

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN LQR CHO HỆ THỐNG TREO TRÊN MÔ HÌNH Ô TÔ ĐIỆN BỐN BÁNH

Bùi Đức Tiến¹, Đặng Ngọc Duyên¹, Phạm Vũ Nam¹, Trần Tuấn Anh¹

Tóm tắt: Hệ thống treo liên kết mềm giữa bộ phận được treo và bộ phận không được treo, đóng vai trò ổn định, dẫn hướng cho ô tô và dập tắt các dao động từ mặt đường. Hệ thống treo luôn có sự đối lập giữa tính êm dịu khi lái xe và độ an toàn. Bài báo này nhóm tác giả thiết kế 02 bộ điều khiển cho hệ thống treo chủ động trên mô hình ¼ ô tô điện dựa trên phương pháp điều khiển LQR: bộ điều khiển thứ nhất nâng cao độ êm dịu của ô tô điện, bộ điều khiển thứ hai nâng cao độ an toàn của ô tô điện. Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống treo chủ động sử dụng bộ điều khiển LQR nâng cao được độ êm dịu và độ an toàn của ô tô điện khi so sánh với hệ thống treo bị động.

Từ khóa: Hệ thống treo chủ động, Điều khiển LQR, Động lực học ô tô.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống treo đóng vai trò quan trọng trong ô tô, được sử dụng rộng rãi cho các loại ô tô hiện nay. Hệ thống treo bị động có sự đối lập giữa tính thoải mái của người lái xe và tính năng an toàn. Khi tính năng an toàn được nâng cao thì tính thoải mái của người sử dụng giảm đi và ngược lại. Hệ thống treo chủ động có khả năng cung cấp năng lượng từ bên ngoài được ứng dụng để nâng cao các tính năng của ô tô. Toshimura và cộng sự (Toshimura, 2001) đã thiết kế một hệ thống treo chủ động cho mô hình ¼ ô tô sử dụng bộ điều khiển trượt. Bộ điều khiển trượt thiết kế dựa trên lý thuyết điều khiển bậc hai tuyến tính LQ. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng hệ thống treo chủ động được đề xuất có hiệu quả hơn trong việc giảm rung động so với hệ thống treo bị động.

Sam và cộng sự (Sam, 2003) thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt cho mô hình ¼ ô tô. Kết quả cho thấy tính hiệu quả và ổn định của hệ thống treo chủ động so với hệ thống treo bị động. Gursel và cộng sự (Gursel, 2006) đã sử dụng bộ điều khiển PID để nghiên cứu tính an toàn của hệ thống treo chủ động. Son và Isik (Son, 1996) sử dụng phương pháp điều khiển logic mờ cho hệ thống treo chủ động trong một số tình huống mô phỏng. Hiệu suất của bộ điều khiển mờ tốt hơn so với hệ thống treo bị động ở các điều kiện và chế độ đường khác nhau. Wu và cộng

sự (Wu, 2005) thiết kế bộ điều khiển hệ thống treo chủ động dùng Neural Network Based Fuzzy Logic. Mô hình mạng nơ ron dựa trên logic mờ dùng các tập tin hiệu từ mô hình động lực học ½ ô tô không tuyến tính. Sự phát triển của hệ thống treo chủ động không những giảm được các va đập từ mặt đường, giảm nhiều từ cảm biến mà còn có thể đáp ứng được những sai số không chắc chắn. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống treo chủ động được thiết kế có thể cải thiện các tính năng êm dịu và an toàn của ô tô. Tamai và Sotelo (Tamai, 1995) đã nghiên cứu hệ thống treo chủ động sử dụng phương pháp LQG – LTR trong đó kể đến độ biến dạng của thân xe.

Trong bài báo này nhóm tác giả thiết kế 02 bộ điều khiển cho hệ thống treo chủ động trên mô hình ¼ ô tô điện dựa trên phương pháp điều khiển LQR: bộ điều khiển thứ nhất quan tâm nhiều đến nâng cao độ êm dịu của ô tô điện, bộ điều khiển thứ hai quan tâm nhiều đến nâng cao độ an toàn của ô tô điện. Các kết quả của hệ thống treo chủ động sử dụng bộ điều khiển LQR được so sánh với hệ thống treo bị động. Các mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/ Simulink.

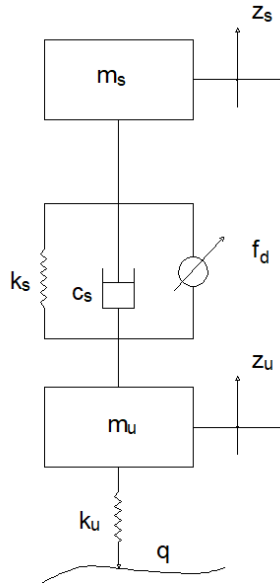
2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng một mô hình ¼ ô tô điện bốn bánh xe để nghiên cứu. Khối lượng xe được chia làm hai: khối lượng được treo m_s và khối lượng không được treo m_u . Lò xo và bộ

¹ Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi.

phần giảm chấn của hệ thống treo được mô hình hóa như hình 1. Tín hiệu kích thích từ mặt đường được ký hiệu là q . Tín hiệu điều khiển của hệ thống là f_d . Các ký hiệu và thông số mô hình được thể hiện trong bảng 1 (Nguyễn Đức Ngọc, 2017).



Hình 1. Mô hình 1/4 ô tô điện

Bảng 1. Bảng thông số mô hình

TT	Tên gọi	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng được treo	m_s	500	kg
2	Khối lượng không được treo	m_u	50	kg
3	Độ cứng của lò xo hệ thống treo	k_s	18000	N/m
4	Độ cứng của lốp	k_u	132000	N/m
5	Hệ số cản của giảm chấn	c_s	1000	Ns/m

2.2. Phương trình động lực học

Từ hình 1, áp dụng nguyên lý Dалаmbe và định luật II Newton ta có phương trình dao động của xe được xác định như công thức:

$$m_s \cdot \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + f_d = 0 \quad (1)$$

$$-m_u \cdot \ddot{z}_u + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) + k_u(z_u - q) = 0 \quad (2)$$

Phương trình (1) và (2) có thể viết lại theo phương trình không gian trạng thái:

$$\dot{x} = Ax + B_1W + B_2U$$

$$y = Cx + D_1W + D_2U$$

Trong đó:

$$\text{Véc tơ trạng thái } x = [z_s \ z_u \ \dot{z}_s \ \dot{z}_u]^T,$$

$$\text{Véc tơ đầu ra } y = [\ddot{z}_s \ \ddot{z}_u \ z_s - z_u \ z_s \ z_u]^T,$$

Véc tơ kích thích là tín hiệu từ mặt đường $w = [q]$.

$$\text{Tín hiệu điều khiển } u = [f_d]$$

Các ma trận A, B, C, D:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_s/m_s & k_s/m_s & -c_s/m_s & c_s/m_s \\ k_s/m_u & -(k_s+k_u)/m_u & c_s/m_u & -c_s/m_u \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ k_u/m_u]^T$$

$$B_2 = [0 \ 0 \ -1/m_s \ 1/m_u]^T$$

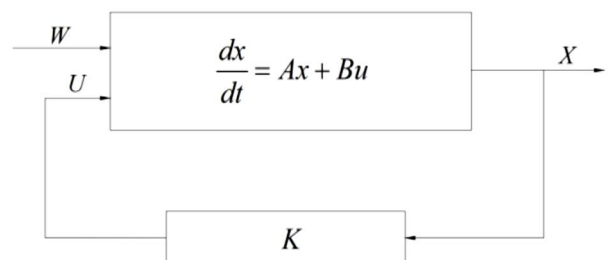
$$C = \begin{bmatrix} -k_s/m_s & k_s/m_s & -c_s/m_s & c_s/m_s \\ k_s/m_u & -(k_s+k_u)/m_u & c_s/m_u & -c_s/m_u \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = [0 \ k_u/m_u \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D_2 = [0 \ k_u/m_u \ 0 \ 0 \ 0]$$

2.3. Cơ sở lý thuyết điều khiển LQR

Điều khiển LQR là xác định luật điều khiển cho hệ thống cho trước sao cho tối thiểu hoá một hoặc một vài chỉ tiêu chất lượng. Có 2 phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái tối ưu là phản hồi dương và phản hồi âm. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng điều khiển phản hồi âm có cấu trúc như hình 2.



Hình 2. Bộ điều khiển LQR phản hồi âm

Đối với việc thiết kế bộ điều khiển, chúng tôi giả định rằng mọi thông số đều có thể đo được hay

ước lượng được. Từ đó chúng ta xem xét đến lực điều khiển:

$$u = -K.x$$

Trong đó K là ma trận phản hồi trạng thái. Quá trình tối ưu cần xác định tín hiệu đầu vào để giảm thiểu một số tín hiệu trong hàm mục tiêu J được biểu diễn như sau:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2 x^T N u) dt$$

Với ma trận Q được giả thiết là ma trận đối xứng, xác định không âm và R là ma trận đối xứng xác định dương. Theo lý thuyết điều khiển tối ưu tuyến tính thì K được xác định như sau:

$$K = R^{-1} B^T P$$

Với P là nghiệm của phương trình Riccati:

$$AP + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$$

2.4. Lựa chọn hàm mục tiêu

Mục đích của hệ thống điều khiển tối ưu là nâng cao tính ổn định và an toàn của ô tô. Do đó ta chọn hàm mục tiêu như sau:

$$J = \int_0^{\infty} (\rho_1 \ddot{z}_s^2 + \rho_2 \dot{z}_u^2 + \rho_3 z_s^2 + \rho_4 z_u^2) dt$$

Trong đó là $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4 > 0$ là các trọng số cho trước. Giá trị của các trọng số thể hiện mức độ ưu tiên khác nhau cho các chỉ tiêu khác nhau. Độ êm dịu của ô tô được đánh giá thông qua các thông số \ddot{z}_s, z_s . Độ an toàn của ô tô được đánh giá thông qua các thông số \dot{z}_u, z_u . Giá trị của các trọng số thể hiện mức độ ưu tiên khác nhau cho các chỉ tiêu chất lượng. Khi muốn ưu tiên bài toán tối ưu theo chỉ tiêu nào thì phải thực hiện việc tăng giá trị của ρ_i tương ứng với các tín hiệu liên quan. Nếu ta

quan tâm đến độ êm dịu thì: ρ_1, ρ_3 tăng. Nếu ta quan tâm đến độ an toàn thì: ρ_2, ρ_4 tăng. Với mô hình 1/4 ô tô điện như đề xuất ở trên tác giả thiết kế 2 bộ điều khiển:

+ Bộ điều khiển số 1: 1st LQR Active: chỉ quan tâm đến độ êm dịu.

+ Bộ điều khiển số 2: 2nd LQR Active: chỉ quan tâm đến độ an toàn.

Do vậy giá trị ρ_i tương ứng của 02 bộ điều khiển được lựa chọn như bảng 2.2:

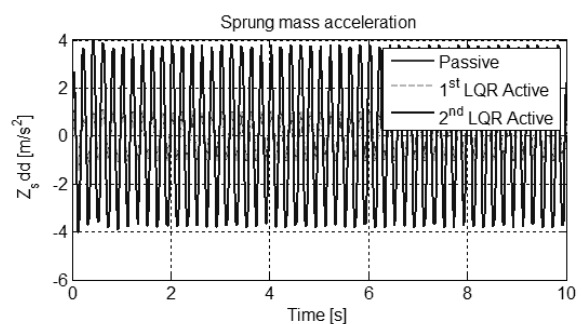
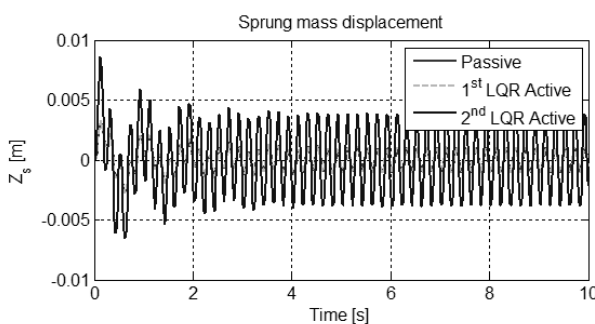
Bảng 2. Bảng thông số ρ_i của 02 bộ điều khiển

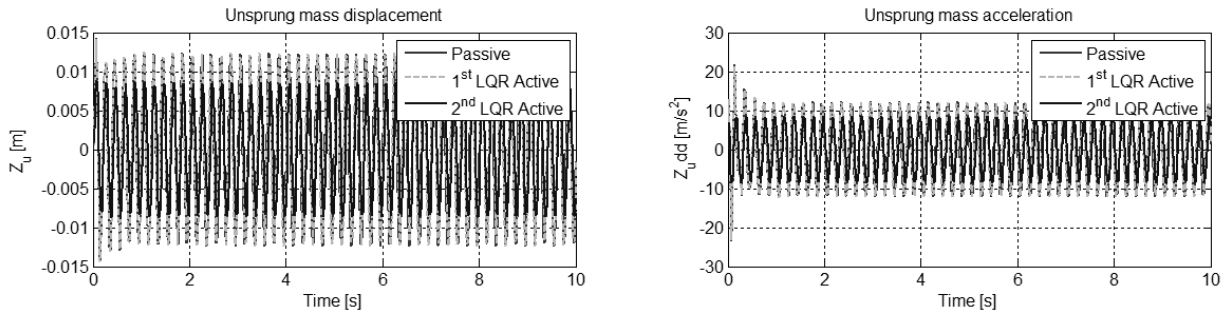
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4
1 st LQR Active	1	1000	1	1000
2 nd LQR Active	1000	1	1000	1

Lưu ý: Việc lựa chọn giá trị của ρ_i trong bảng 2 chỉ mang tính chất ví dụ minh họa hiệu quả của việc chuyển đổi hàm mục tiêu tối ưu theo hai hướng ưu tiên khác nhau. Chúng ta có thể hoàn toàn lựa chọn các giá trị khác của ρ_i để thỏa mãn các mục tiêu khác.

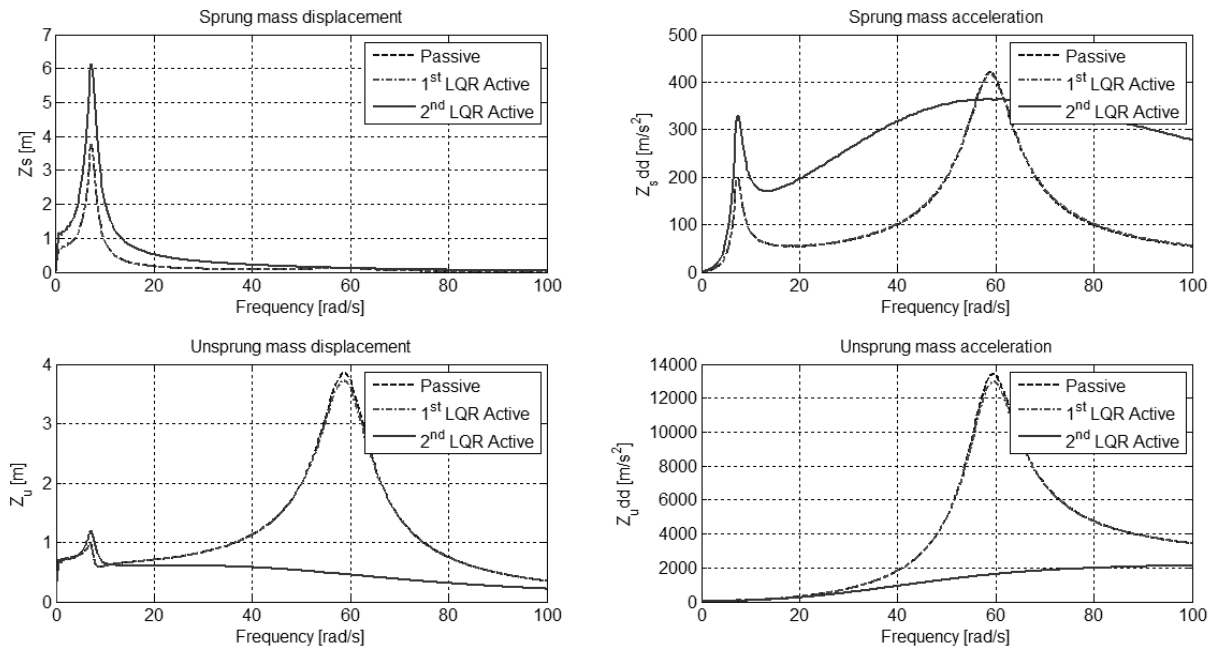
3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Nhóm tác giả so sánh 2 bộ điều khiển trên với hệ thống treo bị động trên miền tần số và trên miền thời gian và miền tần số theo 2 tiêu chí đó là độ êm dịu và độ an toàn. Trong miền thời gian, nhóm tác giả xét dao động của hệ thống treo khi ô tô đi trên dạng mặt đường hình sin với tần số 10π (rad/s) và biên độ dao động 0.01m. Trong miền tần số, nhóm tác giả khảo sát dao động của hệ thống treo trong khoảng tần số từ 0-100rad/s.





Hình 3. Đồ thị thể hiện dao động của hệ thống treo trên miền thời gian



Hình 4. Đồ thị thể hiện dao động của hệ thống treo trên miền tần số

Dựa trên cả 4 đồ thị a,b,c và d ta thấy cả 4 yếu tố là dịch chuyển thân xe, dịch chuyển cầu xe, gia tốc dịch chuyển thân xe và gia tốc dịch chuyển cầu xe đều có dao động khá lớn và không ổn định trong khoảng thời gian 1 giây đầu tiên khảo sát sau khoảng 1,5 giây thì dao động điều hoà. Giai đoạn này đặc trưng cho trạng thái dao động không ổn định khi mới chịu kích thích.

Ở hai đồ thị trên cùng của hình 3 và hình 4, bộ điều khiển số 2 có giá trị lớn vì bộ điều khiển này không chú trọng độ êm dịu. Các giá trị lớn nhất của tín hiệu trong bộ điều khiển “1st LQR Active” là nhỏ nhất khi so sánh với Passive và “2nd LQR Active”. Do vậy nó thoả mãn mục tiêu thiết kế bộ điều khiển để nâng cao tính êm dịu của ô tô điện.

Ở hai đồ thị dưới của hình 3 và hình 4, bộ điều khiển số 1 có giá trị lớn vì bộ điều khiển này không

chú trọng độ an toàn. Các giá trị lớn nhất của tín hiệu trong bộ điều khiển “2nd LQR Active” là nhỏ nhất khi so sánh với Passive và “1st LQR Active”. Do vậy nó thoả mãn mục tiêu thiết kế bộ điều khiển để nâng cao tính an toàn của ô tô điện.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này nhóm tác giả đã thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống treo chủ động trên mô hình $\frac{1}{4}$ ô tô điện theo phương pháp điều khiển LQR nhằm tối ưu hai chỉ tiêu chính là nâng cao độ êm dịu và tính năng an toàn của ô tô điện. Chúng tôi đã khảo sát 02 bộ điều khiển theo 02 mục tiêu khác nhau. Các kết quả mô phỏng trên miền thời gian và miền tần số trong bài báo có thể làm cơ sở phát triển và hoàn thiện bộ điều khiển tối ưu LQR cho hệ thống treo chủ động nhằm nâng cao chất lượng làm việc của ô tô điện.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo là phối hợp giữa các bộ điều khiển để đảm bảo hệ thống treo hoạt động liên tục và thỏa mãn các điều kiện thực tế về độ êm dịu và an toàn chuyển động. Trong đó phương pháp điều khiển với thông số thay đổi liên tục LPV có thể được áp dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Đức Ngọc (2017). *Nghiên cứu thiết kế mô hình ô tô điện bốn bánh xe*. Báo cáo đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường. Trường Đại học Thủy lợi.
- Toshimura, T., Kume, A., Kuromoto, M. and Hino, J. 2001 . *Active suspension system of a quarter car using the concept of sliding mode control*. Journal of Sound and Vibration, 239: 187-199.
- Sam, Y.M., Osman, J.H.S. and Ghani, M.R.A. 2003. *Active Suspension Control: Performance Comparison using Proportional Integral Sliding Mode and Linear Quadratic Regulator Methods*. Proceedings of IEEE Conference on Control Applications, Istanbul, Turkey, pp. 274-278.
- Gürsel, N. Altas, I.H. and Gümüşel, L. 2006. *Fuzzy control of a bus suspension system*. Proceedings of 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 1170-1177.
- Son, S.I. and Isik, C. 1996. *Application of Fuzzy Logic Control to an Automotive Active Suspension System*. Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 548-553.
- Wu, S.J., Wu, C.T. and Lee, T.T. 2005. *Neural-network-based fuzzy control design for half-car active suspension systems*. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 376-381.
- Tamai, E.H. and Sotelo, J. 1995. *LQG –control of active suspension considering vehicle body flexibility*. Proceedings of 4th IEEE Conference on Control Applications, pp. 143-147.

Abstract:

DESIGN OF LQR CONTROLLER FOR ACTIVE SUSPENSION ON FOUR WHEEL ELECTRIC CAR MODEL

The suspension connected the sprung mass and the unsprung mass, which provide vehicle stability and directional control during handling manoeuvres and to provide effective isolation from road disturbances. There is an opposition between ride comfort and safety. In this paper, we designed two controllers for active suspension on linear quarter electrical car model base on LQR control theory: the first one, controller only focus on improving comfort of electrical car; the second, controller only focus on enhancing safety of electrical car. The simulation results show that the active suspension system equipped LQR controller to improve the features of electric car when compared with passive suspension.

Keywords: Active suspension, LQR controller, vehicle dynamics.

Ngày nhận bài: 09/7/2019

Ngày chấp nhận đăng: 23/8/2019