

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC XE TẢI QUAY VÒNG CÓ TRANG BỊ HỆ THỐNG PHANH HỖ TRỢ KHẨN CẤP VÀ PHÂN PHỐI LỰC PHANHNguyễn Văn Nam¹, Đào Đức Thọ^{1*}¹Trường Đại học Thành Đông*Tác giả liên hệ: thudd@thanhdong.edu.vn**TÓM TẮT**

Hệ thống cân bằng điện tử (ESP – Electronic Stability Program) là một công nghệ an toàn chủ động quan trọng, giúp duy trì ổn định chuyển động của xe trong các điều kiện vận hành phức tạp như khi quay vòng hoặc di chuyển trên mặt đường có hệ số bám thấp. Nghiên cứu này tập trung xây dựng mô hình toán học và mô phỏng quá trình quay vòng của xe du lịch có trang bị hệ thống ESP nhằm phân tích ảnh hưởng của hệ thống này đến động lực học phương tiện. Mô hình được thiết lập dựa trên lý thuyết cơ học kỹ thuật và động lực học ô tô, tích hợp các yếu tố như lực ngang, mô men quán tính và tải trọng tác dụng lên bánh xe. Phần mềm Matlab Simulink kết hợp với phương pháp Polynomial Chaos được sử dụng để mô phỏng chuyển động của xe trên các điều kiện mặt đường khác nhau, với vận tốc ban đầu từ 20 km/h đến 80 km/h. Kết quả cho thấy ở vận tốc thấp, sự khác biệt giữa xe có và không có ESP là không đáng kể. Tuy nhiên, ở vận tốc cao hoặc trên mặt đường trơn trượt, hệ thống ESP giúp giảm hiện tượng mất lái, đánh lái thừa và lệch quỹ đạo rõ rệt. Mô hình mô phỏng cho thấy tính phù hợp cao với các nghiên cứu trước và có tiềm năng ứng dụng trong đào tạo kỹ sư cũng như phát triển hệ thống điều khiển ổn định trên phương tiện hiện đại.

Từ khóa: Động lực học ô tô, Hệ thống cân bằng điện tử (ESP), Quay vòng ô tô, Mô phỏng điều khiển xe.

STUDY ON THE DYNAMICS OF TURNING TRUCKS EQUIPPED WITH EMERGENCY BRAKE ASSIST AND BBRAKE FORCE DISTRIBUTION SYSTEMS**ABSTRACT**

The Electronic Stability Program (ESP) is a crucial active safety technology that helps maintain vehicle stability during complex driving conditions such as cornering or driving on low-friction road surfaces. This study focuses on developing a mathematical model and simulating the cornering behavior of a passenger vehicle equipped with ESP to analyze the system's impact on vehicle dynamics. The model is built based on engineering mechanics and vehicle dynamics theory, incorporating factors such as lateral forces, inertial moments, and wheel load distribution. Matlab Simulink software, combined with the Polynomial Chaos method, is used to simulate vehicle motion under different road conditions, with initial speeds ranging from 20 km/h to 80 km/h. The simulation results show that at low speeds, the difference between vehicles with and without ESP is minimal. However, at higher speeds or on slippery roads, the ESP system significantly reduces oversteering, trajectory deviation, and the risk of loss of control. The developed simulation model demonstrates strong consistency with previous studies and offers practical applications in training mechanical engineers as well as in designing advanced stability control systems for modern vehicles.

Keywords: Vehicle dynamics, Electronic Stability Program (ESP), Vehicle turning, Vehicle Control Simulation.

Ngày nhận bài: 01/02/2025 Ngày nhận bài sửa: 07/05/2025 Ngày duyệt đăng bài: 25/05/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghiệp ô tô hiện đại không chỉ tập trung vào nâng cao hiệu suất vận hành mà còn đặt mục tiêu tối ưu hóa độ an toàn và sự ổn định của phương tiện. Trong số các công nghệ an toàn chủ động, hệ thống cân bằng điện tử ESP đã trở thành một tiêu chuẩn không thể thiếu trên hầu hết các dòng xe du lịch, đặc biệt là các mẫu xe hạng trung và cao cấp. Việc nghiên cứu và tối ưu hóa hệ thống ESP có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong bối cảnh hiện nay khi lưu lượng giao thông ngày càng phức tạp và tốc độ di chuyển của phương tiện không ngừng tăng cao.

Theo Nguyễn Hữu Cần và cộng sự (2000), khả năng điều khiển và ổn định của ô tô khi di

chuyển trong các điều kiện vận hành phức tạp, chẳng hạn như khi quay vòng hoặc di chuyển trên mặt đường có hệ số bám thấp, phụ thuộc chặt chẽ vào đặc tính động lực học của phương tiện và các hệ thống hỗ trợ điều khiển hiện đại (Nguyễn Hữu Cần & cộng sự, 2000). Hệ thống ESP được phát triển trên nền tảng của các công nghệ trước đó như hệ thống chống bó cứng phanh ABS và phân phối lực phanh điện tử EBD, cho phép kiểm soát chính xác lực phanh và mô men tác động lên từng bánh xe nhằm duy trì ổn định hướng chuyển động của xe (Nguyễn Hữu Cần, 2004). Trong các tình huống khẩn cấp, chẳng hạn như đánh lái gấp hoặc khi xe bắt đầu bị trượt, ESP có thể tự động can thiệp để giảm thiểu nguy cơ mất kiểm soát.



Hình 1. Hệ thống ESP giúp hạn chế rủi ro khi xe mất lái

Nguồn: Wang và cộng sự (2018)

Các nghiên cứu quốc tế đã khẳng định hiệu quả vượt trội của ESP trong việc giảm tỷ lệ tai nạn và cải thiện khả năng kiểm soát xe. Zhen Wang và cộng sự (2018) đã đề xuất thuật toán điều khiển ESP sử dụng cơ cấu phanh điện cơ (EMB), giúp tăng cường độ chính xác và tốc độ phản ứng của hệ thống trong các tình huống vận hành thay đổi nhanh (Wang & cộng sự, 2018). Cùng quan điểm này, Gupta và cộng sự (2020) nhấn mạnh rằng việc tích hợp các thuật toán điều khiển tiên tiến và cảm biến hiện đại đã giúp hệ thống ESC/ESP trở nên thông minh và thích ứng tốt hơn với các điều kiện mặt đường phức tạp (Gupta & cộng sự, 2020).

Một hướng nghiên cứu đáng chú ý khác là việc ứng dụng các kỹ thuật điều khiển mờ và trí tuệ nhân tạo nhằm nâng cao hiệu quả và khả

năng thích ứng của hệ thống ESP. Wan và cộng sự (2020) đã xây dựng mô hình điều khiển ESP dựa trên thuật toán PID mờ thích nghi, cho phép hệ thống tự điều chỉnh các thông số điều khiển theo thời gian thực, từ đó cải thiện khả năng kiểm soát và tối ưu hóa hành vi động lực học của xe (Wan & cộng sự, 2020).

Bên cạnh các nghiên cứu về thuật toán điều khiển, các công trình nghiên cứu chuyên sâu về động lực học ô tô đã đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng mô hình toán học chính xác cho quá trình mô phỏng và thiết kế hệ thống ESP. Rill (2020) trong công trình Road Vehicle Dynamics đã trình bày chi tiết các mô hình động lực học của ô tô, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc mô phỏng chính xác hành vi quay vòng, chuyển động ngang và sự

phân bố tải trọng bánh xe trong quá trình thiết kế hệ thống điều khiển ổn định (Rill, 2020).

Ngoài ra, Winner và cộng sự (2015) trong Handbook of Driver Assistance Systems đã tổng hợp và phân tích các công nghệ hỗ trợ lái xe tiên tiến, trong đó ESP được coi là một trong những công nghệ then chốt giúp giảm thiểu rủi ro tai nạn và cải thiện trải nghiệm lái xe (Winner & cộng sự, 2015). Các công nghệ hỗ trợ khác như kiểm soát lực kéo (TCS), hỗ trợ giữ làn đường (LKA) và hệ thống phanh khẩn cấp tự động (AEB) cũng thường xuyên được tích hợp đồng bộ với ESP nhằm tạo ra một hệ sinh thái an toàn toàn diện cho phương tiện.

Xuất phát từ những phân tích trên, việc nghiên cứu tác động của hệ thống cân bằng điện tử ESP trong quá trình quay vòng của xe du lịch không chỉ có ý nghĩa lý thuyết mà còn mang lại giá trị thực tiễn cao. Mô hình hóa và mô phỏng động lực học của xe khi quay vòng với sự can thiệp của ESP giúp đánh giá chính xác hiệu quả của hệ thống, đồng thời cung cấp cơ sở dữ liệu quan trọng cho việc thiết kế các thuật toán điều khiển mới và đề xuất các khuyến nghị vận hành an toàn cho người lái. Nghiên cứu này góp phần nâng cao chất lượng đào tạo kỹ sư ngành cơ khí động lực, đồng thời hỗ trợ các nhà sản xuất và cơ quan quản lý trong việc phát triển và kiểm định các hệ thống an toàn chủ động trên phương tiện giao thông.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu: Hệ thống cân bằng điện tử được lắp trên xe ô tô khi đi vào đường vòng. Khảo sát chuyển động của xe ô tô tải trong điều kiện mặt đường nhựa khô bằng phẳng, hệ số bám của các bánh xe là $0.7 \div 0.8$, hệ số cản lăn là $0.015 \div 0.018$ và và đường nhựa ướt có hệ số bám là $0.35 \div 0.45$, hệ số cản lăn là $0.012 \div 0.015$ (Nguyễn Hữu Cẩn & cộng sự, 2000).

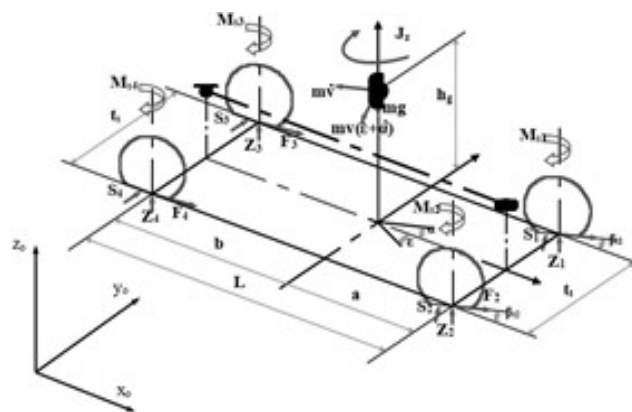
Phương pháp nghiên cứu kế thừa tài liệu: Thu thập, sưu tầm các tài liệu chuyên môn liên quan đến lĩnh vực động lực học của xe ô tô để làm cơ sở cho việc nghiên cứu lý thuyết.

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết: Sử dụng lý thuyết ô tô, cơ học kỹ thuật để xây dựng mô hình tính toán động lực học chuyển động của xe ô tô có trang bị hệ thống ESP khi đi vào đường vòng với các vận tốc khác nhau.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

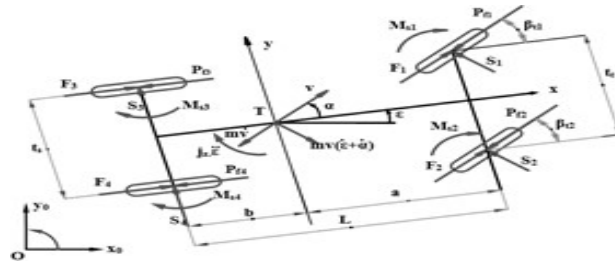
3.1. Mô hình động lực học

Trong quá trình ô tô quay vòng, các lực và mô men tác dụng vào xe ô tô được mô tả trên Hình 2 và Hình 3 (Nguyễn Hữu Cẩn & cộng sự, 2000; Nguyễn Hữu Cẩn, 2004).



Hình 2. Mô hình không gian

Nguồn: Nguyễn Hữu Cẩn và cộng sự (2000) và Nguyễn Hữu Cẩn (2004)



Hình 3. Các lực và mô men tác dụng lên ô tô trong mặt phẳng ngang

Nguồn: Nguyễn Hữu Cẩn và cộng sự (2000) và Nguyễn Hữu Cẩn (2004)

Theo nghiên cứu của Nguyễn Hữu Cẩn và cộng sự, (2000) và Nguyễn Hữu Cẩn (2004) ta có các phương trình động lực học quay vòng của ô tô:

$$\dot{v} = \frac{1}{m} \{ [(S_1 + S_2) \cos \beta + (F_1 + F_2) \sin \beta + S_3 + S_4] \sin \alpha - [(S_1 + S_2) \sin \beta - (F_1 + F_2) \cos \beta - (F_3 + F_4)] \cos \alpha \} \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{1}{mv \cos \alpha} [(S_1 + S_2) \cos \beta + S_3 + S_4 + (F_1 + F_2) \sin \beta] - \frac{\dot{v} \sin \alpha}{v \cos \alpha} - \dot{\epsilon} \quad (2)$$

$$\ddot{\epsilon} = \frac{1}{J_z} \left[(S_1 + S_2) a \cos \beta - (S_3 + S_4) b + (S_1 - S_2) \frac{t_1}{2} \sin \beta + (F_1 + F_2) a \sin \beta - (F_1 - F_2) \frac{t_1}{2} \cos \beta - (F_3 - F_4) \frac{t_2}{2} \right] \quad (3)$$

Tải trọng thẳng đứng tác dụng lên 4 bánh xe như sau:

$$Z_1 = \frac{1}{2} Z_t - \Delta Z_t = \frac{1}{2} \left(m \cdot g \frac{b}{L} - \Delta Z \right) - \Delta Z_t \quad (4)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} Z_t + \Delta Z_t = \frac{1}{2} \left(m \cdot g \frac{b}{L} - \Delta Z \right) + \Delta Z_t \quad (5)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} Z_s - \Delta Z_s = \frac{1}{2} \left(m \cdot g \frac{a}{L} + \Delta Z \right) - \Delta Z_s \quad (6)$$

$$Z_4 = \frac{1}{2} Z_s + \Delta Z_s = \frac{1}{2} \left(m \cdot g \frac{a}{L} + \Delta Z \right) + \Delta Z_s \quad (7)$$

Sự chênh lệch tải trọng giữa bánh trước và bánh sau:

$$\Delta Z = [\dot{v} \cos \alpha - v(\dot{\alpha} + \dot{\epsilon}) \sin \alpha] \frac{m \cdot h}{l} \quad (8)$$

Sự chênh lệch tải trọng giữa 2 bánh xe phía trước:

$$\Delta Z_t = \frac{1}{t} \frac{v^2}{R} \left[m' \cdot \frac{b'}{l} p_t + C_{gt} \frac{m' h' - m_t (p_t - h_t) - m_s (p_s - h_s)}{C_{gt} + C_{gs} - m' g h'} + m_t h_t \right] \quad (9)$$

Sự chênh lệch tải trọng giữa 2 bánh xe phía sau:

$$\Delta Z_s = \frac{1}{t} \frac{v^2}{R} \left[m' \cdot \frac{a'}{l} p_s + C_{gs} \frac{m' h' - m (p - h) - m (p - h)}{C_{gt} + C_{gs} - m' g h'} + m' h' \right] \quad (10)$$

Góc nghiêng thùng xe

$$\psi = \frac{m'h' - m_t''(p_t - h_t'') - m_s''(p_s - h_s'')}{C_{gt} + C_{gs} - m'gh'} \frac{v^2}{R} \quad (11)$$

Trong đó:

\dot{v} : Gia tốc của ô tô (m/s²);

$\dot{\alpha}$: Vận tốc góc lệch thân xe (rad/s);

$\ddot{\epsilon}$: Gia tốc góc xoay thân xe (rad/s²);

F_i : Lực dọc tác dụng lên ô tô trong quá trình chuyển động (N);

P_{fi} : Lực cản lăn (N);

S_i : Các phản lực ngang của mặt đường tác dụng lên vết của bánh xe (N);

M_{si} : Mô men cản quay (rad/s²);

β : Góc đánh lái (rad);

t_t, t_s : Chiều rộng vệt lốp bánh xe trước và bánh xe sau (m);

m : Khối lượng của toàn xe (kg);

m' : Khối lượng phần được treo của ô tô (kg).

m_t'' : Khối lượng phần không được treo cầu trước (kg);

m_s'' : Khối lượng phần không được treo cầu sau (kg);

h : Chiều cao trọng tâm xe (m);

h' : Chiều cao trọng tâm phần được treo của ô tô (m);

h_t'' : Chiều cao của phần không được treo cầu trước (m);

h_s'' : Chiều cao của phần không được treo cầu sau (m);

l : Chiều dài cơ sở của ô tô (m);

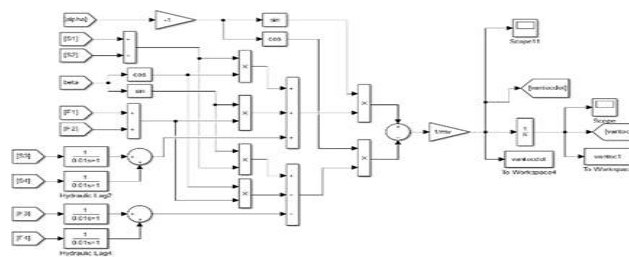
R : bán kính quay vòng thực tế của ô tô (m);

C_{gt} : Độ cứng của cầu trước (N/m);

C_{gs} : Độ cứng cầu sau (N/m).

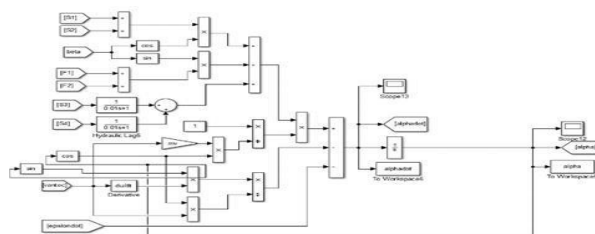
3.2. Kết quả khảo sát

Từ các phương trình động lực học của xe ô tô khi đi vào đường vòng từ (2) đến phương trình (11), sử dụng phần mềm Matlab Simulink nhóm tác giả đã xây dựng sơ đồ mô phỏng hệ thống, cụ thể là:



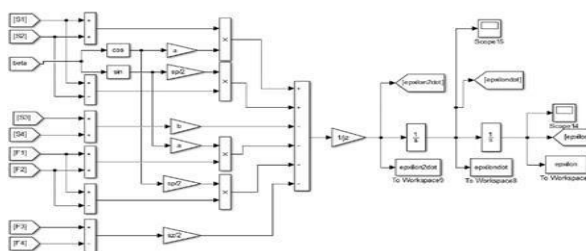
Hình 4. Sơ đồ khối mô phỏng phương trình (1)

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



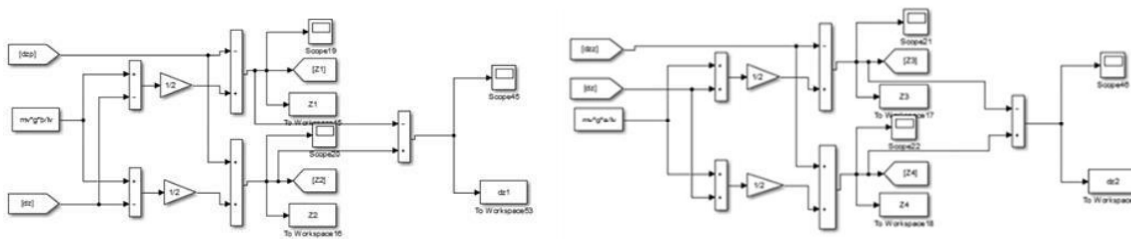
Hình 5. Sơ đồ khối mô phỏng phương trình (2)

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



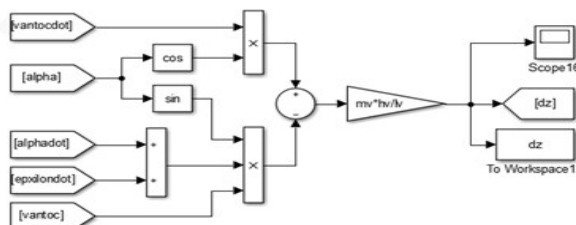
Hình 6. Sơ đồ khối mô phỏng phương trình (3)

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



Hình 7. Sơ đồ khối mô phỏng phương trình (4), (5), (6), (7), (8), (10), (11)

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



Hình 8. Sơ đồ khối mô phỏng phương trình (9)

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

Khảo sát xe ô tô có hệ thống phanh tích cực, động cơ đặt phía trước, cầu sau chủ động và với các thông số của xe Ford Fiesta 2021 sedan như Bảng 1 (Wang & cộng sự, 2018).

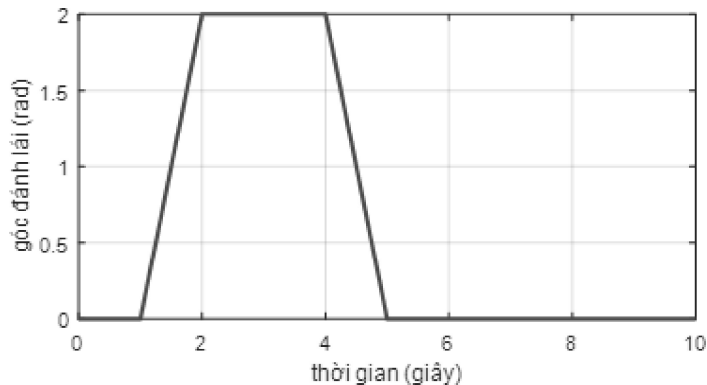
Bảng 1. Thông số của xe ô tô khảo sát

TT	Tên gọi	Đơn vị	Giá trị
1.	Khối lượng toàn bộ xe khi đầy tải	kg	1243
2.	Chiều dài cơ sở ô tô	m	2,493
3.	Khoảng cách từ trọng tâm - cầu trước	m	1,245
4.	Khoảng cách từ trọng tâm - cầu sau	m	1,248
5.	Chiều rộng vệt lốp bánh xe trước	m	1,488
6.	Chiều rộng vệt lốp bánh xe sau	m	1,488
7.	Chiều cao trọng tâm ô tô	m	0,506
8.	Chiều cao trọng tâm của phần được treo	m	0,547
9.	Tỷ số truyền của hệ thống lái		21.2

Nguồn: Wang và cộng sự (2018)

Với hệ phương trình được trên, sử dụng chương trình Matlab Simulink (Gupta & cộng sự, 2020) mô phỏng ta được kết quả mô phỏng

ứng với trường hợp điều khiển góc xoay vành tay lái được xác lập (Hình 9).

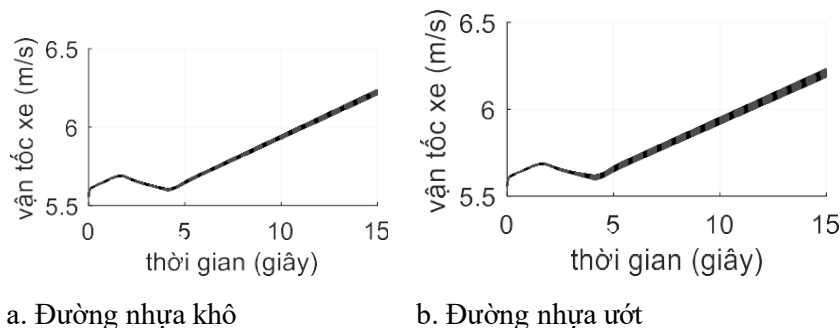


Hình 9. Mô phỏng góc xoay vành tay lái

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

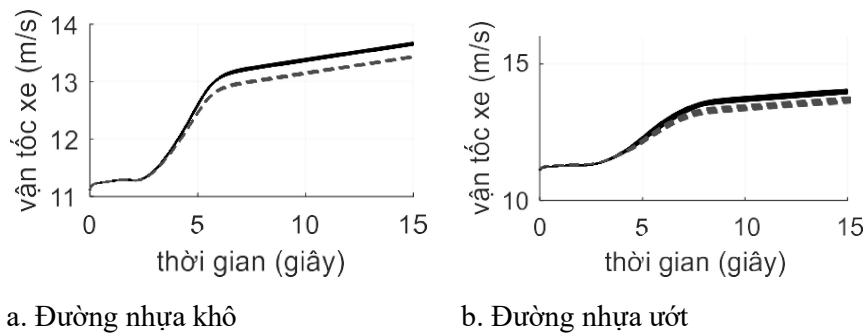
Khảo sát xe ô tô ở các vận tốc là 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h. Sử dụng phương pháp Polynomial Chaos với phương pháp lấy mẫu bằng cách sử dụng nghiệm của các đa thức (Wan & cộng sự, 2020) và lỗi Leave-One-Out

nhỏ hơn 0.0001, các phép tính được tính toán với số lượng mẫu là 100. Vận tốc của xe ô tô được biểu diễn tương ứng với các vận tốc ban đầu ở các Hình 10, Hình 11, Hình 12, Hình 13.



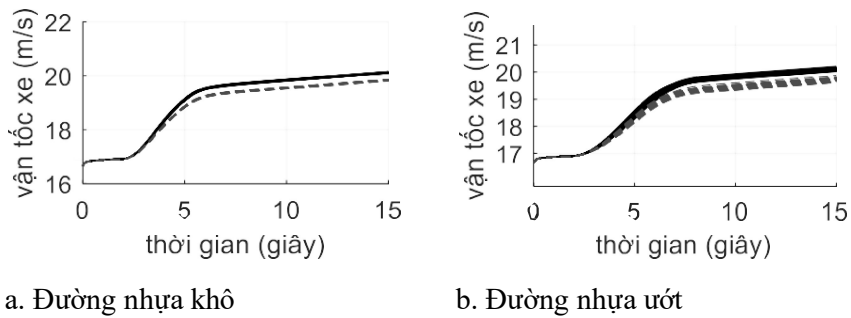
Hình 10. Vận tốc của xe với vận tốc ban đầu $v_0=20$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



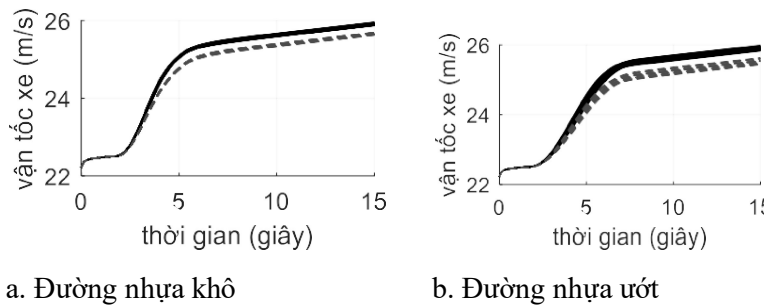
Hình 11. Vận tốc của xe với vận tốc ban đầu $v_0=40$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



Hình 12. Vận tốc của xe với vận tốc ban đầu $v_0=60$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

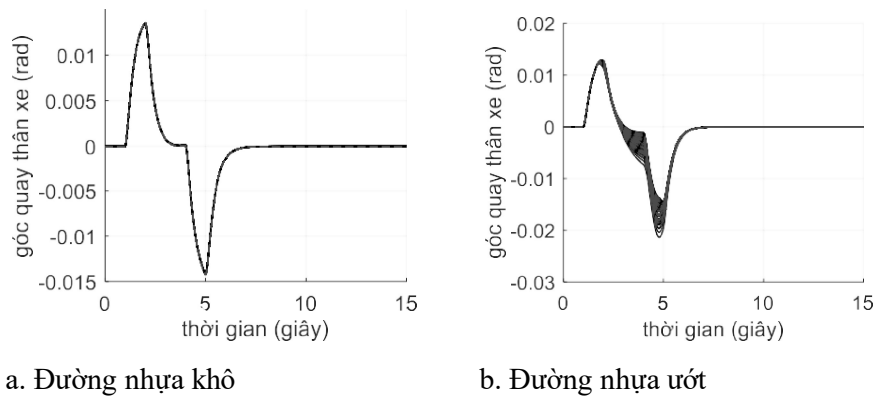


Hình 13. Vận tốc của xe với vận tốc ban đầu $v_0=80$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

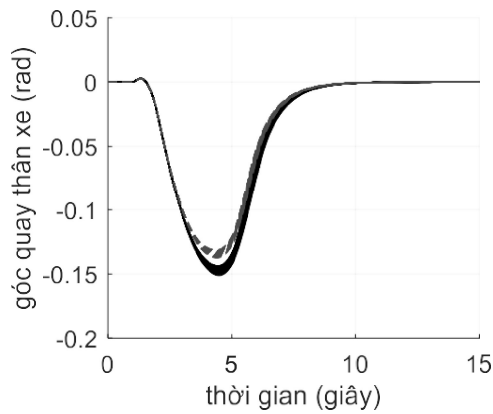
Ở các hình 10, 11, 12, 13 các đường màu đen nét liền thể hiện vận tốc của xe ô tô con không được trang bị hệ thống ESP, còn các đường màu đỏ nét đứt thể hiện vận tốc của xe ô tô con được trang bị hệ thống ESP. Thông qua các hình trên ta thấy rằng với vận tốc ban đầu $v_0 = 20$ km/h thì không có sự khác biệt nhiều giữa xe có và không trang bị hệ thống ESP. Khi

vận tốc xe tăng lên (vận tốc lớn hơn hoặc bằng 40 km/h) thì với xe có trang bị hệ thống ESP sẽ nhỏ hơn vận tốc xe không trang bị hệ thống ESP. Khi xe đi ở đường nhựa ướt thì khoảng dao động vận tốc của xe là lớn. Góc quay thân xe được biểu diễn tương ứng với các vận tốc ban đầu ở các Hình 14, Hình 15, Hình 16, Hình 17.

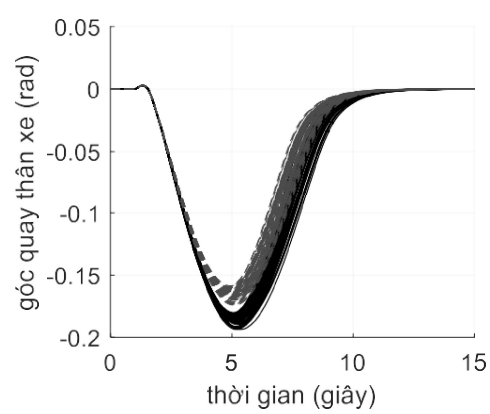


Hình 14. Góc xoay thân xe với vận tốc ban đầu $v_0=20$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



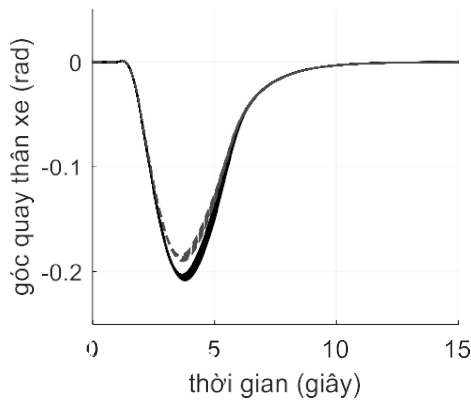
a. Đường nhựa khô



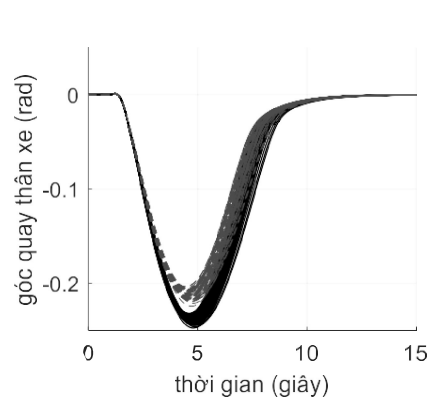
b. Đường nhựa ướt

Hình 15. Góc xoay thân xe với vận tốc ban đầu $v_0=40$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



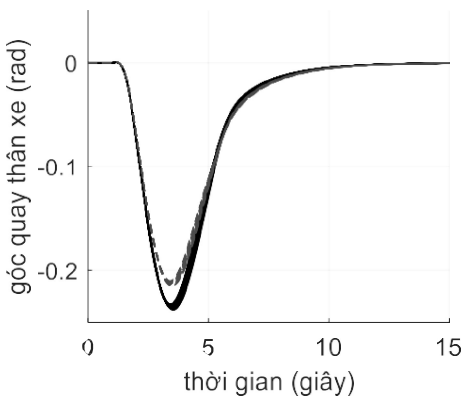
a. Đường nhựa khô



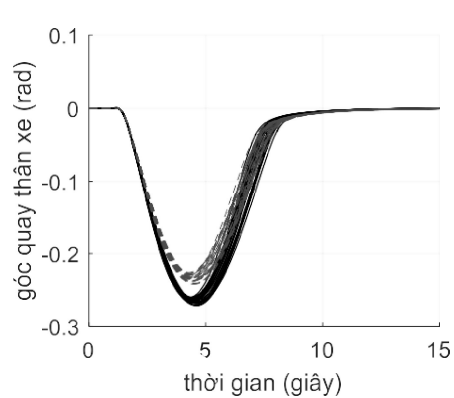
b. Đường nhựa ướt

Hình 16. Góc xoay thân xe với vận tốc ban đầu $v_0=60$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



a. Đường nhựa khô



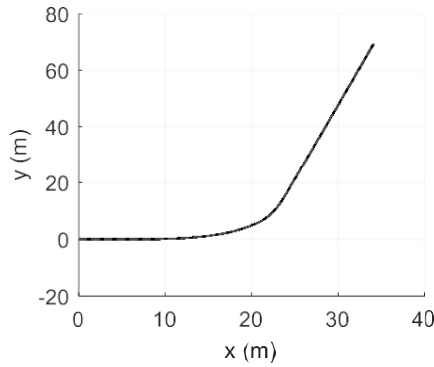
b. Đường nhựa ướt

Hình 17. Góc xoay thân xe với vận tốc ban đầu $v_0=80$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

Dựa vào kết quả ở các Hình 14, Hình 15, Hình 16, Hình 17 ta thấy rằng ở vận tốc ban đầu thấp ($v_0=20$ km/h), thì góc xoay thân xe khi đánh lái và trả lái gần bằng nhau. Tuy nhiên khi vận tốc ban đầu tăng lên thì sẽ xuất hiện lực

ly tâm làm cho góc xoay thân xe khi trả lái sẽ tăng dần lên. Quỹ đạo chuyển động của xe ô tô được biểu diễn tương ứng với các vận tốc ban đầu ở các Hình 18, Hình 19, Hình 20, Hình 21.



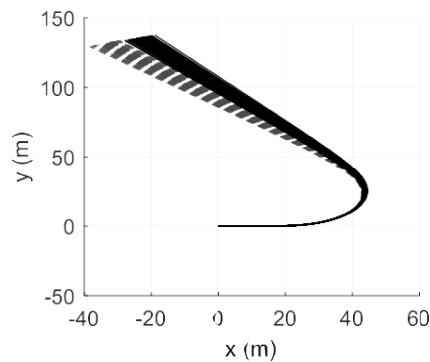
a. Đường nhựa khô



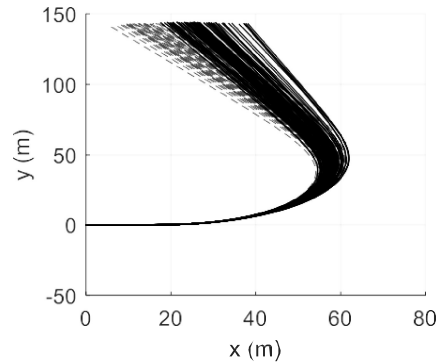
b. Đường nhựa ướt

Hình 18. Quỹ đạo của xe với vận tốc ban đầu $v_0=20$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



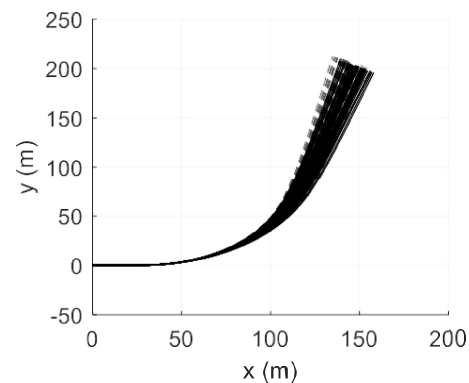
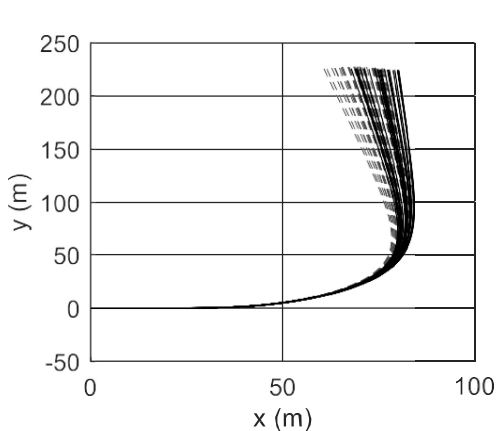
a. Đường nhựa khô



b. Đường nhựa ướt

Hình 19. Quỹ đạo của xe với vận tốc ban đầu $v_0=40$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

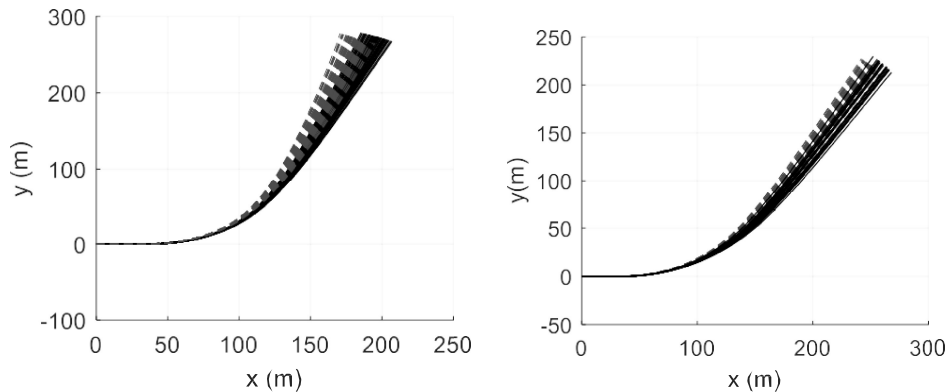


b. Đường nhựa ướt

a. Đường nhựa khô

Hình 20. Quỹ đạo của xe với vận tốc ban đầu $v_0=60$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát



a. Đường nhựa khô

b. Đường nhựa ướt

Hình 21. Quỹ đạo của xe với vận tốc ban đầu $v_0=80$ km/h

Nguồn: Kết quả xử lý từ dữ liệu khảo sát

Dựa vào Hình 18, Hình 19, Hình 20, Hình 21 ta thấy rằng khi trả lái thì có xu hướng xe bị đánh lái thừa. Với xe có trang bị hệ thống ESP sẽ có tác động để giúp về gần quay vòng đúng.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình toán học mô phỏng chuyển động quay vòng của xe ô tô du lịch có trang bị hệ thống cân bằng điện tử ESP. Thông qua việc áp dụng các phương pháp mô phỏng hiện đại, bao gồm Polynomial Chaos và các thuật toán giải phương trình động lực học phức tạp, kết hợp sử dụng phần mềm Matlab Simulink, nhóm nghiên cứu đã đánh giá được ảnh hưởng của hệ thống ESP đến các thông số chuyển động quan trọng của phương tiện như vận tốc, góc quay thân xe và quỹ đạo chuyển động trên các điều kiện mặt đường khác nhau.

Kết quả mô phỏng cho thấy, ở vận tốc thấp (20 km/h), sự khác biệt giữa xe có và không có trang bị ESP là không đáng kể. Tuy nhiên, khi vận tốc tăng lên (40 km/h trở lên), hệ thống ESP thể hiện vai trò vượt trội trong việc duy trì ổn định chuyển động của xe, giảm thiểu góc quay thân xe và hạn chế sự sai lệch quỹ đạo so

với dự kiến. Đặc biệt, trong điều kiện mặt đường có hệ số bám thấp (đường ướt), sự can thiệp của ESP giúp giảm rõ rệt hiện tượng mất lái và hiện tượng đánh lái thừa (oversteering), từ đó góp phần nâng cao độ an toàn cho người lái và hành khách.

Ngoài ra, sự thay đổi vận tốc và góc quay thân xe khi có sự hỗ trợ của ESP phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Wang và cộng sự (2018), và Gupta và cộng sự (2020), khẳng định tính chính xác của mô hình toán học và phương pháp mô phỏng đã được xây dựng.

Từ góc độ lý thuyết, nghiên cứu đã khẳng định vai trò quan trọng của việc mô hình hóa chính xác các yếu tố động lực học khi thiết kế hệ thống điều khiển ổn định cho ô tô, phù hợp với các phân tích trong Road Vehicle Dynamics của Rill (2020). Mô hình toán học không chỉ giúp dự báo hành vi vận hành của xe trong các tình huống cụ thể mà còn hỗ trợ phát triển các thuật toán điều khiển thông minh hơn, ví dụ như Adaptive Fuzzy PID Control được đề xuất bởi Wan và cộng sự (2020).

Về mặt ứng dụng, nghiên cứu này cung cấp một công cụ quan trọng cho việc đào tạo

kỹ sư cơ khí động lực, giúp sinh viên và kỹ thuật viên hiểu rõ hơn về tác động của ESP và các yếu tố ảnh hưởng đến động lực học phương tiện. Mô hình mô phỏng cũng có thể được sử dụng như một cơ sở để phát triển các hệ thống hỗ trợ lái xe tiên tiến khác, chẳng hạn như hệ thống kiểm soát lực kéo (TCS), hệ thống cảnh báo lệch làn (LDW), hoặc các chức năng tự lái trong tương lai.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả đề xuất mở rộng mô hình để khảo sát ảnh hưởng của ESP trong các tình huống vận hành phức tạp hơn, chẳng hạn như khi có gió bên, khi xe chuyển làn khẩn cấp hoặc khi vận hành trên các loại mặt đường không đồng nhất. Đồng thời, việc tích hợp các thuật toán điều khiển hiện đại dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI) cũng sẽ được xem xét nhằm nâng cao hiệu quả và khả năng thích ứng của hệ thống ESP đối với các điều kiện vận hành đa dạng trong thực tế.

Như vậy nghiên cứu đã chứng minh rằng hệ thống cân bằng điện tử ESP là một yếu tố không thể thiếu để đảm bảo an toàn và ổn định cho xe ô tô du lịch khi quay vòng, đặc biệt trong các điều kiện mặt đường có hệ số bám thấp hoặc vận tốc cao. Việc áp dụng các mô hình toán học và phương pháp mô phỏng hiện đại không chỉ giúp đánh giá hiệu quả của hệ thống mà còn mở ra những hướng đi mới trong thiết kế và phát triển các hệ thống hỗ trợ lái xe tiên tiến trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Hữu Căn, Dư Quốc Thịnh, Phạm Minh Thái, Nguyễn Văn Tài, & Lê Thị Vàng (2000). *Lý thuyết ô tô máy kéo*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- Nguyễn Hữu Căn (2004). *Phanh ô tô cơ sở khoa học và thành tựu mới*. Hà Nội: Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật.
- Wang, Z., Hong, Z., Wang, Y., & Zheng, J. (2018). Study on Vehicle Electronic Stability Program Control Algorithm under Electronic Mechanical Braking. *Chemical engineering transactions*, 66, 739-744.
- Gupta, S., Hiremath, N., Raut, S., Datkhile, G. S., & Trivedi, P. (2020). Electronic Stability Control of Vehicles. *ITM Web of Conferences*, 32, *International Conference on Automation, Computing and Communication*, 1-7.
- Wan, N., Zeng, G., Zhang, C., & Luo, Y. (2020). Simulation of Vehicle ESP Based on Adaptive Fuzzy PID Control. 2020 12th International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI).
- Rill, G. (2020). *Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling*. CRC Press.
- Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., & Singer, C. (2015). *Handbook of Driver Assistance Systems*. Springer