

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀO HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC NHẪM NÂNG CAO ĐỘ ÊM DỊU CỦA Ô TÔ

RESEARCH ON THE APPLICATION OF PID CONTROLLER IN SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM TO IMPROVE THE RIDE COMFORT OF THE VEHICLE

Lê Bảo Việt¹, Nguyễn Tiến Dũng^{1,*}, Vũ Đình Hoan¹,
Nguyễn Đình Dương¹, Trương Văn Thuận²

¹Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Khoa Kỹ thuật Ô tô và Năng lượng, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

*Email: dung.nguyentien@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu về ứng dụng của bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) vào hệ thống treo bán tích cực với mục đích cải thiện hiệu suất dao động của ô tô. Hệ thống treo bán tích cực được trình bày trong nghiên cứu này có thể thay đổi lực cản của phần tử giảm chấn bằng cách thay đổi cường độ từ trường xuyên qua nó. Một mô hình dao động một phần tư xe đã được xây dựng để mô phỏng dao động theo phương thẳng đứng của ô tô khi đi trên đường. Nghiên cứu đã tiến hành áp dụng bộ điều khiển PID để điều khiển lực cản giảm chấn nhằm cải thiện độ êm dịu cho xe khi di chuyển. Nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng, đánh giá dao động của xe khi di chuyển với điều kiện mấp mô mặt đường loại B-C theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016. Kết quả thu được khi mô phỏng dao động với hệ thống treo không có điều khiển sẽ được mang đi so sánh với hệ thống treo có điều khiển. Kết quả chứng minh rằng hệ thống treo bán tích cực được điều khiển bằng bộ điều khiển PID có vận tốc, gia tốc và chuyển vị của thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt khi so sánh với hệ thống treo thụ động trong cùng điều kiện vận hành. Nghiên cứu này xác nhận hiệu quả của phương pháp điều khiển PID trong việc cải thiện chất lượng lái xe và đặt nền tảng cho việc phát triển thêm các thuật toán điều khiển tiên tiến cho hệ thống treo xe.

Từ khóa: Hệ thống treo bán tích cực; Bộ điều khiển PID; Hệ thống treo thụ động.

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller to a semi-active suspension system to improve the vibration performance of the car. The semi-active suspension system presented in this study can change the resistance of the damper element by changing the magnetic field intensity through it. A quarter-vehicle vibration model was built to simulate the vertical vibration of the car when traveling on the road. The study applied PID controller to control the damper resistance to improve the smoothness of the car when moving. The authors simulated and evaluated the vibration of the car when moving on the bumpy road surface type B-C according to ISO 8608:2016 standard. The results obtained when simulating vibration

with the uncontrolled suspension system will be compared with the controlled suspension system. The results demonstrate that the semi-active suspension system controlled by a PID controller has significantly improved vehicle velocity, acceleration, and vertical displacement when compared with the passive suspension system under the same operating conditions. This study confirms the effectiveness of the PID control method in improving the ride quality and lays the foundation for further development of advanced control algorithms for vehicle suspension systems.

Keywords: *Semi-active suspension systems; PID controller; Passive suspension.*

1. TỔNG QUAN

Hệ thống treo đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ êm dịu, độ ổn định và khả năng điều khiển của xe trong quá trình vận hành. Hệ thống treo không chỉ giúp đảm bảo êm dịu mà còn ảnh hưởng rất lớn đến tính ổn định của xe khi chuyển làn đường cũng như khả năng tương tác giữa bánh xe và mặt đường [1]. Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống treo thông minh như hệ thống treo bán tích cực (semi-active suspension) đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong lĩnh vực kỹ thuật ô tô. Khác với hệ thống treo thụ động truyền thống, hệ thống treo bán tích cực cho phép điều chỉnh hệ số cản giảm chấn một cách linh hoạt tùy theo điều kiện mặt đường và trạng thái vận hành của xe, từ đó cải thiện đáng kể khả năng giảm rung và độ ổn định thân xe [2].

Một trong những phương pháp điều khiển được áp dụng rộng rãi trong việc điều khiển hệ thống treo là bộ điều khiển PID (Proportional – Integral – Derivative). Đây là một phương pháp đạt hiệu quả cao nhờ vào cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và có khả năng hiệu chỉnh thông số linh hoạt. Bộ điều khiển PID giảm thiểu dao động và lực tác dụng lên thân xe, qua đó nâng cao độ êm dịu của xe mà không làm ảnh hưởng đến độ ổn định [3].

Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao

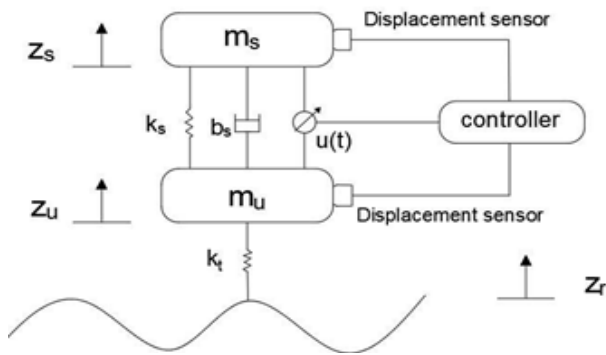
về chất lượng vận hành và sự thoải mái cho người sử dụng, các nhà sản xuất ô tô đang không ngừng cải tiến hệ thống treo thông qua các thuật toán điều khiển hiện đại [4]. Tuy nhiên, chi phí và tính phức tạp của hệ thống treo tích cực hoàn toàn (active suspension) khiến hệ thống bán tích cực trở thành lựa chọn tối ưu về mặt hiệu quả chi phí và kỹ thuật [5]. Do đó, việc nghiên cứu và ứng dụng các bộ điều khiển như PID trong hệ thống treo bán tích cực là hướng đi phù hợp, đáp ứng cả yêu cầu kỹ thuật và kinh tế trong thực tế sản xuất và sử dụng xe.

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng một mô hình hệ thống treo bán tích cực sử dụng bộ điều khiển PID để đánh giá khả năng cải thiện độ êm dịu của xe thông qua mô phỏng trên nền tảng mô phỏng số. Kết quả thu được sẽ được so sánh với hệ thống treo thụ động nhằm làm rõ hiệu quả của giải pháp điều khiển được đề xuất.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH DAO ĐỘNG CỦA XE

Nghiên cứu này đã tiến hành xây dựng một mô hình dao động $\frac{1}{4}$ xe để mô phỏng và đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển. Do đặc điểm đơn giản và dễ mô phỏng nên mô hình $\frac{1}{4}$ xe cho phép đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển một cách trực quan và chính xác.





Hình 1. Mô hình hệ thống treo bán tích cực 1/4

Trong hình 1 là mô hình dao động 1/4 xe, trong đó: khối lượng được treo ký hiệu là m_s ; trong trường hợp này, m_s sẽ bằng 1/4 tổng khối lượng thân xe. Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe được biểu thị bằng z_s . Khối lượng không treo được ký hiệu là m_u , đại diện cho khối lượng của bánh xe và các cơ cấu lắp trên bánh xe. Chuyển vị theo phương thẳng đứng của khối lượng không được treo được ký hiệu là z_u . Hệ thống treo được mô hình hóa bằng cách sử dụng tổ hợp lò xo và giảm chấn độ cứng của lò xo và hệ số cản giảm chấn được ký hiệu lần lượt là k_s và b_s . Biên dạng đường đường được ký hiệu là z_r . Lốp có độ cứng nhưng khả năng giảm chấn rất nhỏ và được coi bằng 0, độ cứng của lốp được ký hiệu là k_t ; $u(t)$ là lực điều khiển của hệ thống treo, lực này được bộ điều khiển đưa ra. Bộ giảm chấn MR bao gồm, lực ma sát và lực giảm chấn có thể điều khiển được, được biểu thị bằng $u(t)$.

Dựa vào định luật Newton – Euler và mô hình ở hình 1, các phương trình vi phân mô tả dao động của xe được biểu diễn như sau:

$$m_s \ddot{z}_s = k_s(z_u - z_s) + b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + u \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -k_s(z_u - z_s) - b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_t(z_r - z_u) - u \quad (2)$$

Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn

phương pháp mô hình hóa không gian trạng thái để biểu diễn động học hệ thống. Phương pháp này cho phép chuyển đổi các phương trình vi phân bậc hai thành hệ phương trình vi phân bậc nhất, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho việc phân tích và tổng hợp điều khiển. Mô hình không gian trạng thái đã được chứng minh là hiệu quả và được sử dụng phổ biến trong nhiều nghiên cứu quốc tế. Việc lựa chọn các biến trạng thái phụ thuộc vào mục tiêu thiết kế và cách tiếp cận của người thực hiện. Các biến này cần thể hiện được các đặc trưng động lực học quan trọng của hệ thống cũng như đáp ứng yêu cầu quan sát hoặc điều khiển. Trong nghiên cứu này, các biến trong phương trình vi phân mô tả hệ thống treo được chọn lọc và tổ chức thành vectơ trạng thái một cách hợp lý nhằm đảm bảo mô hình hóa chính xác hành vi của hệ thống. Từ các phương trình (1) và (2), mô hình không gian trạng thái của hệ thống có thể được biểu diễn dưới dạng tổng quát như sau:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot u(t) + L \cdot z_r(t) \quad (3)$$

Trong đó, A là ma trận hệ số không đổi $n \times n$ và n bằng số trạng thái; B và L là vectơ $n \times 1$ hệ số không đổi; $X(t)$ là trạng thái và là vectơ $n \times 1$; $u(t)$ là lực điều khiển, là đầu vào giá trị vô hướng; $z_r(t)$ là mặt cắt đường là giá trị vô hướng. Phương trình (3) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \ddot{z}_s \\ \dot{z}_u \\ \ddot{z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{-k_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{k_s}{m_u} & \frac{-k_t - k_s}{m_u} & \frac{-k_s}{m_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{-1}{m_u} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{m_u} \end{bmatrix} z_r(t) \quad (4)$$

3. KÍCH THƯỚC MÁP MÔ MẶT ĐƯỜNG

ISO 8608: 2016 là tiêu chuẩn được sử

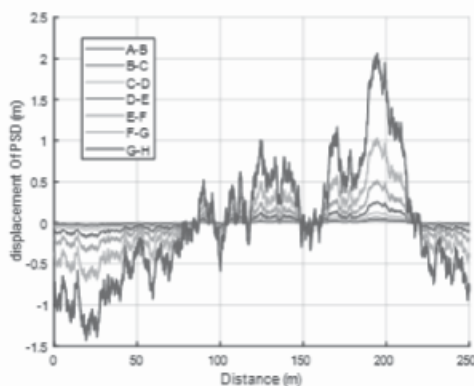
dụng phổ biến nhất hiện nay trong các tính toán động lực học ô tô. Tiêu chuẩn này phân biệt các dạng đường theo mật độ phổ công suất (PSD) và chia chúng thành 8 loại với ký hiệu quy ước từ A đến H [6].

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

Công thức (5) cho phép tính toán và vẽ đồ thị mô tả chiều cao mấp mô mặt đường theo dịch chuyển x. Hàm h(x) sẽ được sử dụng làm hàm kích thích trong mô hình chuyển động tổng quát của ô tô với các loại đường khác nhau. Nếu coi ô tô chuyển động đều với vận tốc v thì biểu thức tính độ cao mấp mô theo biến x có thể viết lại theo biến thời gian t như sau:

$$h(t) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} \cdot 2^k \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n_0}{i \Delta n} \right) \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot V \cdot t + \varphi_i) \quad (6)$$

Mấp mô bề mặt của các loại đường theo ISO 8608:2016 được thể hiện trên 1 khoảng chiều dài 200m trên hình 2. Trong nghiên cứu này, 4 loại đường theo ISO 8608:2016 đã được thử nghiệm, bao gồm: loại đường B-C (đường tốt), đường C-D (đường trung bình), đường D-E (đường xấu) và đường E-F (đường rất xấu) được khảo sát.



Hình 2. Mấp mô mặt đường theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID

Mục tiêu của hệ thống điều khiển là xác định lực giảm chấn tối ưu trong giới hạn làm việc của bộ giảm chấn từ (MR), nhằm cải thiện hiệu suất giảm dao động cho khối lượng được treo. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả áp dụng bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative), một phương pháp điều khiển cổ điển phổ biến với cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và có khả năng đáp ứng tốt với nhiều điều kiện vận hành.

Bộ điều khiển PID hoạt động dựa trên ba thành phần: thành phần tỷ lệ (P) phản ứng nhanh với sai lệch tức thời, thành phần tích phân (I) giúp loại bỏ sai lệch ổn định, và thành phần vi phân (D) cải thiện phản ứng nhanh và giảm dao động. Tín hiệu điều khiển được tính theo biểu thức:

$$u(t) = -K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Trong đó, $e(t)$ là sai số giữa đầu vào mong muốn và phản hồi hệ thống, K_p , K_i , K_d lần lượt là hệ số khuếch đại của các thành phần P, I, và D. Quá trình điều chỉnh các thông số PID (K_p , K_i , K_d) đóng vai trò then chốt trong việc đạt được hiệu năng tối ưu của hệ thống điều khiển. Các hệ số này được tinh chỉnh thông qua mô phỏng, nhằm đảm bảo hệ thống đạt được các mục tiêu về độ ổn định, thời gian quá độ, và mức độ giảm rung của khối lượng được treo.

Trong nghiên cứu này, hệ thống treo được tuyến tính hóa tại từng vùng vận tốc làm việc. Ở mỗi vùng, bộ điều khiển PID được điều chỉnh để phù hợp với đặc tính động học của hệ thống tương ứng. Việc lựa chọn giá trị PID được thực hiện bằng phương pháp thử nghiệm thông qua mô phỏng trên môi trường MATLAB/Simulink. Các tiêu chí như giảm thiểu biên độ

dao động, rút ngắn thời gian quá độ, và giới hạn độ vọt lố được sử dụng để đánh giá hiệu quả điều khiển. Các thông số của hệ thống dùng trong mô phỏng được trình bày trong bảng 1.

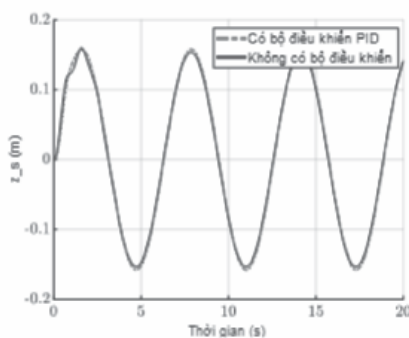
Bảng 1. Thông số của bộ điều khiển PID

Control variable	K_p	K_i	K_d
$Z - \zeta_l$	-28.3762	53802.3547	3435.782
$\ddot{z}$	126.2147	2667.58116019004	0

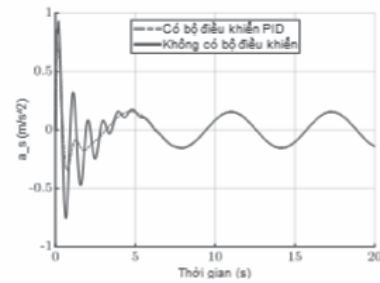
Sau khi xác định xong thông số đầu vào của bộ điều khiển PID, nhóm tác giả tiến hành chạy chương trình mô phỏng hệ thống treo $\frac{1}{4}$ với thông số đầu vào: m_s bằng 450 kg, m_u bằng 48 kg, k_s bằng 26500 N.m, k_t bằng 175000 N.m và b_s bằng 1200 N.s/m.

5. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

Nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng hoạt động của hệ thống treo bán tích cực trên phần mềm mô phỏng số, đồng thời nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát và so sánh chất lượng dao động của hai hệ thống treo thụ động thông thường và treo bán tích cực trên các loại mặt đường khác nhau như: đường mấp mô hình sin, đường loại B-C theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016, với vận tốc di chuyển của xe là 40 (km/h).



(a)

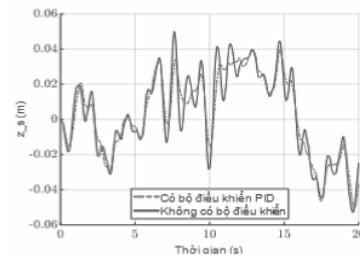


(b)

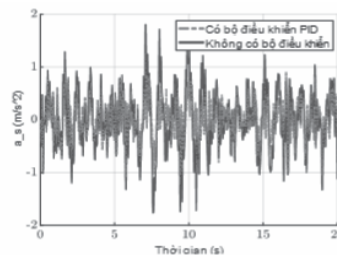
Hình 3. Dao động của ô tô khi di chuyển trên mặt đường mấp mô hình Sin:

- a) Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe,
b) Gia tốc theo phương thẳng đứng của thân xe

Kết quả trên hình 3 cho thấy khi đi trên mặt đường mấp mô hình sin có chiều cao mấp mô là 0.08 m thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển LQR cho thấy dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện, đặc biệt là với phần gia tốc thân xe, ở 5 giây đầu của mô phỏng gia tốc thân xe đã được cải thiện rõ rệt.



(a)



(b)

Hình 4. Dao động của ô tô khi di chuyển trên mặt đường mấp mô dạng B-C:

- a) Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe,
b) Gia tốc theo phương thẳng đứng của thân xe

Kết quả trên hình 4 cho thấy khi đi trên mặt đường mấp mô dạng B-C thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển PID cho thấy biên độ dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt, cho phép nhóm tác giả có cơ sở để triển khai các nghiên cứu tiếp theo. Ở giây thứ 10 trong kết quả mô phỏng hình 4a cho thấy cả biên độ dao động và gia tốc đều có sự cải thiện rõ rệt (khoảng 15%) so với hệ thống treo thường.

6. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình động lực học cho hệ thống treo một phần tư (1/4 xe) và triển khai thành công bộ điều khiển PID để điều khiển lực giảm chấn của hệ thống treo bán chủ động sử dụng giảm chấn từ (MR). Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển PID có khả năng cải thiện đáng kể độ êm dịu và chất lượng dao động của xe so với hệ thống treo thụ động truyền thống. Các thông số điều khiển có thể được hiệu chỉnh linh hoạt để đáp ứng các tiêu chí hiệu suất khác nhau trong từng điều kiện vận hành cụ thể. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng để nhóm tác giả tiếp tục phát triển và tối ưu hóa các phương pháp điều khiển hệ thống treo bán chủ động trong các nghiên cứu tiếp theo. Đồng thời, đây cũng là tiền đề để áp dụng bộ điều khiển PID trong các hệ thống thực tế, hướng tới việc nâng cao chất lượng vận hành và độ thoải mái cho hành khách trên các phương tiện giao thông hiện đại. ❖

Ngày nhận bài: 20/5/2025

Ngày phản biện: 05/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Tiến Dũng, Lê Bảo Việt, Trần Đình Tuấn, Dương Ngọc Khánh, “Nghiên cứu ổn định quỹ đạo chuyển động của ô tô điện cỡ nhỏ khi chuyển làn đường”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, ISSN 2815-5505, số 316, tháng 6 năm 2024.
- [2]. Lê Bảo Việt, Nguyễn Tiến Dũng, Trịnh Minh Hoàng, “Nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển LQR vào hệ thống treo bán tích cực”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, ISSN 2815-5505, số 316, tháng 6 năm 2024.
- [3]. Behnam Riazi, 2021, “Design and Investigation of a Semi-Active Suspension System in Automotive Applications”. Doctoral thesis, University of Windsor, Canada.
- [4]. Nguyen Tien Dung, Bui Van Cuong, Le Van Quynh, Ngo Van Dung, Vu Tran Hoang, “Evaluation of ride performance of PID controller in active suspension systems for an electric vehicle”. 71st International Conference on Vibroengineering in Riga, Latvia, December 12-13 (2024).
- [5]. Nguyen Tien Dung, Bui Van Cuong, Le Van Quynh, Hoang Anh Tan, “Optimization of electric vehicle suspension parameters using improved artificial fish swarm algorithm”. Journal of Military Science and Technology, 10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.191-197 (2024).
- [6]. Tiêu chuẩn ISO 8608:2016.