). Phương trình mô tả bộ điều khiển PID có dạng:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

Trong đó, $r(t)$ là ngưỡng cần đạt, $u(t)$ là tín hiệu điều khiển, $e(t)$ là sai lệch điều khiển, $y(t)$ là đáp ứng của hệ thống, K_p là hệ số tỷ lệ, K_i là hệ số tích phân và K_d là hệ số vi phân.

Sơ đồ nguyên lý điều khiển hệ thống treo bán tích cực với PID được thể hiện trên hình 6.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý điều khiển hệ thống treo

Mục tiêu của việc điều khiển là triệt tiêu sai số xác lập, giảm độ quá điều chỉnh, giảm thời gian quá độ và giảm dao động. Để đạt được các mục tiêu trên, cần xác định giá trị của các hệ số K_p , K_i và K_d .

Tiêu chí đánh giá

Như đã trình bày trên đây, hiệu quả của hệ thống treo bán tích cực thể hiện thông qua các tiêu chí đánh giá độ êm dịu và tiêu chí thể hiện độ bám đường. Thông thường, độ êm dịu được đánh giá thông qua các thông số dao động thân xe, như biên độ, vận tốc và gia tốc dao

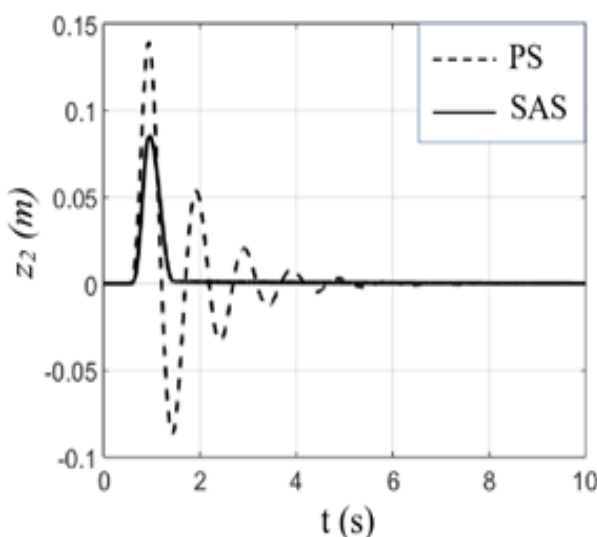
động. Việc đánh giá độ bám đường phức tạp hơn nhiều. Để đánh giá sơ bộ, có thể sử dụng áp lực từ bánh xe lên mặt đường F_N . Với sơ đồ như trên hình 3, ta có:

$$F_N = (m_1 + m_2)g - c_1(z_1 - z_0) \quad (7)$$

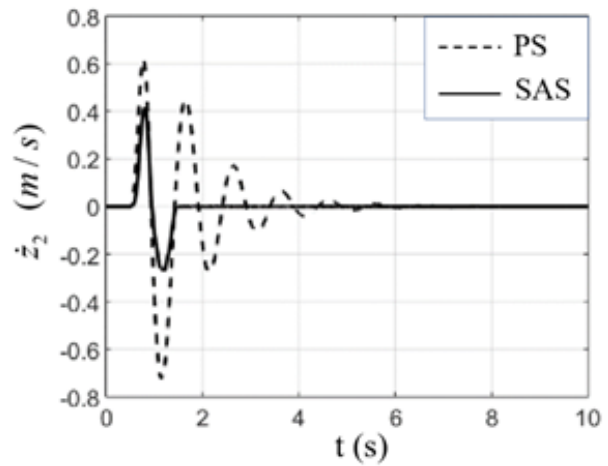
Mối quan hệ trong công thức (7) cho thấy, giảm thiểu $(z_1 - z_0)$ là một trong những giải pháp để tăng độ bám đường của bánh xe [2]. Giải pháp này thường được sử dụng để thiết kế các bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống treo bán tích cực. Tuy nhiên, đây là vấn đề phức tạp, đòi hỏi những nghiên cứu chuyên sâu trong lĩnh vực điều khiển. Với mục tiêu đánh giá về bộ điều khiển PID, trong nghiên cứu này, độ bám đường sẽ được đánh giá trực tiếp bằng các giá trị của lực F_N .

4. KẾT QUẢ VÀ NHẬN XÉT

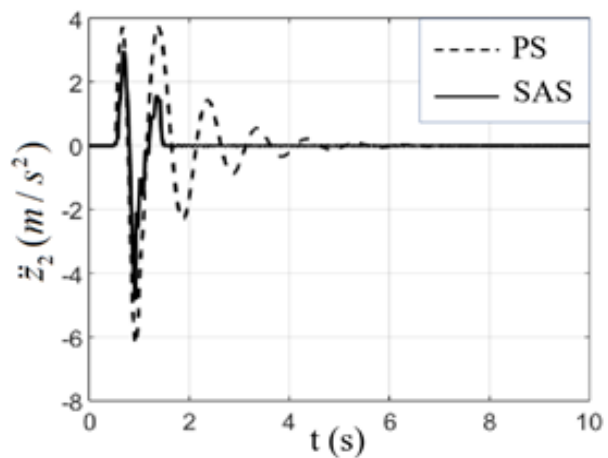
Hệ phương trình vi phân mô tả dao động của hệ thống treo với bộ điều khiển PID được giải cho kích động mặt đường dạng sin với biên độ 0,12 mm và đường ngẫu nhiên theo ISO 8608, gồm các loại A, B, C và D.



Hình 7. Biên độ dao động thân xe



Hình 8. Vận tốc dao động thân xe

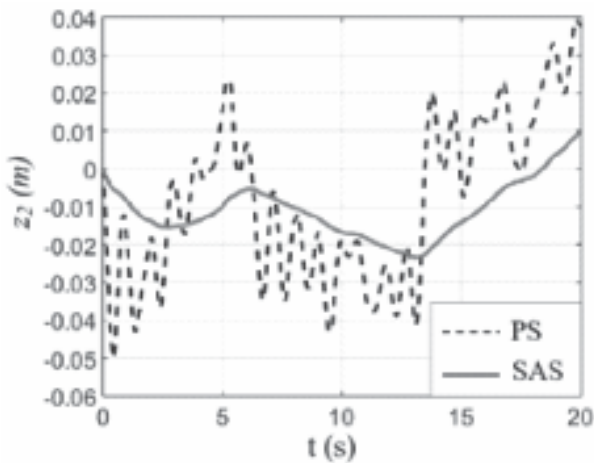


Hình 9. Gia tốc dao động thân xe

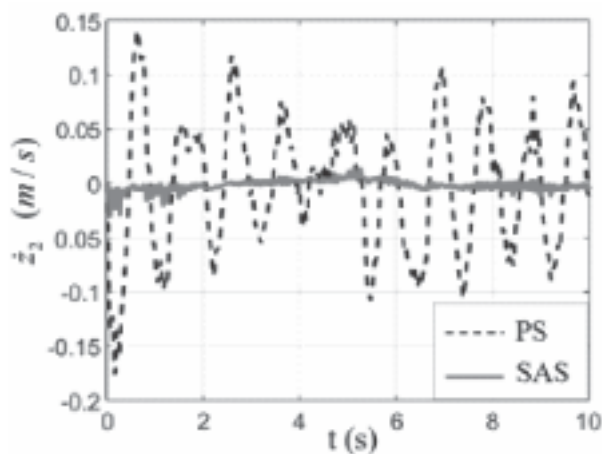
Trên các hình 7 – 9 thể hiện kết quả tính toán cho kích động dạng sin, trong đó đồ thị nét đứt (PS) tương ứng với đặc tính của hệ thống treo phụ thuộc và nét liền (SAS) tương ứng với hệ thống treo bán tích cực.

Có thể nhận thấy rằng, khi hệ thống treo có điều khiển, các thông số dao động của thân xe đều giảm mạnh về biên độ và số lần dao động.

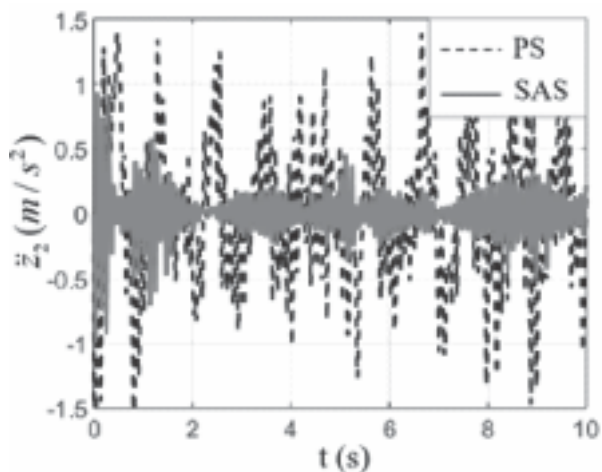
Các kết quả trên cho thấy, hệ thống treo bán tích cực với bộ điều khiển PID có tính êm dịu vượt trội so với hệ thống treo thụ động truyền thống. 



Hình 10. Biên độ dao động thân xe



Hình 11. Vận tốc dao động thân xe



Hình 12. Gia tốc dao động thân xe

Các đồ thị trên các hình 10 – 12 thể hiện kết quả tính toán cho trường hợp ô tô chuyển động với vận tốc 40 km/h, kích động ngẫu nhiên từ đường loại C theo ISO 8608. Cũng tương tự như đối với kích động sin trên đây, hệ thống treo với bộ điều khiển PID đã thể hiện hiệu quả rõ rệt trong việc nâng cao độ êm dịu.

Để so sánh một cách cụ thể hơn hai loại hệ thống treo thụ động (PS) và bán tích cực (SAS), giá trị bình phương trung bình (RMS) của gia tốc thân xe $\ddot{z}_2$ và áp lực mặt đường F_N được thống kê trong bảng 1 (đường loại C, $V_a = 40$ km/h).

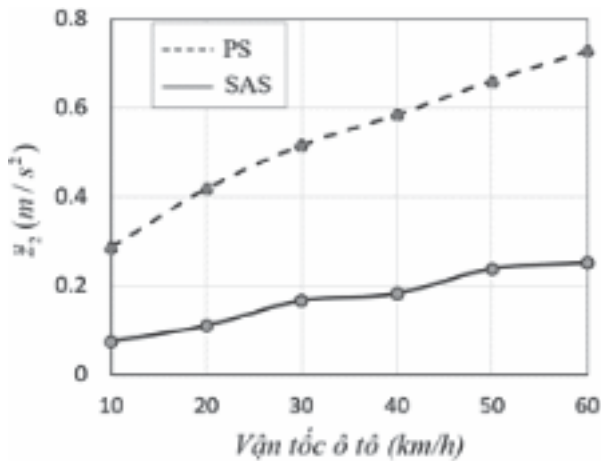
Bảng 1. So sánh hệ các loại hệ thống treo

Loại	$\ddot{z}_2$ (m/s ²)	F_N (N)
Thụ động	0.584	3949
Bán tích cực	0.183	4193
Hiệu quả (%)	68.66	5.82

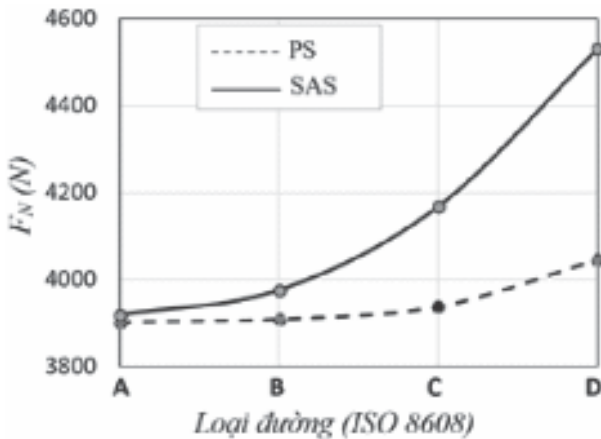
Có thể thấy rằng, nếu như độ êm dịu tăng mạnh nhờ gia tốc thân xe giảm tới hơn 68%, thì áp lực mặt đường được cải thiện không đáng kể, chỉ tăng gần 6%.

Đây chính là hạn chế lớn của bộ điều khiển PID, vì nó không phải là bộ điều khiển tối ưu và chỉ có thể điều chỉnh hệ thống để bám theo một đặc tính chọn trước. Trong nghiên cứu này, tín hiệu đầu vào của bộ điều khiển được chọn là gia tốc thân xe. Vì vậy, hiệu quả của nó thể hiện vượt trội ở các thông số đặc trưng cho độ êm dịu (gia tốc, vận tốc, dịch chuyển).

Để đánh giá một cách toàn diện hơn về bộ điều khiển PID trong hệ thống treo bán tích cực, các tính toán khảo sát đã được thực hiện cho các loại đường A, B, C và D theo ISO 8608 với vận tốc chuyển động biến thiên từ 10 đến 60 km/h. Kết quả tính toán được thể hiện trên các hình 13 và 14.



Hình 13. Gia tốc dao động thân xe.
Đường loại C (ISO 8608).



Hình 14. Áp lực lên mặt đường. $V = 30$ km/h.

Các kết quả trên cho thấy bộ điều khiển PID phát huy hiệu quả trong mọi điều kiện chuyển động. Trong đó, khả năng cải thiện độ êm dịu có xu hướng tăng theo vận tốc chuyển động của ô tô trên cùng một loại đường. Trên các loại đường khác nhau, bình phương trung bình của áp lực lên mặt đường tăng theo độ xấu của đường (theo thứ tự A, B, C, D) như trên hình 14.

5. KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu trình bày trong bài báo cho thấy hiệu quả và những hạn chế của

bộ điều khiển PID trong hệ thống treo bán tích cực của ô tô. Có thể thấy rõ ràng, bộ điều khiển PID không thể tối ưu hóa đặc tính làm việc của hệ thống treo. Mặc dù phát huy tốt hiệu quả trong việc nâng cao độ êm dịu, PID không giúp cải thiện nhiều về mặt an toàn (nâng cao độ bám đường). Để có được một hệ thống treo bán tích cực thật sự hiệu quả, cần nghiên cứu cải thiện bộ điều khiển PID theo hướng kết hợp với các cơ chế điều khiển khác, hoặc sử dụng các bộ điều khiển tối ưu. ❖

Ngày nhận bài: 08/5/2022

Ngày phản biện: 27/5/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita Marius Giuclea; *Semi-active Suspension Control*. Springer, 2008.
- [2]. S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, L. Dugard; *Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles*. Elsevier, 2010.
- [3]. K.Dhananjay Rao; *Modeling, Simulation and Control of Semi Active Suspension System for Automobiles under MATLAB Simulink using PID Controller*. Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems. March 13-15, 2014. Kanpur, India.
- [4]. Guoqiang Chen, Shaobin Lv and Jun Dai; *Study on PID control of vehicle semi – active suspension based on genetic algorithm*. International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 15, Number 3, June 2019.
- [5]. Nikhil Desai, Bharatbhushan Kale; *A review work on suspension systems models, control strategies for suspension system*. JETIR (ISSN-2349-5162), October 2016, Volume 3.

