

# ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TREO TRÊN MÔ HÌNH Ô TÔ ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP LQR KẾT HỢP VỚI THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN

CONTROLLING AN ACTIVE SUSPENSION SYSTEM FOR FOUR WHEELS CAR BY COMBINING LQR METHOD AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Trần Văn Đà<sup>1</sup>, Bùi Đức Tiến<sup>2,\*</sup>

## TÓM TẮT

Thuật toán tối ưu bầy đàn PSO là một trong những thuật toán xây dựng dựa trên khái niệm trí tuệ bầy đàn để tìm kiếm lời giải cho các bài toán tối ưu hóa trên một không gian tìm kiếm. Trong bài báo này, nhóm tác giả thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống treo chủ động trên mô hình 1/4 ô tô điện dựa trên phương pháp điều khiển LQR kết hợp với thuật toán tối ưu bầy đàn PSO nhằm tối ưu hóa giá trị của các trọng số trong bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink cho thấy hệ thống treo chủ động sử dụng bộ điều khiển LQR kết hợp với thuật toán tối ưu bầy đàn PSO nâng cao được độ êm dịu và độ an toàn của ô tô điện khi so sánh với bộ điều khiển LQR và hệ thống treo bị động.

**Từ khóa:** Hệ thống treo chủ động, điều khiển LQR, thuật toán tối ưu bầy đàn PSO, động lực học ô tô.

## ABSTRACT

Particle swarm optimization (PSO) is one of the algorithms based on the concept of the intelligent swarm to find solutions to optimization problems. In this paper, the authors design a controller for the active suspension system on the 1/4 electric car model based on the LQR method combined with the particle swarm optimization (PSO) to optimize the values of the weights number in the controller. The simulation results in Matlab - Simulink software environment show that the active suspension system using the LQR controller combined with the PSO algorithm improves the comfort and safety of electric cars when compared with LQR controller and the passive suspension system.

**Keywords:** Active suspension, LQR control, PSO algorithm, vehicle dynamics.

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

<sup>2</sup>Trường Đại học Thủy lợi

\*Email: buiductien.ckoto@tlu.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/6/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/8/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2021

## 1. GIỚI THIỆU

Hệ thống treo liên kết mềm giữa bộ phận được treo và bộ phận không được treo, 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.

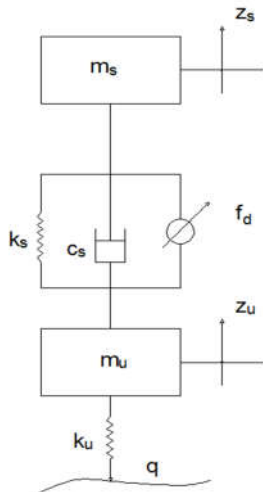
Hệ thống treo chủ động là hệ thống treo có khả năng cung cấp năng lượng từ bên ngoài như lực sinh ra từ hệ thống thủy lực, điện tử để nâng cao các tính năng của ô tô. T.P.J. van der Sande và cộng sự [1] điều khiển hệ thống treo điện tử cho mô hình 1/4 ô tô bằng mô phỏng và thực nghiệm có xem xét đến các yếu tố không chắc chắn bằng bộ điều khiển  $H_{\infty}$ . Kết quả cho thấy bộ điều khiển này nâng cao 40% độ êm dịu và 30% độ an toàn so với hệ thống treo bị động trên xe BMW. Trong [2], các tác giả đã thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt cho mô hình 1/4 ô tô và đã cho thấy những kết quả thể hiện tính hiệu quả và ổn định của hệ thống treo chủ động so với hệ thống treo bị động. A. B. Sharkawy [3] đã điều khiển mờ và thích ứng mờ (AFC) cho hệ thống treo chủ động trên ô tô. Kết quả chỉ ra rằng bộ điều khiển AFC đã đạt được những kết quả vượt trội. Wu và cộng sự [4] thiết kế bộ điều khiển hệ thống treo chủ động dùng mạng nơ ron dựa trên logic mờ. Mô hình này dùng các tập tin hiệu từ mô hình động lực học 1/2 ô tô không tuyến tính. Hệ thống treo chủ động này giảm được các va đập từ mặt đường, giảm nhiều từ cảm biến và 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. Trong [5] nhóm tác giả thiết kế 02 bộ điều khiển riêng biệt cho hệ thống treo chủ động trên mô hình 1/4 ô tô điện dựa trên phương pháp điều khiển LQR để nâng cao độ êm dịu của ô tô điện và độ an toàn của ô tô điện. Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống treo chủ động sử dụng 02 bộ điều khiển LQR riêng biệt nâng cao được độ êm dịu và độ an toàn của ô tô điện khi so sánh với hệ thống treo bị động. Trong [6], các tác giả đã sử dụng bộ điều khiển LQG cho hệ thống treo có xem xét đến ảnh hưởng của góc đánh lái và mô phỏng trên đường trong ba tình huống khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng hệ thống treo chủ động với bộ điều khiển được đề xuất có thể đạt được độ an toàn tốt hơn trong các tình huống lái khác nhau. Shaobin Lv [7] đã sử dụng thuật

toán tối ưu bầy đàn để điều khiển hệ thống treo với mô hình 1/2 ô tô nhằm nâng cao tính năng êm dịu. Bộ điều khiển PID đã được sử dụng để nghiên cứu tính an toàn của hệ thống treo chủ động [8]. Hiệu suất của bộ điều khiển PID tốt hơn so với hệ thống treo bị động ở các điều kiện và chế độ đường khác nhau.

Trong bài báo này, nhóm tác giả thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống treo chủ động trên mô hình 1/4 ô tô dựa trên phương pháp điều khiển LQR. Sau đó nhóm tác giả sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn PSO để tìm giá trị tối ưu của các trọng số trong bộ điều khiển LQR. Các kết quả của hệ thống treo chủ động sử dụng bộ điều khiển LQR với giá trị trọng số tối ưu được so sánh với bộ điều khiển LQR và 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**



Hình 1. Mô hình 1/4 ô tô điện

Trong nghiên cứu này, mô hình 1/4 hệ thống treo ô tô điện bốn bánh xe [5, 9] được sử dụng để nghiên cứu. Khối lượng xe được chia làm hai: khối lượng được treo m<sub>s</sub> và khối lượng không được treo m<sub>u</sub>. Các bộ phận cơ bản của hệ thống treo được mô hình hóa như hình 1. q là tín hiệu kích thích từ mặt đường, f<sub>d</sub> là tín hiệu điều khiển của hệ thống. Các ký hiệu và thông số mô hình được mô tả trong [5].

**2.2. Phương trình động lực học**

Từ hình 1, áp dụng nguyên lý Dалаmbе và định luật II Newton, phương trình dao động của mô hình 1/4 ô tô được xác định như công thức:

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

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

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:

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

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

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

Tín hiệu điều khiển u = [f<sub>d</sub>]

Các ma trận A, B, C, D:

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

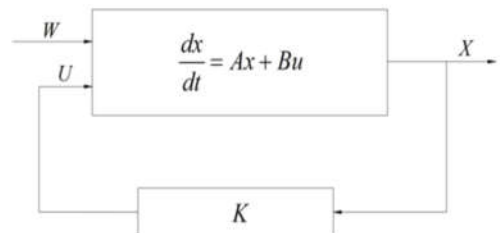
$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ k_u/m_u]^T; \ B_2 = [0 \ 0 \ -1/m_s \ 1/m_u]^T$$

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

$$D_1 = [0 \ k_u/m_u \ 0 \ 0 \ 0]; \ D_2 = [0 \ k_u/m_u \ 0 \ 0 \ 0]$$

**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 hai 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

Trong LQR, hàm mục tiêu được định nghĩa:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru + 2x^T Nu) dt$$

Trong đó tín hiệu điều khiển:

$$U = -Kx$$

Trong đó, K là ma trận phản hồi trạng thái, 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 thông qua phương trình Riccati [10].

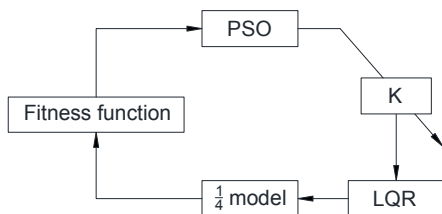
Mục đích của hệ thống điều khiển tối ưu là nâng cao tính ổn định và an toàn của ô tô. Do đó ta chọn hàm mục tiêu như sau:

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

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  $\dot{z}_s, z_s$ . 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  $\rho_i$  tương ứng với các tín hiệu liên quan. Nếu ta quan tâm đến độ êm dịu thì:  $\rho_1, \rho_3$  tăng. Nếu ta quan tâm đến độ an toàn thì:  $\rho_2, \rho_4$  tăng.

**2.4. Thuật toán tối ưu bầy đàn PSO**

Phương pháp tối ưu bầy đàn PSO là một dạng của các thuật toán tiến hóa quần thể, đó là kết quả của sự mô hình hóa việc đàn chim bay đi tìm kiếm thức ăn, nên nó được xếp vào các loại thuật toán có sử dụng trí tuệ bầy đàn. Trong bài báo này, nhóm tác giả áp dụng thuật toán PSO để tìm kiếm giá trị K tối ưu cho bộ điều khiển LQR. Sơ đồ mô hình thuật toán kết hợp giữa phương pháp LQR và PSO được biểu diễn như hình 3.



Hình 3. Bộ điều khiển LQR kết hợp PSO

PSO chạy lặp đi lặp lại trong 20 thế hệ với quy mô dân số là 50. Tốc độ và vị trí của thế hệ tiếp theo được cập nhật trong phương trình (3), (4):

$$v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + c_1r_1(Pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2r_2(Gbest_{ij}^k - x_{ij}^k) \tag{3}$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \tag{4}$$

Trong đó:

$v_{ij}^{k+1}$  là vận tốc của cá thể hiện tại

$v_{ij}^k$  là vận tốc của cá thể ở thế hệ trước

$r_1, r_2$  là giá trị ngẫu nhiên

$c_1, c_2$  là hằng số

$x_{ij}^{k+1}$  là vị trí của cá thể hiện tại

$x_{ij}^k$  là vị trí của cá thể ở thế hệ trước

$Pbest_{ij}^k$  là vị trí tốt nhất của cá thể

$Gbest_{ij}^k$  là vị trí tốt nhất của cả bầy đàn

w là hệ số

Các bước giải bài toán sử dụng bộ điều khiển LQR kết hợp với PSO:

Bước 1. Tính toán các ma trận (A, B) trong mô hình 1/4 ô tô

Bước 2. Chọn ma trận trạng thái và ma trận Q và R trong hàm fitness

Bước 3. Khởi tạo các giá trị ban đầu của PSO, bao gồm 50 cá thể và 20 thế hệ và thời gian mô phỏng là  $T_f = 20s$

Bước 4. Thiết lập giá trị tốt nhất của mỗi cá thể Pbest và xác định vị trí tốt nhất của cả quần thể Gbest

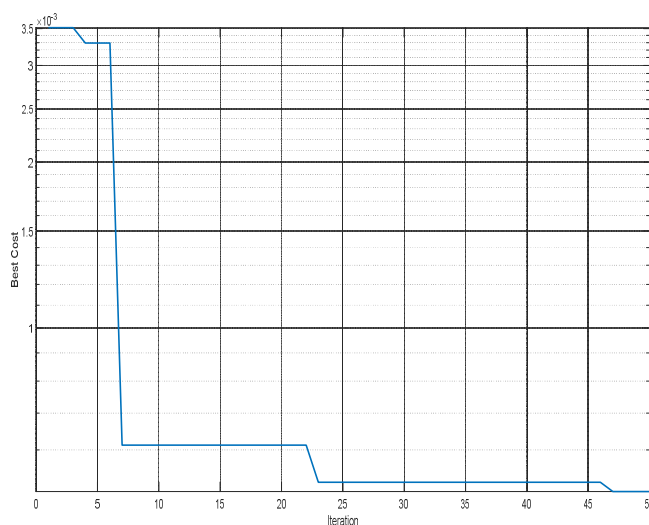
Bước 5. So sánh Gbest với mục tiêu và kiểm tra số lần lặp lại để xác định điều kiện kết thúc. Nếu thỏa mãn mục tiêu thì chuyển sang bước 7, nếu không thì tiếp tục bước 6

Bước 6. Lặp lại bước 4 (cập nhật vận tốc và vị trí của cá thể)

Bước 7. Chọn giá trị tốt nhất (giá trị tối ưu) Gbest, của ma trận phản hồi trạng thái K.

**3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ**

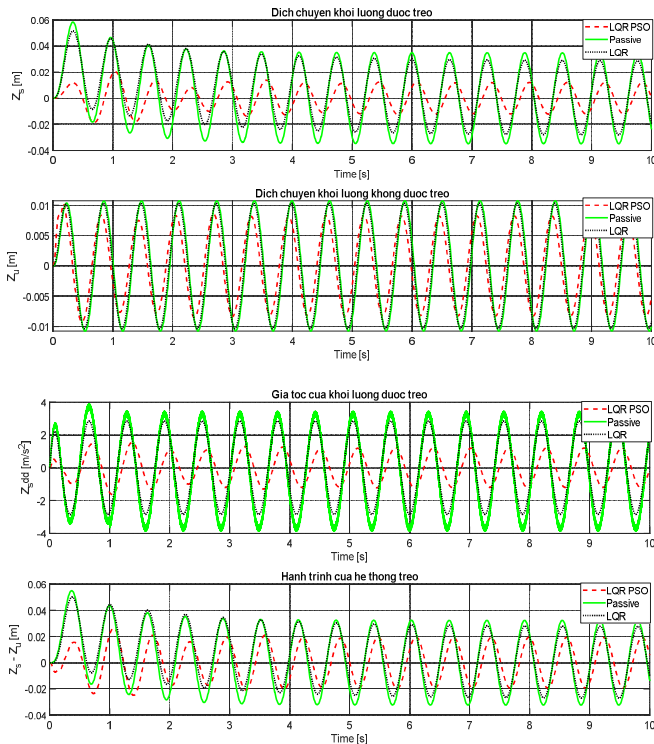
Nhóm tác giả mô phỏng với 50 cá thể trong 20 thế hệ, các giá trị tối ưu của Gbest của hàm J được biểu diễn trong hình 4. Chúng ta có thể thấy rằng, khi bắt đầu tìm kiếm, giá trị của hàm fitness tăng nhanh bởi vì các giá trị được tạo ngẫu nhiên không có giới hạn. Tuy nhiên, giá trị của hàm cost function giảm rất nhanh trong vòng vài lần lặp lại do các cá thể liên tục cập nhật trong thuật toán PSO. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy giá trị K tối ưu là [-618000 18876000 -613000 567000]. Giá trị K tối ưu này làm cho hàm J tối ưu.



Hình 4. Giá trị hàm fitness

Nhóm tác giả so sánh bộ điều khiển bằng phương pháp LQR kết hợp với PSO với hệ thống treo bị động trên miền tần số theo hai chỉ 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  $10\pi$  (rad/s) và biên độ dao động 0,01m.

Hình 5 biểu diễn kết quả mô phỏng của dịch chuyển khối lượng được treo, dịch chuyển của khối lượng không được treo, gia tốc dịch chuyển của khối lượng được treo và hành trình của hệ thống treo. Chúng ta có thể thấy cả 4 thông số này 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.



Hình 5. Đồ thị thể hiện dao động của hệ thống treo trên miền thời gian

Bảng 1. Giá trị sai lệch bình phương trung bình RMS

Phương pháp điều khiển	Dịch chuyển khối lượng được treo	Dịch chuyển khối lượng không được treo	Gia tốc của khối lượng được treo	Hành trình của hệ thống treo
Passive	0,025	0,0076	2,4234	0,0232
LQR	0,0211	0,0073	2,0053	0,0203
LQR - PSO	0,0091	0,0059	0,8671	0,0139

Để thấy rõ hơn hiệu quả của thuật toán điều khiển đã đề xuất, nhóm tác giả thống kê giá trị sai lệch bình phương trung bình RMS của dịch chuyển khối lượng được treo, dịch chuyển của khối lượng không được treo, gia tốc dịch chuyển của khối lượng được treo và hành trình của hệ thống treo trong hệ thống treo. Bảng 1 đã cho thấy rõ các sai lệch giá trị bình phương trung bình RMS của 4 thông số trong bộ điều khiển LQR - PSO đều nhỏ giá trị bình phương trung bình trong bộ điều khiển LQR và hệ thống treo bị động. Giá trị của dịch chuyển khối lượng được treo trong bộ điều khiển LQR - PSO giảm 15,6% khi so với bộ điều khiển LQR và giảm 63,6% khi so với hệ thống treo bị động. Gia tốc của khối lượng được treo trong bộ điều khiển LQR - PSO giảm 56,75% và 64,21% khi so với bộ điều khiển LQR và hệ thống treo bị động tương ứng. Đồng thời, dịch chuyển khối lượng không được treo trong bộ điều khiển LQR - PSO giảm 19,17% khi so với bộ điều khiển LQR và giảm 22,36% khi so với hệ thống treo bị động. Hành trình của hệ thống treo cũng giảm 31,52% và 40,08% khi so với bộ điều khiển LQR và hệ thống treo bị động tương ứng. Kết quả mô phỏng ở trường hợp này đã cho thấy rõ độ hiệu quả của phương pháp điều khiển LQR kết hợp với thuật toán tối ưu bầy đàn PSO.

#### 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 1/4 ô tô điện theo phương pháp điều khiển LQR kết hợp với thuật toán tối ưu bầy đàn PSO để tối ưu hóa các trọng số trong bộ điều khiển LQR nhằm nâng cao độ êm dịu và tính năng an toàn của ô tô điện. Các kết quả mô phỏng trong bài báo cho thấy rõ độ hiệu quả của bộ điều khiển LQR - PSO đã đề xuất khi so sánh với bộ điều khiển LQR và hệ thống treo bị động. Kết quả của bài báo có thể làm cơ sở phát triển và hoàn thiện các bộ điều khiển tối ưu 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 bền vững và điều khiển với thông số thay đổi liên tục LPV có thể được áp dụng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T.P.J. van der Sande, B.L.J. Gysen, I.J.M. Besselink, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova, H. Nijmeijer, 2013. *Robust control of an electromagnetic active suspension system: Simulations and measurements*. Mechatronics Volume 23, Issue 2, Pages 204-212
- [2]. Sam, Y.M., Osman, J.H.S., 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.
- [3]. A. B. Sharkawy, 2005. *Fuzzy and adaptive fuzzy control for the automobiles' active suspension system*. Vehicle System Dynamics Vol. 43, No. 11, 795-806
- [4]. 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.
- [5]. Bui Duc Tien, Dang Ngoc Duyen, Pham Vu Nam, Tran Tuan Anh, 2019. *Design of LQR controller for active suspension on four wheel electric car model*. Journal of Water Resources and Environmental Engineering, No. Special, October 2019, pp89-93
- [6]. Shi-an Chen, Yu-meng Cai, Jian Wang, Ming Yao, 2018. *A Novel LQG Controller of Active Suspension System for Vehicle Roll Safety*. International Journal of Control, Automation and Systems 16(X)
- [7]. Shaobin Lv, Guoqiang Chen, Jun Dai, 2020. *Control and Stability Analysis of Double Time-Delay Active Suspension Based on Particle Swarm Optimization*. Recent Patents on Mechanical Engineering Volume 13, Issue 1
- [8]. 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.
- [9]. Nguyen Duc Ngoc, 2017. *Nghiên cứu thiết kế mô hình ô tô điện bốn bánh xe*. Scientific research project report, Thuyloi University.
- [10]. Nguyen Thi Phuong Ha, 2008. *Ly thuyết điều khiển hiện đại*. Vietnam National University Ho Chi Minh City Press.

#### AUTHORS INFORMATION

Tran Van Da<sup>1</sup>, Bui Duc Tien<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications

<sup>2</sup>Thuyloi University