



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.3.37-48>

***Corresponding author:**

Email address:

tuan.vungoc@lqdtu.edu.vn

Received: 12/02/2025

Received in Revised Form:
07/08/2025

Accepted: 11/08/2025

Design and Evaluation of PID and Fuzzy Logic Control Laws for the Electronic Stability Control (ESC) System in Cars

Tran Danh Dong¹, Vu Ngoc Tuan^{1*}, Nguyen Dinh Dung², Nguyen Huu Thanh³,

¹Institute of Vehicle & Energy in Transportation Engineering, Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Nghia Do, Ha Noi, Vietnam

²Faculty of Aerospace Engineering, Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Nghia Do, Ha Noi, Vietnam

³College of Agricultural Mechanics, Binh Nguyen, Phu Tho, Vietnam

Abstract: The Electronic Stability Control (ESC) system plays an important role in improving vehicle stability and safety, especially in sharp turning maneuvers or when driving on road surfaces with low friction coefficients. This paper presents the design and evaluation of two control methods: PID and Fuzzy Logic. Both controllers are designed based on the vehicle dynamic motion model and are simulated and analyzed using Matlab Simulink in combination with CarSim. The obtained simulation results are used to evaluate the effectiveness of the PID and Fuzzy Logic controllers on the ESC system in terms of vehicle trajectory and overall stability. These findings assist in selecting an appropriate control law, thereby enhancing the effectiveness of vehicle stability control.

Keywords: Electronic Stability Control; ESC; Vehicle dynamics model; Vehicle Oscillations; PID controller; Fuzzy Logic controller.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.3.37-48>

Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
tuan.vungoc@lqdtu.edu.vn

Ngày nộp bài: 12/02/2025
Ngày nộp bài sửa: 07/08/2025
Ngày chấp nhận: 11/08/2025

Thiết kế và đánh giá luật điều khiển PID và Logic mờ cho hệ thống cân bằng điện tử ESC trên ô tô

Trần Danh Đồng¹, Vũ Ngọc Tuấn^{1*}, Nguyễn Đình Dũng², Nguyễn Hữu Thành³

¹Viện Cơ khí động lực, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 236 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Hàng không vũ trụ, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 236 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Cao đẳng Cơ khí Nông nghiệp, Bình Nguyên, Phú Thọ, Việt Nam

Tóm tắt: Hệ thống cân bằng điện tử (ESC) đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ ổn định và an toàn của ô tô đặc biệt trong tình huống quay vòng gấp hoặc di chuyển trên mặt đường có hệ số bám thấp. Bài báo này trình bày quá trình thiết kế và đánh giá hai phương pháp điều khiển là PID và Logic mờ (Fuzzy Logic). Cả hai bộ điều khiển được thiết kế trên cơ sở mô hình động lực học chuyển động và mô phỏng khảo sát trên phần mềm Matlab Simulink kết hợp Carsim. Các kết quả khảo sát thu được nhằm đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển PID và bộ điều khiển Logic mờ đối với hệ thống cân bằng điện tử ESC đến quỹ đạo chuyển động và sự ổn định tổng thể của xe, thông qua đó giúp lựa chọn được luật điều khiển hợp lý, nâng cao hiệu quả kiểm soát ổn định xe.

Từ khóa: Hệ thống cân bằng điện tử; ESC; Mô hình động lực học; Dao động ô tô; Bộ điều khiển PID; Bộ điều khiển Logic mờ.

1. Giới thiệu

Hiện nay, nhu cầu về an toàn trong giao thông ngày càng gia tăng, các hệ thống hỗ trợ lái xe an toàn chủ động như hệ thống cân bằng điện tử (ESC), đang trở thành một phần không thể thiếu trong thiết kế và sản xuất ô tô hiện đại. Hệ thống ESC đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo sự ổn định của xe khi di chuyển, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp. Các yếu tố như lực ly tâm, tốc độ và điều kiện mặt đường đều có thể làm giảm khả năng kiểm soát của người lái, dẫn đến nguy cơ mất ổn định và gây ra tai nạn.

Hiện nay, có một số nghiên cứu về luật điều khiển cho hệ thống ESC, trong đó bộ điều khiển PID [1], [2], [3] và Logic mờ (Fuzzy Logic) [4], [5] là

hai phương pháp phổ biến. Bộ điều khiển PID hoạt động dựa trên việc hiệu chỉnh sai số giữa giá trị mong muốn và giá trị thực tế bằng ba thành phần: tỷ lệ (P), tích phân (I), và đạo hàm (D). PID được biết đến với cấu trúc đơn giản và phản ứng nhanh trong nhiều ứng dụng điều khiển. Tuy nhiên, PID có thể gặp hạn chế khi xử lý các hệ thống phi tuyến như ESC, đặc biệt khi xe hoạt động trong các điều kiện phức tạp.

Trong khi đó, bộ điều khiển Logic mờ được thiết kế để hoạt động hiệu quả trong các hệ thống phi tuyến và không chắc chắn. Logic mờ sử dụng các luật điều khiển dựa trên suy luận mờ, cho phép mô hình hóa hành vi của hệ thống mà không cần một mô hình toán học chính xác. Điều này giúp

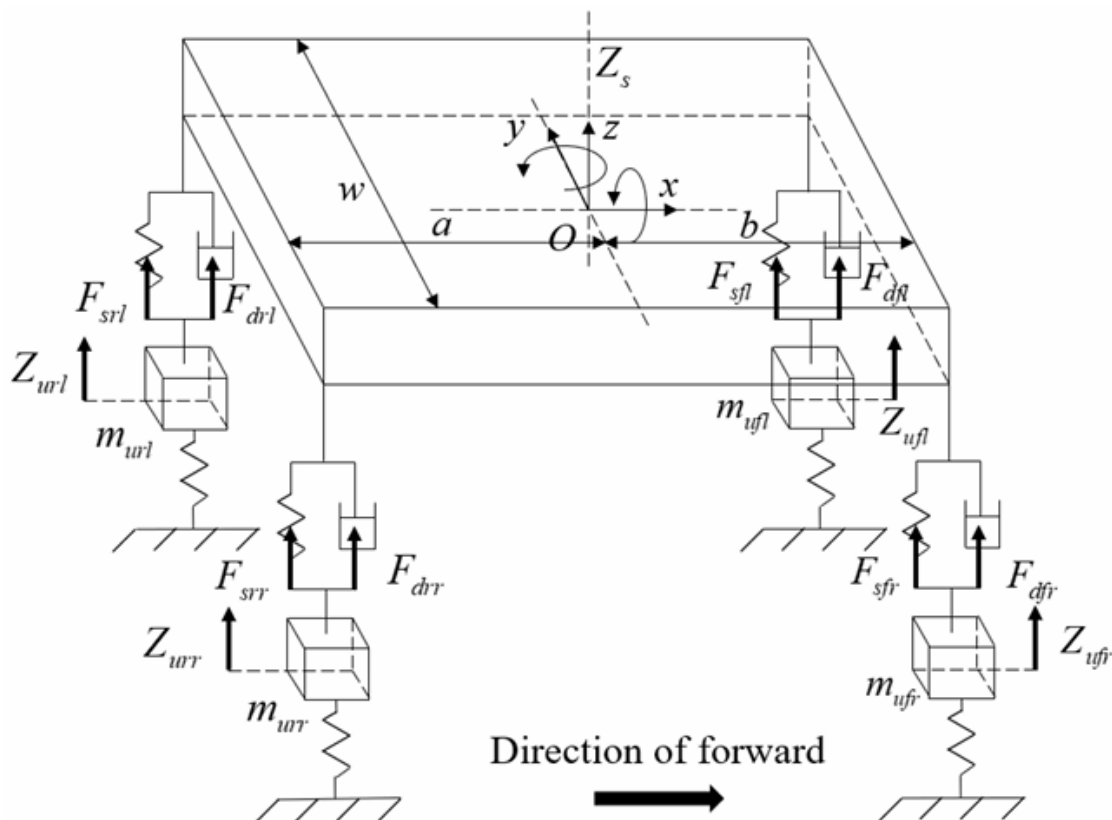
Logic mờ có khả năng thích ứng cao hơn trong các điều kiện lái xe thay đổi. Tuy nhiên, hiệu suất của Logic mờ phụ thuộc vào việc thiết lập tập luật điều khiển và quá trình hiệu chỉnh có thể phức tạp hơn so với PID.

Tuy nhiên, hầu hết các công trình chỉ nghiên cứu riêng lẻ từng phương pháp điều khiển mà chưa thực hiện so sánh trực tiếp hiệu quả của các bộ điều khiển trên cùng một mô hình động lực học và trong cùng điều kiện thử nghiệm. Vì vậy, mục tiêu của bài báo này là thiết kế và đánh giá hai bộ điều khiển PID và Logic mờ cho hệ thống cân bằng điện tử ESC dựa trên mô phỏng CarSim–Simulink,

từ đó so sánh ưu nhược điểm và đề xuất lựa chọn luật điều khiển phù hợp nhằm nâng cao độ ổn định và an toàn khi xe di chuyển.

2. Mô hình động lực học

Mô hình động lực học bao gồm 14 bậc tự do được chia thành hai phần: mô hình hệ thống dao động không gian 7 bậc tự do và mô hình động lực học chuyển động trong mặt phẳng 7 bậc tự do. Nó bao gồm 6 bậc tự do dành cho chuyển động tịnh tiến và quay của thân xe theo các trục x , y , z ; 4 bậc tự do cho chuyển động thẳng đứng của bốn hệ thống treo và 4 bậc tự do dành cho chuyển động quay của các bánh xe.

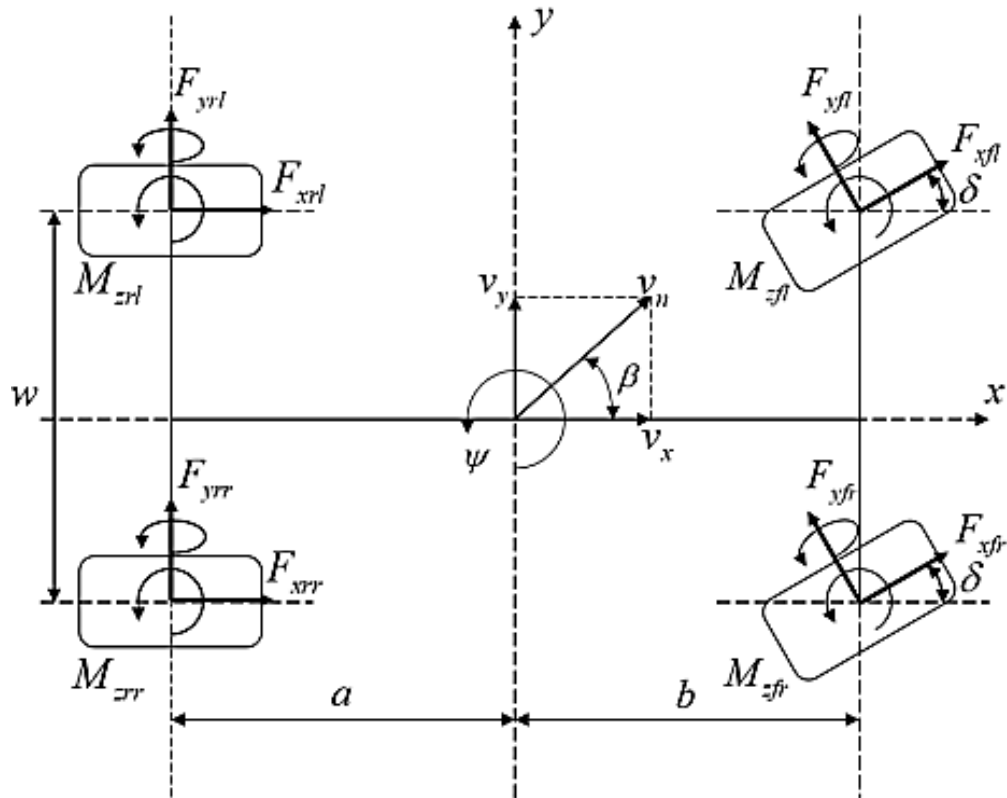


Hình 1. Mô hình dao động không gian [3]

Với mô hình dao động không gian ô tô (Hình 1): Thân xe xem như cứng tuyệt đối. Các phần tử đàn hồi và phần tử giảm chấn trong mô hình có đặc tính tuyến tính, không xét đến lực cản của lốp và xe chuyển động trên đường bằng phẳng, đồng nhất.

Hình 2 minh họa mô hình ô tô hai vết nghiên cứu chuyển động của ô tô với giả thiết lốp đàn hồi chuyển động trên nền đường cứng, luôn tiếp xúc

với mặt đường, hệ số cản lăn ở các bánh xe coi như bằng nhau và không đổi; lực cản không khí và tải trọng tĩnh phân bố đối xứng theo phương chuyển động của ô tô; cầu trước dẫn hướng và góc quay của hai trục tọa độ như hình vẽ. Với chuyển động quay, quy ước chiều dương được xác định là chiều quay ngược chiều kim đồng hồ (khi nhìn từ trên xuống).



Hình 2. Mô hình động lực học chuyển động hai vết của ô tô [3]

Các ký hiệu trong mô hình: m_s là khối lượng phần treo của ô tô; F_{sfl} , F_{sfr} , F_{srl} , F_{srr} là lực đàn hồi của hệ thống treo tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; F_{dfl} , F_{dfr} , F_{drl} , F_{drr} là lực cản giảm chấn của hệ thống treo tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; a , b là khoảng cách từ trọng tâm đến cầu sau và cầu trước; w là chiều rộng cơ sở của ô tô; I_x , I_y là momen quán tính khối lượng treo đối với trục x và trục y .

F_{xfl} , F_{xfr} , F_{xrl} , F_{xrr} là lực tác dụng theo phương x tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; F_{yfl} , F_{yfr} , F_{yrl} , F_{yrr} là lực tác dụng theo phương y tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; m_t là khối lượng của ô tô; δ là góc đánh lái. Với F_{tfl} , F_{tfr} , F_{trl} , F_{trr} là lực đàn hồi của lớp xe tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; m_{ufl} , m_{ufr} , m_{url} , m_{urr} là khối lượng không được treo tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải; Z_{ufl} , Z_{ufr} , Z_{url} , Z_{urr} là dịch chuyển của khối lượng không được treo tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và

bánh sau phải; M_{zfl} , M_{zfr} , M_{zrl} , M_{zrr} là mô men quanh trục z tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải.

Hệ phương trình dao động không gian ô tô [3]:

$$F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr} = m_s \ddot{Z}_s \quad (1)$$

$$(F_{srl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr})b - (F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr})a = I_y \ddot{\theta} \quad (2)$$

$$(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{srl} + F_{drl})\frac{w}{2} - (F_{sfr} + F_{dfr} + F_{srr} + F_{drr})\frac{w}{2} = I_x \ddot{\theta} \quad (3)$$

Phương trình dao động của bốn bánh xe [3]:

$$F_{tfl} - F_{sfl} - F_{dfl} = m_{ufl} \ddot{Z}_{ufl} \quad (4)$$

$$F_{tfr} - F_{sfr} - F_{dfr} = m_{ufr} \ddot{Z}_{ufr} \quad (5)$$

$$F_{trl} - F_{srl} - F_{drl} = m_{url} \ddot{Z}_{url} \quad (6)$$

$$F_{trr} - F_{srr} - F_{drr} = m_{urr} \ddot{Z}_{urr} \quad (7)$$

Hệ phương trình động lực học của ô tô trong mặt phẳng:

$$F_{xfl} \cos \delta - F_{yfl} \sin \delta + F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr} = m_t (\dot{v}_x - v_y \dot{\psi}) \quad (8)$$

$$F_{yfl} \cos \delta + F_{xfl} \sin \delta + F_{yfr} \cos \delta + F_{xfr} \sin \delta + F_{yrl} + F_{yrr} = m_t (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{W}{2}F_{xfl}\cos\delta + \frac{W}{2}F_{xfr}\cos\delta - \frac{W}{2}F_{xrl} \\
& + \frac{W}{2}F_{xrr} + \frac{W}{2}F_{yfl}\sin\delta - \frac{W}{2}F_{yfr}\sin\delta \\
& + bF_{xfl}\sin\delta + bF_{yfl}\cos\delta + bF_{xfr}\sin\delta \\
& + bF_{yfr}\cos\delta - aF_{yrl} - aF_{yrr} + M_{zfl} \\
& + M_{zfr} + M_{zrl} + M_{zrr} = I_z\ddot{\psi}
\end{aligned} \quad (10)$$

Động lực học của bốn bánh xe được biểu diễn bằng các phương trình sau:

$$I_w\dot{\omega}_{fl} = M_{dfl} - M_{bfl} - F_{xfl}R_w \quad (11)$$

$$I_w\dot{\omega}_{fr} = M_{dfr} - M_{bfr} - F_{xfr}R_w \quad (12)$$

$$I_w\dot{\omega}_{rl} = M_{drl} - M_{brl} - F_{xrl}R_w \quad (13)$$

$$I_w\dot{\omega}_{rr} = M_{drr} - M_{brr} - F_{xrr}R_w \quad (14)$$

với I_w , R_w là momen quán tính và bán kính động lực học của các bánh xe; ω_{fl} , ω_{fr} , ω_{rl} , ω_{rr} ; M_{dfl} , M_{dfr} , M_{drl} , M_{drr} ; M_{bfl} , M_{bfr} , M_{brl} , M_{brr} là vận tốc góc, momen dẫn động truyền tới và momen phanh tại bánh trước trái, bánh trước phải, bánh sau trái và bánh sau phải.

Momen phanh tại mỗi bánh xe tính theo diện tích má phanh A_w , hệ số ma sát của má phanh μ_p , bán kính phanh R_p và áp suất phanh P_{pi} [6]:

$$M_{bi} = A_w\mu_p R_{pi}P_{pi} \quad \text{với } i = 1, \dots, 4 \quad (15)$$

Theo công thức Magic Formula do H.B. Pacejka đề xuất, công thức tính lực dọc F_x được xác định bằng cách khớp dữ liệu thử nghiệm lốp theo công thức kết hợp của các hàm lượng giác và lực lốp [3]:

$$F_x = D_x \sin\{C_x \arctan[B_x X_1 - E_x(B_x X_1 - \arctan(B_x X_1))]\} \quad (16)$$

Công thức tính lực ngang F_y :

$$F_y = D_y \sin\{C_y \arctan[B_y X_2 - E_y(B_y X_2 - \arctan(B_y X_2))]\} \quad (17)$$

Công thức tính momen tự cân bằng của lốp M_z :

$$M_z = D_z \sin\{C_z \arctan[B_z X_3 - E_z(B_z X_3 - \arctan(B_z X_3))]\} \quad (18)$$

trong đó X là góc lệch bên hoặc độ trượt dọc (tùy theo lực nào đang xét); D là hệ số đỉnh; B là hệ số độ cứng; C là hệ số dạng đường; E là hệ số độ cong đường cong. Các hệ số này đặc trưng cho kết cấu và đặc trưng của từng loại lốp riêng.

Mô hình dao động 7 bậc tự do, mô hình động

lực học chuyển động 7 bậc tự do và mô hình lớp mô tả chuyển động tổng quát của thân xe.

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1. Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID được thiết kế dựa trên cơ sở giảm thiểu sai lệch e giữa vận tốc góc quay thân xe mong muốn và vận tốc góc quay thân xe thực tế trong quá trình chuyển động.

Vận tốc góc quay thân xe thực tế nhận từ cảm biến (lấy từ khối mô phỏng động lực học trong CarSim) và vận tốc góc quay thân xe mong muốn được tính toán góc đánh lái và vận tốc chuyển động của ô tô (từ khối tính toán trong Matlab – Simulink) theo công thức sau [6]:

$$\dot{\psi} = \frac{\delta x}{a+b + \frac{mx(aC_{ar} - bC_{af})}{2C_{ar}C_{af}}} \quad (19)$$

với C_{ar} và C_{af} là độ cứng ngang của lốp trước và lốp sau.

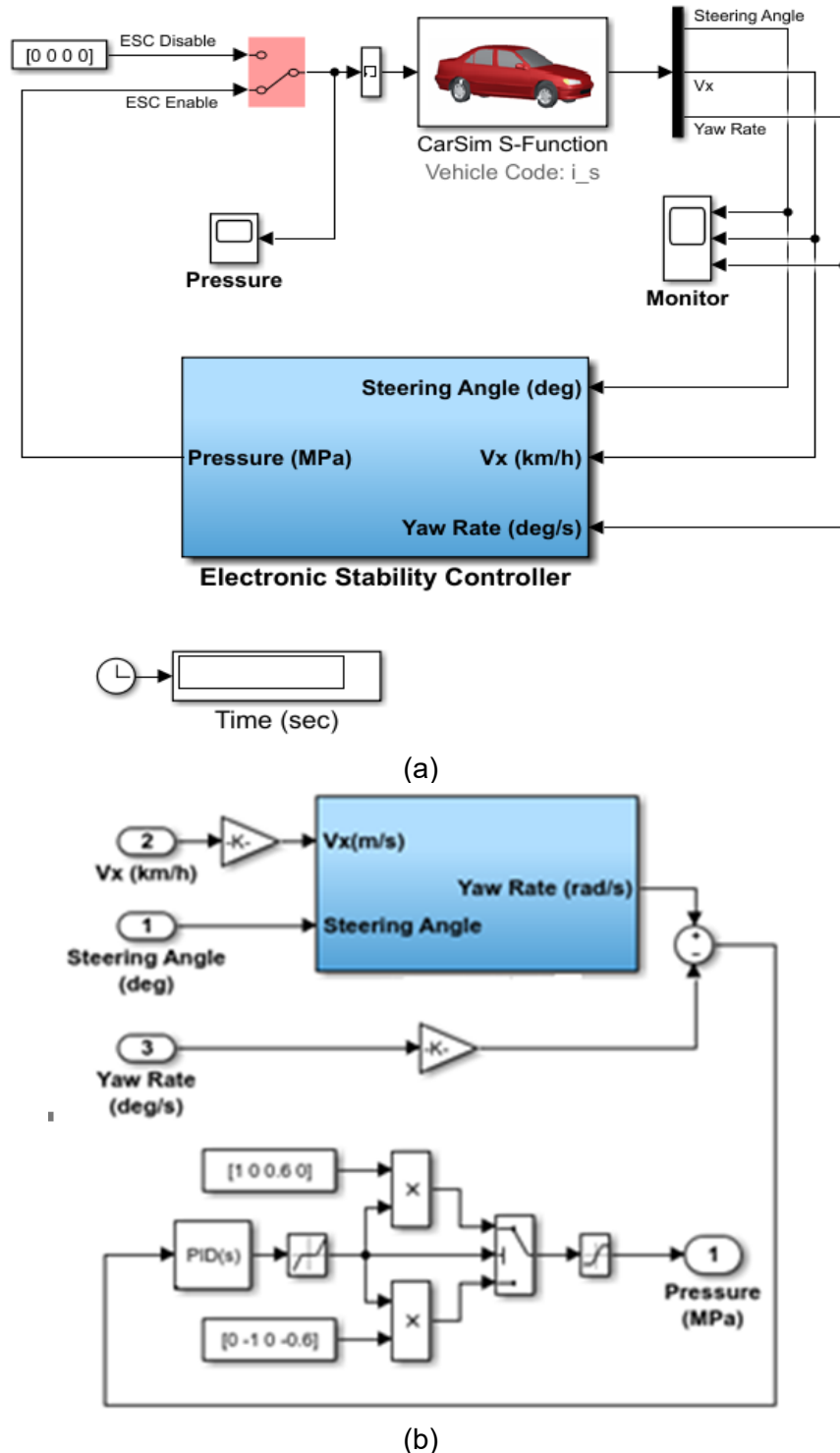
Mô hình động lực học được mô phỏng trong CarSim và bộ điều khiển PID được tích hợp vào bộ điều khiển (Hình 3). Hình 3a là mô hình liên kết giữa CarSim và Simulink bao gồm các khối chức năng chính: bộ bật/tắt ESC, mô hình động lực học xe trong CarSim, bộ điều khiển ESC. Hình 3b là mô hình hệ thống ESC, bao gồm các khối chính: các tham số đầu vào như vận tốc, góc đánh lái, vận tốc góc quay thân xe thực tế; khối tính toán vận tốc quay thân xe mong muốn và bộ điều khiển PID. Sau khối PID là khối Dead Zone để loại bỏ vùng sai số nhỏ (nhiều hoặc lệch nhỏ), tránh trường hợp ESC can thiệp khi sai lệch không đáng kể. Khối Product (khối x) nhân đầu ra PID với véc tơ phân phối lực phanh. Khối Switch (sau khối product) đóng vai trò lựa chọn giữa ba tín hiệu điều khiển khác nhau, tương ứng với các tình huống mất ổn định của xe. Giá trị đầu vào điều kiện là giá trị sau khối Dead Zone. Nếu đầu vào dương tương ứng với việc phân bố lực phanh về bên trái để tạo mô men quay ngược chiều kim đồng hồ. Ngược lại, nếu đầu vào âm phân bố lực phanh về bên phải nhằm tạo mô men quay theo chiều kim đồng hồ. Trong trường hợp đầu vào bằng 0, khối Switch chọn tín hiệu đầu ra bằng 0, tương ứng với không

điều khiển.

Đầu vào của bộ điều khiển PID là sai số giữa giá trị vận tốc góc quay thân xe mong muốn và giá trị vận tốc góc quay thân xe thực tế, đầu ra là tín hiệu điều khiển áp suất phanh trên từng bánh xe.

Trong nghiên cứu này, mô hình xe được mô phỏng bằng phần mềm CarSim – là một mô hình

phi tuyến, phức tạp nên việc xác lập một hàm truyền tuyến tính cụ thể cho toàn hệ thống là không khả thi. Do đó, nhóm tác giả lựa chọn phương pháp điều chỉnh thông số PID thủ công, tức là tác giả điều chỉnh từng thông số để lựa chọn giá trị phù hợp. Tác giả xác định được các thông số của bộ điều khiển PID là $K_P = 37$; $K_I = 100$; $K_D = 0.1$.



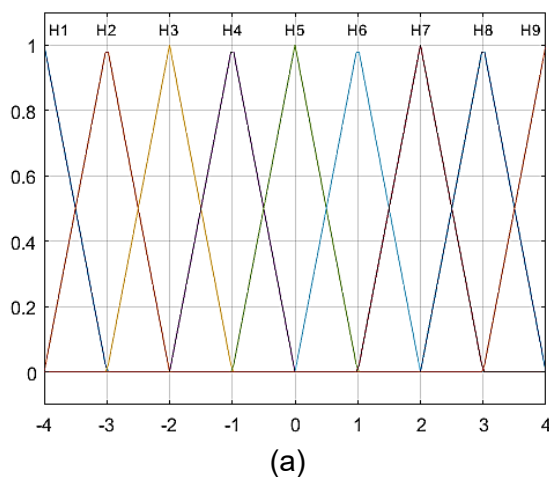
Hình 3. Mô hình mô phỏng liên kết CarSim – Simulink (a); và mô hình hệ thống ESC với bộ điều khiển PID (b).

3.2. Bộ điều khiển Logic mờ

Bài báo sử dụng MATLAB® (Natick, MA, USA) Fuzzy Logic Toolbox™ để thiết kế bộ điều khiển logic mờ. Ban đầu, các biến đầu vào và đầu ra cần được xác định. Các đầu vào của hệ thống ESC bao gồm vận tốc góc quay thân xe và góc đánh lái do người lái điều khiển (Hình 4).

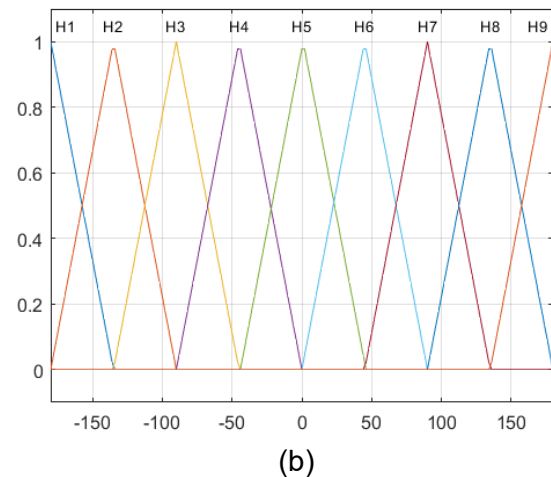
Hệ thống ESC được kích hoạt đồng thời với bàn đạp phanh và sẽ tắt khi tốc độ xe giảm xuống dưới 8 km/h. Đầu ra của hệ thống ESC là áp suất phanh, làm đầu vào cho mô hình động lực học xe trong CarSim. Bộ điều khiển logic mờ của ESC kiểm soát cả hai bên của xe. Từ đó, có thể điều chỉnh áp suất phanh của bánh xe bên phải hoặc bên trái, tùy thuộc vào hướng quay thân xe.

Các đầu vào và đầu ra được mô tả bằng biểu

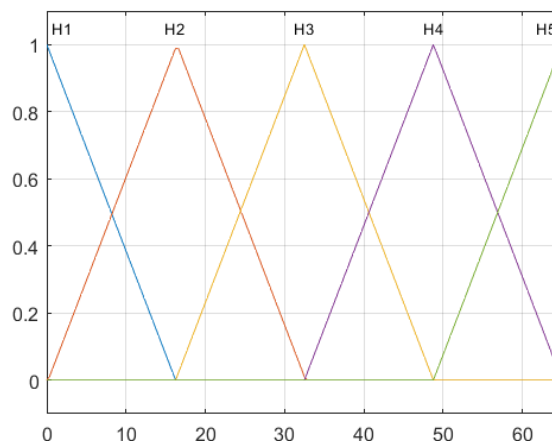


(a)

diễn dưới dạng hàm thành viên mờ ($H_i, i = 1, 2, \dots$). Đầu vào đầu tiên của bộ điều khiển logic mờ là tốc độ quay thân xe. Trạng thái này bao gồm chín hàm thành viên ($H1:H9$); miền giá trị được giới hạn trong khoảng $[-4, 4]$ và được trình bày trong Hình 4a. Đầu vào thứ hai là góc đánh lái với các hàm thành viên được trình bày trong Hình 4b. Giống như đầu vào thứ nhất, nó có chín hàm thành viên phân bố đối xứng, được giới hạn trong khoảng $[-180, 180]$ độ. Giả thiết đặt ra là phản ứng của người lái trong các tình huống khẩn cấp phải được giới hạn trong một nửa vòng quay của vô lăng về mỗi bên, tương đương với tổng cộng 360° . Áp suất tối đa của hệ thống phanh trong trường hợp nghiêm cứu là 65 bar. Miền giá trị của biến áp suất phanh đầu ra p (Hình 4c) nằm trong khoảng $[0, 65]$ và bao gồm năm hàm thành viên ($H1:H5$).



(b)



(c)

Hình 4. Đầu vào và đầu ra của bộ điều khiển logic mờ:

(a) Đầu vào ψ ; (b) Đầu vào δ ; (c) Đầu ra p .

Các quy tắc của Logic mờ được thể hiện trong Bảng 1. Hệ thống này có cấu trúc nhiều đầu

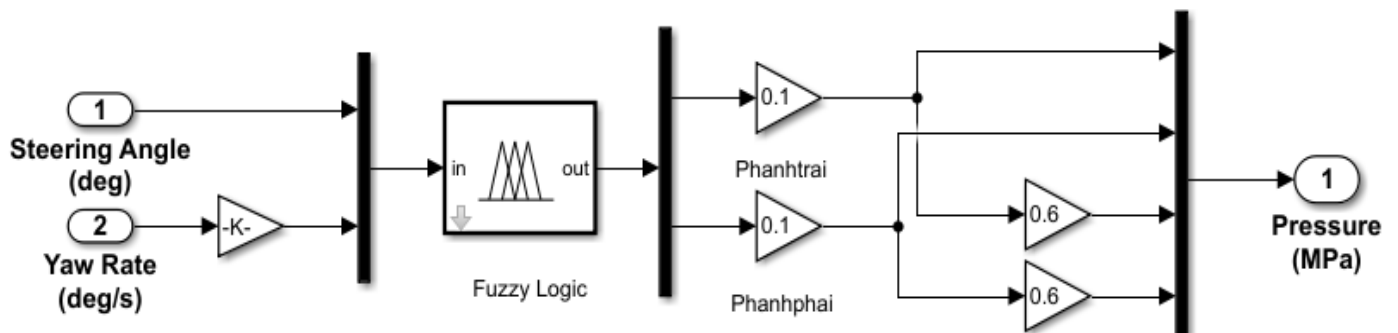
vào, nhiều đầu ra. Tổng cộng, 81 quy tắc được sử dụng để kiểm soát trạng thái của hệ thống. Trong

bài báo này, để suy luận mờ sử dụng phương pháp Mamdani và giải mờ bằng phương pháp giá trị nhỏ nhất của cực đại.

Sau khi biểu diễn được các đầu vào và đầu ra, mô hình hệ thống ESC tích hợp bộ điều khiển Logic mờ được mô phỏng như Hình 5.

Bảng 1. Các quy tắc ngôn ngữ mờ cho điều khiển ESC: màu xanh – áp suất phanh bên trái của xe, màu đen – áp suất phanh bên phải của xe [7]

δ ψ	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉
H ₁	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃	H ₃	H ₄	H ₄	H ₅	H ₅
H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃	H ₃	H ₄	H ₄	H ₅
H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃	H ₃	H ₄	H ₄
H ₄	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃	H ₃	H ₄
H ₅	H ₃	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃	H ₃
H ₆	H ₄	H ₃	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂	H ₃
H ₇	H ₄	H ₄	H ₃	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂	H ₂
H ₈	H ₅	H ₄	H ₄	H ₃	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁	H ₂
H ₉	H ₅	H ₅	H ₄	H ₄	H ₃	H ₃	H ₂	H ₂	H ₁ H ₁



Hình 5. Sơ đồ hệ thống cân bằng điện tử ESC với bộ điều khiển Logic mờ

4. Kết quả và đánh giá

Bộ điều khiển ESC được mô phỏng trong Carsim sử dụng mô hình xe D-Class SUV với bài kiểm tra chuyển làn kép (Double Lane Change – Hình 6) với vận tốc 50 km/h (13,89 m/s) trong quá trình mô phỏng.

Hình 7 thể hiện quỹ đạo chuyển động của trọng tâm ô tô trong bài kiểm tra chuyển làn kép khi sử dụng bộ điều khiển PID và Logic mờ. Trong cả hai trường hợp, quỹ đạo của trọng tâm xe đều gần với quỹ đạo thiết kế và ổn định khi xe trở về đúng làn đường.

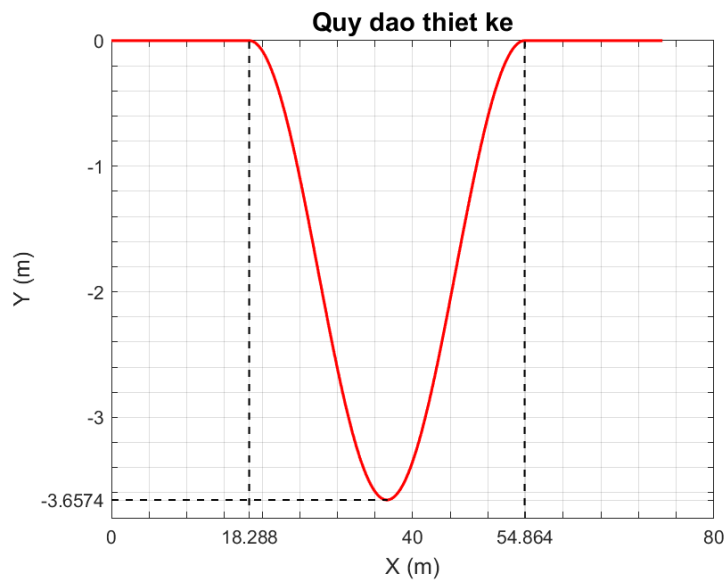
Hình 8 biểu diễn theo thời gian của: Góc

đánh lái, gia tốc ngang, vận tốc góc quay thân xe và sai lệch vận tốc góc quay thân xe. Có thể thấy rằng PID kiểm soát sai số vận tốc góc quay thân xe tốt hơn, giúp đưa tốc độ quay thân xe về giá trị mong muốn nhanh hơn so với Logic mờ. Tuy nhiên, PID có xu hướng gây ra dao động mạnh hơn, đặc biệt là ở gia tốc ngang (Bảng 2) khiến xe có thể bị rung lắc khi đổi làn.

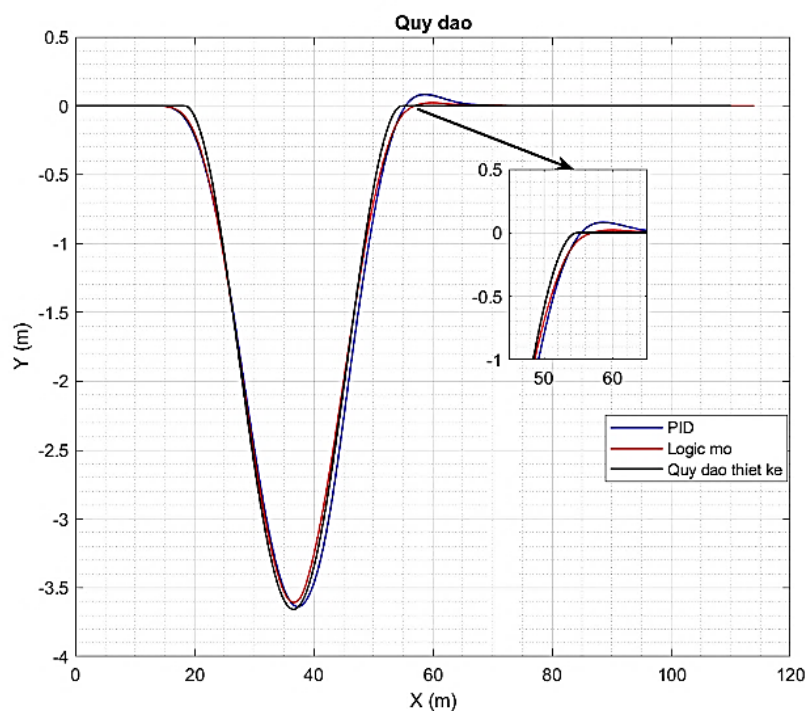
Hình 9 là áp suất phanh trên các bánh xe khi ESC hoạt động. Việc điều chỉnh áp suất phanh tại các bánh xe đóng vai trò quan trọng trong việc giữ cân bằng và ổn định cho xe. Cụ thể, khi xe có nguy cơ mất ổn định (ví dụ như quay vòng thừa hoặc

quay vòng thiếu), hệ thống ESC sẽ điều khiển áp suất phanh tăng hoặc giảm tại từng bánh xe, từ đó sinh ra mô men bù giúp đưa vận tốc quay thân xe ψ về gần giá trị mong muốn. Nhờ vậy, xe duy trì được quỹ đạo di chuyển ổn định, đặc biệt trong các tình huống đánh lái gấp hoặc chuyển làn đột ngột. Dấu hiệu can thiệp này được thể hiện rõ qua sự biến thiên của áp suất phanh theo thời gian ở các bánh xe. Áp suất phanh của bộ điều khiển PID biến thiên liên tục theo thời gian, thể hiện dưới dạng

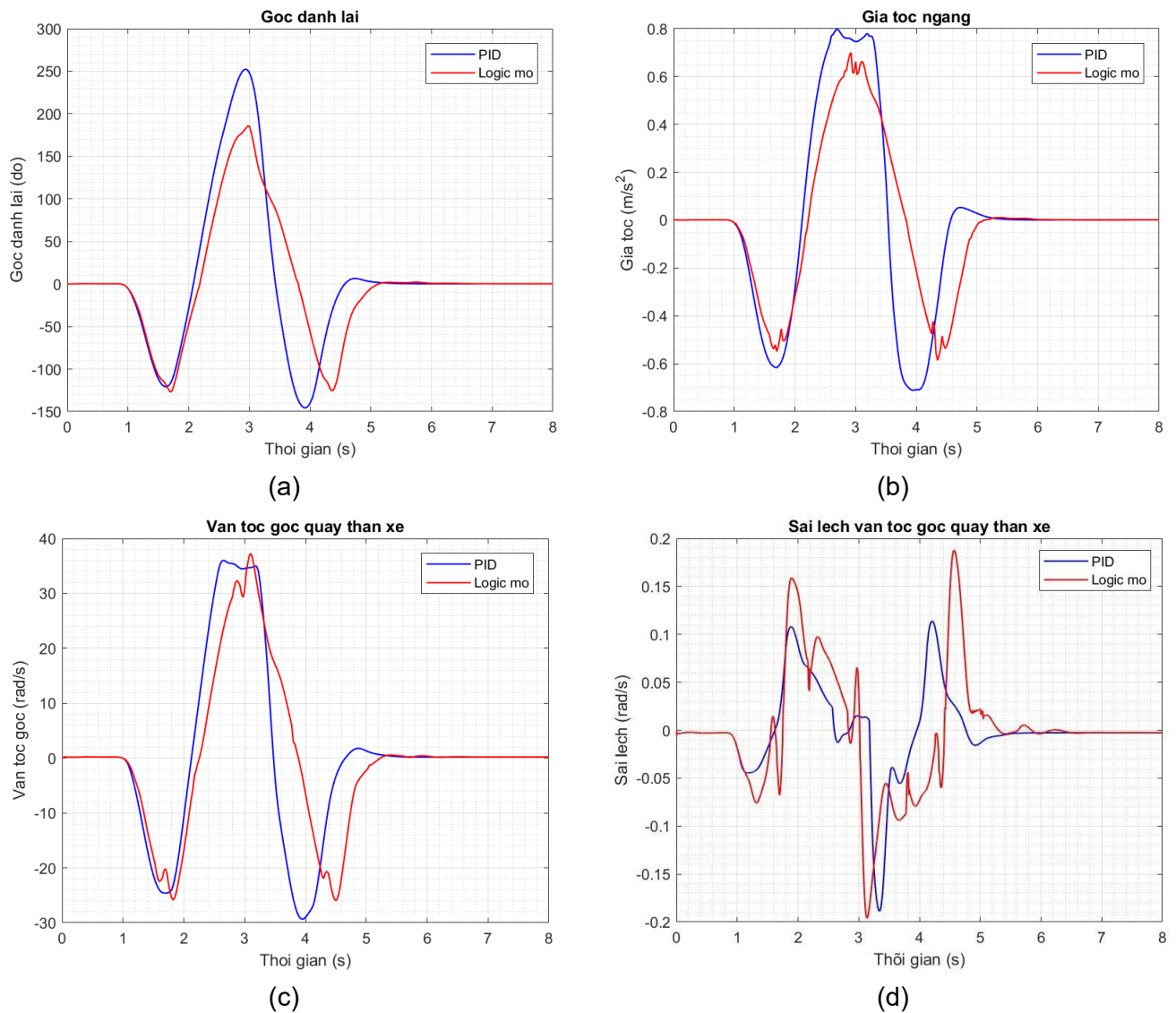
đường cong, giúp phản ứng nhanh với sai số yaw rate nhưng dễ gây dao động, ảnh hưởng đến độ ổn định của xe. Ngược lại, áp suất phanh của bộ điều khiển Logic mờ có dạng bậc thang, phản ánh sự điều chỉnh theo từng mức cố định, giúp hệ thống phanh hoạt động ổn định hơn và hạn chế dao động không mong muốn. Tuy nhiên, đặc điểm này có thể làm giảm tốc độ phản ứng của hệ thống trong một số tình huống khẩn cấp. Do đó, PID phù hợp hơn khi yêu cầu phản ứng nhanh.



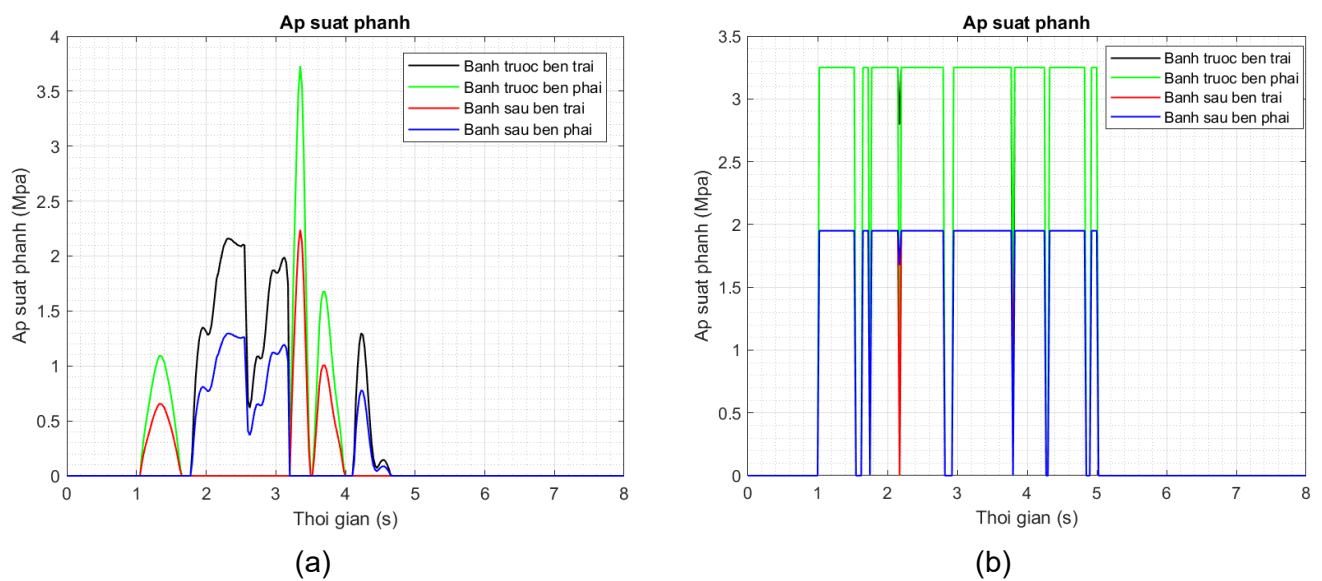
Hình 6. Kích thước đường mô phỏng chuyển làn kép



Hình 7. Quỹ đạo của trọng tâm ô tô với bộ điều khiển PID và Logic mờ



Hình 8. Các thông số khảo sát khi sử dụng ESC với PID và Logic mờ: (a) Góc đánh lái; (b) Gia tốc ngang; (c) Vận tốc góc quay thân xe; (d) Sai lệch vận tốc góc quay thân xe



Hình 9. Áp suất phanh trên các bánh xe với bộ điều khiển PID (a) và Logic mờ (b).

Bảng 2. So sánh hai bộ điều khiển PID và Logic mờ

	Quỹ đạo	Sai lệch vận tốc góc quay thân xe	Gia tốc ngang lớn nhất	Áp suất phanh
	RRMSE	IAE	a_{max}	IACA
PID	0.36%	0.197	0.797	133.34
Logic mờ	1.65%	0.309	0.701	102.28

Để đánh giá cụ thể hơn hai bộ điều khiển, tác giả đưa ra sai lệch tương đối bình phương trung bình của quỹ đạo chuyển động, tích phân của sai số tuyệt đối IAE, tích phân của độ lớn tuyệt đối của tác động điều khiển (áp suất phanh) IACA và gia tốc ngang lớn nhất. Giá trị IAE và IACA cho thấy mức độ tác động của từng bộ điều khiển [8].

Từ Bảng 2, ta thấy bộ điều khiển Logic mờ can thiệp ít hơn (qua giá trị IACA – giá trị càng lớn thể hiện sự can thiệp của hệ thống càng lớn) nên sai lệch vận tốc góc quay thân xe lớn hơn (qua giá trị IAE – giá trị càng lớn thì sai lệch càng lớn). Điều này một phần đến từ bộ quy tắc mờ chưa được tối ưu hóa. Ngược lại, bộ điều khiển PID giữ sai lệch tốc độ quay thân xe ở mức thấp hơn và can thiệp của bộ điều khiển nhiều hơn. Vì thế, quỹ đạo trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển PID tốt hơn (giá trị RRMSE nhỏ hơn). Tuy nhiên, cả hai bộ điều khiển đều duy trì được quỹ đạo của xe so với quỹ đạo đã thiết kế ban đầu (giá trị RRMSE đều dưới 10%).

5. Kết luận

Như vậy, trong nghiên cứu này, tác giả đã xây dựng mô hình động lực học của ô tô bao gồm mô hình dao động không gian kết hợp với mô hình hai vệt bánh xe, và triển khai mô phỏng tích hợp giữa CarSim và Simulink. Trên cơ sở đó, hai bộ điều khiển ESC sử dụng PID và Logic mờ đã được thiết kế nhằm điều chỉnh áp suất phanh tại các bánh xe, góp phần ổn định chuyển động của xe khi thực hiện bài kiểm tra chuyển làn kép ở tốc độ 50 km/h. Kết quả mô phỏng cho thấy cả hai bộ điều khiển đều giúp ô tô giữ ổn định quỹ đạo và hoạt động ổn định. Tuy nhiên, bộ điều PID theo dõi sai lệch vận tốc góc quay thân xe tốt hơn và điều chỉnh hệ thống phanh liên tục để bám theo vận tốc quay thân xe mong muốn. Trong khi Logic mờ có thể can

thiệp đến hệ thống phanh ít hơn nhưng vẫn đảm bảo quỹ đạo chuyển động của xe. Việc so sánh này giúp làm rõ ưu nhược điểm của từng phương pháp và hỗ trợ đề xuất lựa chọn luật điều khiển phù hợp cho hệ thống ESC trong điều kiện thực tế. Như vậy, cả hai bộ điều khiển đều có thể sử dụng cho hệ thống ESC. Tuy nhiên, cả hai bộ điều khiển đều đòi hỏi việc tối ưu hóa các tham số đối với điều khiển PID cũng như các quy tắc ngôn ngữ mờ đối với điều khiển Logic mờ để hệ thống hoạt động tối ưu hơn.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là nghiên cứu đưa ra các tham số PID tối ưu hơn, bộ quy tắc mờ phù hợp hơn với hệ thống cân bằng điện tử ESC cũng như sử dụng các thuật toán điều khiển khác như LQR (Linear Quadratic Regulator), MPC (Model Predictive Control), ... cho hệ thống cân bằng điện tử ESC. Từ đó, làm cơ sở để so sánh các bộ điều khiển hoặc kết hợp các thuật toán điều khiển với nhau nhằm nâng cao độ ổn định và chính xác của hệ thống.

Tài liệu tham khảo

- [1] Đ.H. Hải. (2023). Nghiên cứu điều khiển ổn định quỹ đạo chuyển động của ô tô bằng hệ thống phanh. *Luận án tiến sĩ. Trường Đại học Giao thông Vận tải. Hà Nội.*
- [2] V.V. Tấn. (2020). Công nghệ thiết kế bộ điều khiển PID cho chương trình ổn định điện tử trên ô tô. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 56(5), 88-91.
- [3] Z. Wu, C. Kang, B. Li, J. Ruan, and X. Zheng. (2024). Dynamic Modeling, Simulation, and Optimization of Vehicle Electronic Stability Program Algorithm Based on Back Propagation Neural Network and PID Algorithm. *Actuators*, 13(3), 100. <https://doi.org/10.3390/act13030100>

- [4] L. Piancastelli, L. Frizziero, S. Marcoppido, E. Pezzuti. (2011). A Fuzzy Control Algorithm for the Electronic Stability Program optimized for tyre burst control.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1104.1582>
- [5] B. Li and F. Yu. (2010). Design of a vehicle lateral stability control system via a fuzzy logic control approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(3). doi: 10.1243/09544070JAUTO1279
- [6] R. Rajamani. (2006). Vehicle Dynamics and Control. doi: 10.1007/0-387-28823-6
- [7] A. Aksjonov, K. Augsburg, V. Vodovozov. (2016). Design and simulation of the robust ABS and ESP fuzzy logic controller on the complex braking maneuvers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(12), 382. doi: 10.3390/app6120382
- [8] A. Medina, G. Bistue, and A. Rubio. (2021). Comparison of Typical Controllers for Direct Yaw Moment Control Applied on an Electric Race Car. *Vehicles*, 3(1), 127-144. doi: 10.3390/vehicles30