

PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ THỐNG TREO CHỦ ĐỘNG CHO MÔ HÌNH 1/4 XE SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ LQR

DYNAMIC ANALYSIS OF ACTIVE SUSSPENTION SYSTEM FOR 1/4 MODEL VEHICLE USING PID AND LQR CONTROLLER

VŨ HẢI QUÂN^{1*}, NGUYỄN ANH NGỌC¹, NGUYỄN HUY TRƯỜNG²

¹Khoa Công nghệ ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Viện Kỹ thuật Cơ giới quân sự, Bộ Quốc phòng

*Email liên hệ: quanvh@hau.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng hiệu suất làm việc của hệ thống treo chủ động cho mô hình 1/4 xe sử dụng bộ điều khiển tuyến tính (LQR) và kiểm soát tỉ lệ phân đạo hàm theo tỉ lệ (PID). Mô hình nghiên cứu được sử dụng là mô hình tuyến tính. Kết quả mô phỏng cho phép khảo sát các thông số động lực học của hệ thống treo bao gồm: Dịch chuyển thân xe; Gia tốc thân xe; Độ dịch chuyển bánh xe; Hành trình treo của hệ thống. Bài báo sử dụng hai loại biên dạng mặt đường để khảo sát kết hợp với hai thuật toán điều khiển để mô phỏng và so sánh. Thông qua việc xây dựng các mô hình toán học và ứng dụng phần mềm MATLAB/SIMULINK để khảo sát, kết quả bài báo cho thấy việc ứng dụng các thuật toán điều khiển LQR, PID vào hệ thống treo chủ động cho phép giảm 2-3 lần thời gian dập tắt dao động, biên độ dao động phần khối lượng được treo của cả 2 thuật toán đều tốt hơn so với hệ thống treo bị động.

Từ khóa: Mô hình một phần tư xe, hệ thống treo chủ động, LQR, PID.

Abstract

This paper presents the results of simulating the performance of the active suspension system for the 1/4 vehicle model using a linear controller (LQR) and proportional derivative control (PID). The linear model is used for the research. Simulation results allow to evaluate the dynamic parameters of the suspension system such as: Body displacement; Body acceleration; Wheel displacement; Suspension travel. Two types of road profiles are applied for survey and compare, in combination with two control algorithms in simulation. Through the construction of mathematical models and application of MATLAB/SIMULINK software for simulation, the

results of the article show that with LQR and PID control algorithms applied for the active suspension system will allow reducing 2-3 times the time to extinguish the oscillation of the suspension system.

Keywords: Quarter of a vehicle, active suspension system, LQR, PID.

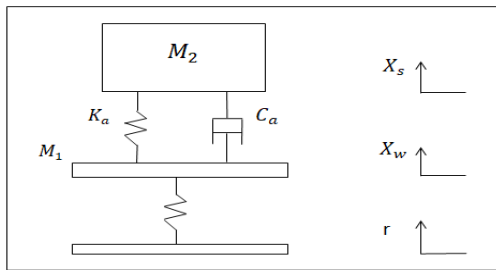
1. Đặt vấn đề

Ô tô là một hệ dao động nằm trong môi liên hệ chặt chẽ với đường có biên dạng phức tạp. Dao động của ô tô không những ảnh hưởng đến con người, hàng hóa chuyên chở, độ bền của các cụm tổng thành. Những dao động này sẽ gây ảnh hưởng xấu đến xe và đặc biệt là cảm giác của người lái. Chính vì vậy hệ thống treo được ra đời để giải quyết các vấn đề về độ êm dịu chuyển động và an toàn chuyển động của ô tô. Nếu với hệ thống treo thụ động chỉ đáp ứng được với các cung đường nhất định. Hệ thống treo thông thường bao gồm một lò xo, giảm xóc thủy lực, thanh xoắn, còn được gọi là hệ thống treo bị động. Một trong những hướng phát triển chính mà các hãng xe hơi lớn đang hướng tới hiện nay là thiết kế hệ thống treo chủ động. Thuật ngữ "chủ động" có thể hiểu là một hệ thống treo, trong đó các thông số làm việc có thể được thay đổi trong quá trình hoạt động. Bộ điều khiển điện tử có chức năng xác định và điều khiển cơ cấu chấp hành giúp cho xe duy trì tính năng êm dịu và ổn định trên nhiều dạng địa hình vận hành khác nhau.

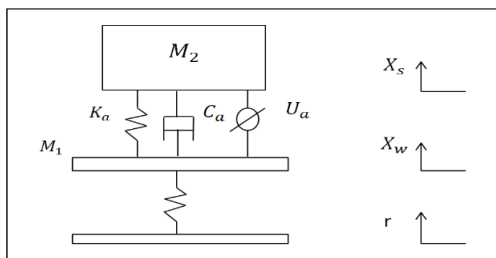
Việc xây dựng những phương pháp để điều khiển hệ thống treo chủ động là yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu suất làm việc của hệ thống. Với phương pháp kiểm soát chính xác sẽ cung cấp tốt hơn sự thỏa hiệp giữa cảm giác thoải mái khi ngồi trên xe và tính năng ổn định của xe khi di chuyển trên đường. Ngày nay có rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để nâng cao hiệu suất của hệ thống treo tốt hơn bằng cách đưa ra phương pháp kiểm soát phù hợp [1, 2, 3]. Trong hầu

hết các nghiên cứu đã được thực hiện, một mô hình tuyến tính được sử dụng giả định. Mô hình tuyến tính cho phép dễ dàng mô tả và xác định được những thông số cơ bản động lực học của một chiếc xe thực tế. Việc áp dụng phương pháp điều khiển LQR cho hệ thống treo chủ động đã được đề xuất trong mô hình một phần tư xe [3] và cho một mô hình toàn xe. Phương pháp điều khiển LQR được sử dụng để có thể cải thiện việc xử lý xe và tạo ra sự thoải mái khi ngồi trên xe [4].

2. Xây dựng mô hình động lực học



a) Treo bị động



b) Treo chủ động

Hình 1. Mô hình một phần tư xe của hệ thống treo

M1: Khối lượng của bánh xe/khối lượng không được treo (kg);

M2: Khối lượng thân xe/khối lượng treo (kg);

r: Trạng thái mặt đường;

Xw: Dịch chuyển bánh xe (m);

X: Dịch chuyển thân xe (m);

Ka: Độ cứng của lò xo thân xe (N/m);

Kt: Độ cứng của lốp (N/m);

Ca: Hệ số của giảm chấn (N/m);

Ua: Cơ cấu tạo lực (N).

Mô hình động học của hệ thống này được chia thành hai loại. Mô hình đầu tiên được xác định trong miền thời gian, để thực hiện mô hình hóa chiến lược của hệ thống kiểm soát LQR phải được đại diện trong mô hình không gian. Mô hình động lực học biểu diễn trong miền không gian trạng thái được tham khảo tài liệu [4]. Trên Hình 1 trình bày sơ đồ động học của hệ thống treo cho mô hình một phần tư xe.

3. Thiết kế bộ điều khiển

a, Mô hình động học Hình 1, có thể được chia

thành 2 phần chính như sau:

Tại M1,

$$F = M_a - K_t(X_w - r) - K_a(X_w - X_s) \tag{1}$$

$$-C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) - U_a = M_1 \ddot{X}_w$$

$$\ddot{X}_w = \frac{-K_t(X_w - r) - K_a(X_w - X_s) - C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) - U_a}{M_1}$$

Tại M2,

$$F = M_a - K_a(X_s - X_w) \tag{2}$$

$$-C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) + U_a = M_2 \ddot{X}_s$$

$$\ddot{X}_s = \frac{-K_a(X_w - X_s) - C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) + U_a}{M_2}$$

Các biến đổi trạng thái được thiết lập trong phương trình có thể được viết như sau:

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + B_u(t) + f(t)$$

Trong đó:

$$\dot{X}_1 = \dot{X}_s - \dot{X}_w \approx X_2 - X_4$$

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_s$$

$$\dot{X}_3 = \dot{X}_w - \dot{r} \approx X_4 - \dot{r}$$

$$\dot{X}_4 = \dot{X}_w$$

Viết lại phương trình ở ma trận dạng hiệu suất.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^1 \\ \dot{X}^2 \\ \dot{X}^3 \\ \dot{X}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{-K_a}{M_2} & \frac{-C_a}{M_2} & 0 & \frac{C_a}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_a}{M_1} & \frac{C_a}{M_1} & \frac{-K_t}{M_1} & \frac{-C_a}{M_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ X^3 \\ X^4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_2} \\ 0 \\ \frac{-1}{M_1} \end{bmatrix} U_a +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{r}$$

Cách tiếp cận thứ hai của mô hình là áp dụng phương pháp điều khiển PID [5]. Phương trình toán học cho hệ thống có thể chia thành hai phần chính như sau:

Tại M1,

$$\left[M_1 s^2 + C_a s + K_a + K_t \right] X_w(s) - [C_a s + K_a] X_s(s) = K_t r(s) \tag{3}$$

Tại M2,

$$\left[M_2 s^2 + C_a s + K_a \right] X_w(s) - [C_a s + K_a] X_s(s) = 0 \tag{4}$$

b, Bộ điều khiển PID

Cách tiếp cận thứ hai của mô hình là thực hiện phương pháp điều khiển PID. PID một bộ điều khiển tích phân tỷ lệ (bộ điều khiển PID- Proportional Integral Derivative) là một cơ chế phản hồi vòng điều khiển (bộ điều khiển) tổng quát được sử dụng rộng rãi

trong các hệ thống điều khiển công nghiệp - Bộ điều khiển PID là bộ điều khiển được sử dụng nhiều nhất trong các bộ điều khiển phản hồi và chỉ áp dụng cho hệ SISO theo nguyên lý hồi tiếp. Phương trình điều khiển thuật toán PID được tham khảo [5].

$$U(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \quad (5)$$

4. Mô phỏng hệ thống treo

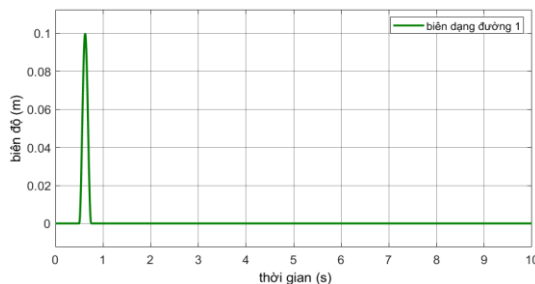
4.1. Thông số mô phỏng

Bộ thông số cho mô hình 1/4 xe của hệ thống treo chủ động được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số cho một phần tư xe [6]

Khối lượng được treo	M1=290kg
Khối lượng không được treo	M2=59kg
Độ cứng của lò xo	Ka=16812N/m
Độ cứng của lốp	Kt=190000N/m
Hệ số đàn hồi của giảm chấn	Ca=1000N/m

4.2. Kết quả



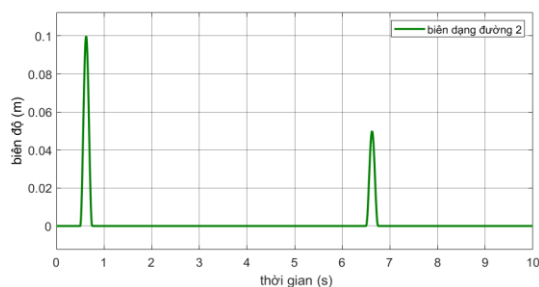
Hình 2. biên dạng đường 1

Biên dạng bề mặt đường 1 với một vị trí mấp mô:

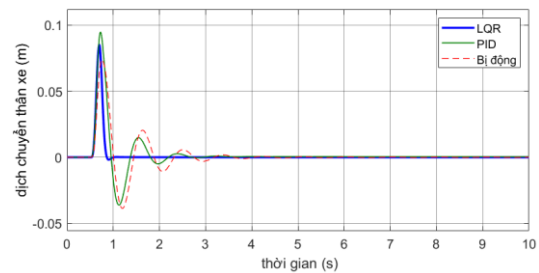
$$r(t) = \begin{cases} a(1 - \cos 8\pi t) & 0.5s \leq t \leq 0.75s \\ 0 & \text{trái lại} \end{cases} \quad (6)$$

Biên dạng bề mặt đường loại 2 có hai gờ mấp mô, được thể hiện trên Hình 3 và biểu thức số (7).

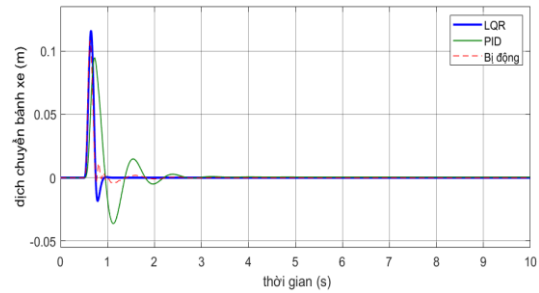
$$r(t) = \begin{cases} a(1 - \cos 8\pi t) & 0.5s \leq t \leq 0.75s \\ a(1 - \cos 8\pi t)/2 & 6.5s \leq t \leq 6.75s \\ 0 & \text{trái lại} \end{cases} \quad (7)$$



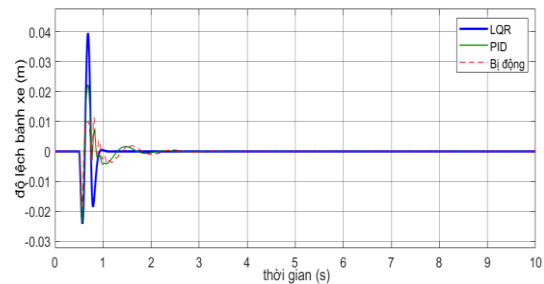
Hình 3. Biên dạng đường 2



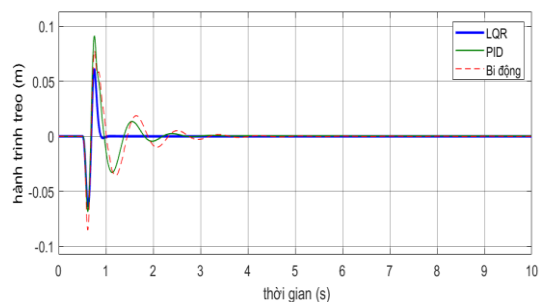
Hình 4. Độ dịch chuyển thân xe



Hình 5. Sự dịch chuyển của bánh xe



Hình 6. Độ lệch bánh xe



Hình 7. Hành trình treo của hệ thống

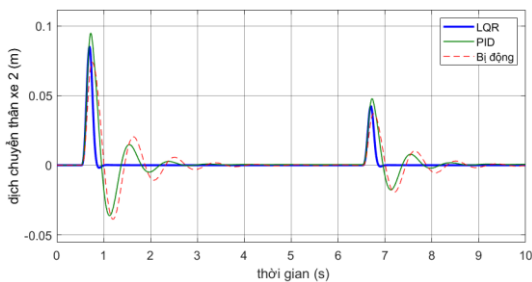
Với mục đích so sánh hiệu suất làm việc của hệ thống treo chủ động sử dụng hai phương pháp điều khiển LQR và PID so với hệ thống treo bị động. Những thông số động lực học được so sánh bao gồm: Dịch chuyển thân xe; Dịch chuyển bánh xe; Độ lệch bánh xe và Hành trình treo [7, 8, 9].

a, Trường hợp với biên dạng đường loại 1

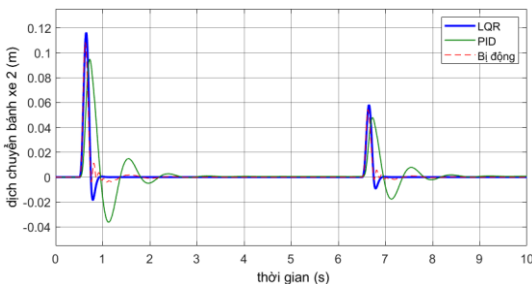
Hình 4, 5, 6 và 7 biểu diễn sự so sánh hệ thống treo chủ động sử dụng PID, LQR và hệ thống treo bị động

với biên dạng đường loại 1 với một mấp mô. Sự dịch chuyển thân xe được sử dụng để xác định cảm giác thoải mái của hành khách và hàng hóa khi đi xe. Trên Hình 4 cho thấy, biên độ của hệ thống treo chủ động sử dụng kỹ thuật LQR có cao hơn so với hệ thống treo bị động nhưng khoảng thời gian để dập tắt dao động được cải thiện. Trong mô phỏng này cho thấy rằng PID không cho kết quả về tính êm dịu của xe tốt hơn LQR nhưng PID cũng giúp giảm thời gian dập tắt dao động so với hệ thống treo bị động.

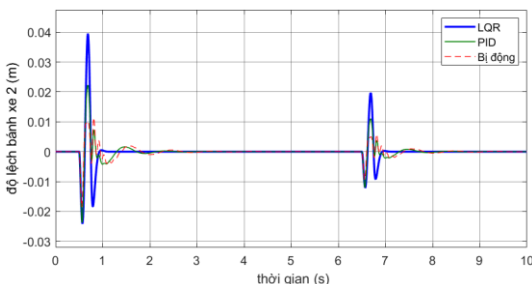
Chuyển vị bánh xe có thể cho phép xác định tốc độ xử lý của hệ thống khi xe di chuyển. Kết quả mô phỏng này cho thấy rằng, LQR có một số hạn chế nhất định so với PID. Bộ điều khiển LQR có thể làm giảm thời gian giải quyết dao động nhưng nó có biên độ dịch chuyển lớn hơn so với PID. Trên Hình 5 cho thấy, PID có thể giảm biên độ dịch chuyển với thời gian giải quyết lâu hơn. Bên cạnh đó, kết quả trên Hình 6 và 7 cũng cho thấy sự cải thiện hiệu suất dập tắt dao động của hệ thống treo chủ động khi sử dụng bộ điều khiển LQR và PID so với treo bị động.



Hình 8. Độ dịch chuyển thân xe



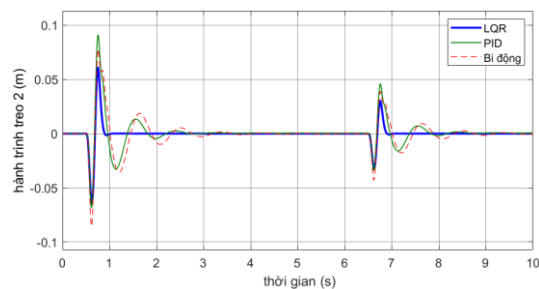
Hình 9. Sự dịch chuyển của bánh xe



Hình 10. Độ lệch của bánh xe

b, Đối với biên dạng đường loại 2

Hình 8, 9, 10 và 11 biểu diễn sự so sánh của hệ thống treo chủ động sử dụng bộ điều khiển PID, LQR với hệ thống treo thụ động với biên dạng đường xáo trộn có hai mấp mô liên tiếp. Kết quả thấy rằng, đối với một mô ¼ xe, LQR vẫn đảm bảo hiệu suất tốt ngay cả khi có những thay đổi về xáo trộn đường so với trường hợp với mô hình toàn xe, tại đó bộ điều khiển LQR không duy trì được hiệu suất như trong nghiên cứu số [9, 10] đã đưa ra khi xe di chuyển trên biên dạng đường có sự xáo trộn. Với cùng điều kiện biên dạng đường và thông số đầu vào mô phỏng thì thời gian dập tắt dao động của hệ thống treo chủ động nhanh gấp 2 - 3 lần so với hệ thống treo bị động.



Hình 11. Hành trình treo của hệ thống

5. Kết luận

Kỹ thuật điều khiển LQR và PID đã áp dụng hiệu quả để đánh giá hệ thống treo chủ động cho mô hình ¼ xe tuyến tính. Kết quả cho thấy rằng, một số khác biệt nhất định khi so sánh các thuật toán điều khiển LQR và PID: Bộ điều khiển LQR có thể làm giảm thời gian dập tắt dao động của bánh xe nhưng lại có biên độ dịch chuyển lớn hơn so với PID. Đối với bộ điều khiển PID sẽ không đảm bảo tính êm dịu của xe di chuyển tốt hơn khi so sánh với LQR vì có biên độ dao động của phần thân xe lớn hơn so với bộ điều khiển LQR. Với cùng điều kiện biên dạng đường và thông số đầu vào mô phỏng thì thời gian dập tắt dao động của hệ thống treo chủ động nhanh gấp 2 - 3 lần khi so sánh với hệ thống treo bị động. Kết quả bài báo cho thấy, với việc trang bị hệ thống treo chủ động cho xe ô tô sẽ đảm bảo tính êm dịu và an toàn khi so sánh với treo bị động.

Hướng nghiên cứu tiếp theo nhóm nghiên cứu hướng tới đó là tiến hành tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển PID. Việc lựa chọn mức tăng phù hợp hơn các hệ số K_p , K_i và K_d có thể cải thiện được hiệu suất của PID. Điều khiển chế độ trượt sẽ được sử dụng trong các nghiên cứu tiếp theo để so sánh hiệu suất của hệ thống treo chủ động cho mô hình ¼ xe.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vũ Hải Quân, Trịnh Duy Hùng, *Xây dựng mô hình nghiên cứu hệ thống treo có điều khiển cho mô hình toàn xe*, Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và môi trường, Tr.72-77, Số 10-2019.
- [2] Vũ Hải Quân, Hoàng Quang Tuấn, *Mô hình hóa và điều khiển hệ thống treo tích cực cho mô hình 1/4 xe*. Hội thảo Quốc gia: "Đào tạo nguồn nhân lực Công nghiệp Ô tô gắn với nhu cầu sử dụng lao động của xã hội. Khu vực Bắc Bộ: Thực trạng và giải pháp trong bối cảnh hội nhập và cách mạng công nghiệp 4.0, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số đặc biệt 6, Tr.61-66, 2019.
- [3] Sam Y.M., Ghani M.R.A and Ahmad, N. *LQR Controller for Active Car Suspension*. IEEE Control System, I441-I444, 2000.
- [4] Hespanhna J.P., *Undergraduate Lecture Note on LQG/LGR controller Design*, University of California Santa Barbara, 2007.
- [5] Wu S.J., Chiang H.H., Chen J.H., & Lee T.T., *Optimal Fuzzy Control Design for Half-Car Active Suspension Systems*, IEEE Proceeding of the International Conference on Networking, Sensing and Control. March, Taipei, Taiwan: IEEE. 21-23, 2004.
- [6] Astrom K.J. & Wittenmark B., *Adaptive Control*, Second Editon, Addison- Wesley Pub, 1995.
- [7] Chen H.Y. & Huang S.J., *Adaptive Control for Active Suspension System*, International Conference on Control and Automatic. June. Budapest, Hungary: 2005.
- [8] Ikenaga S., Lewis F.L., Campos J., & Davis L., *Active Suspension Control of Ground Vehicle Based on a Full Car Model*, Proceeding of America Control Conference. June. Chicago, Illinois: 2000.
- [9] Shariati A., Taghirad H.D. & Fatehi A. *Decentralized Robust $H-\infty$ Controller Design for a Full Car Active Suspension System Control*. University of Bath, United Kingdom, 2004.
- [10]. F. Hasbullah, W.F. Faris. *A comparative Analysis of LQR and Fuzzy logic Controller for Active Suspension Using Half Car Model*. 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision; pp.2415-2420, 2010.

Ngày nhận bài:	29/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	30/7/2021
Ngày duyệt đăng:	09/8/2021