

XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ KHẢO SÁT MỘT SỐ YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ỔN ĐỊNH HƯỚNG CỦA Ô TÔ DÙNG HỆ THỐNG LÁI BỐN BÁNH DẪN HƯỚNG

BUILDING A MODEL TO SURVEY SOME FACTORS AFFECTING THE DIRECTIONAL STABILITY OF VEHICLES USING FOUR WHEEL STEERING SYSTEM

MAI PHƯỚC TRÁI^{1a}, NGUYỄN CÔNG KHẢI²

¹Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học SPKT Vĩnh Long

²Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

^aTác giả liên hệ: traimp@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 23/02/2024; Phản biện (Reviewed): 18/03/2024; Chấp nhận (Accepted): 08/04/2024

TÓM TẮT

Dựa trên lý thuyết động lực học về hệ thống lái trên ô tô, bài báo nghiên cứu các vấn đề sau: Thứ nhất, tác giả xây dựng mô hình động lực học ô tô theo phương ngang. Thứ hai, sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để khảo sát sự ảnh hưởng của góc xoay vô lăng lái đến vận tốc góc lệch, vận tốc ngang, góc trượt ngang của ô tô, góc trượt ngang tại bánh xe trước và sau tại vận tốc 30 km/h và 90 km/h. Từ kết quả khảo sát, tác giả nhận thấy xe sử dụng hệ thống lái 4WS có tính cơ động tốt hơn ở tốc độ thấp và ổn định hơn khi chạy với tốc độ cao so với xe sử dụng hệ thống lái 2WS truyền thống. Tuy nhiên, khi tài xế chạy xe ở tốc độ cao, cả xe 4WS và xe 2WS cũng có vận tốc ngang và vận tốc góc lệch lớn hơn nhiều so với xe khi đang chạy ở vận tốc thấp. Tài xế nên chạy xe ở vận tốc cho phép theo quy định.

Từ khóa: Hệ thống lái bốn bánh, ổn định hướng, động lực học ô tô.

ABSTRACT

Based on the dynamic theory of vehicle steering systems, the article studies the following issues: Firstly, the authors build a dynamics model of 4WS vehicle in horizontal plane. Secondly, the authors use Matlab/Simulink software to investigate the influence of the steering wheel rotation angle on the angular velocity, horizontal velocity, horizontal slip angle of the vehicle, and horizontal slip angle at the front and rear wheels at high speed as 30 km/h and 90 km/h. From the survey results, the author found that vehicles using the 4WS steering system have better maneuverability at low speeds and more stability when running at high speeds compared to vehicles using the traditional 2WS steering system. However, when the driver drives at high speed, both the 4WS and 2WS vehicles also have much larger lateral and angular velocities than the vehicle when running at low speed. Drivers should drive at the allowed speed according to regulations.

Keywords: Four-wheel steering, directional stability, automotive dynamics.

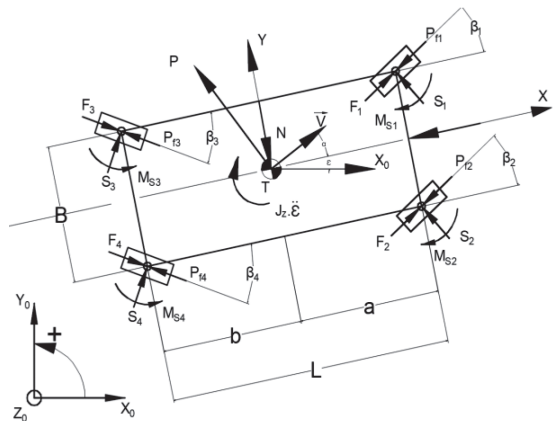
1. GIỚI THIỆU

Hệ thống lái là một trong những hệ thống quan trọng quyết định hướng chuyển động của ô tô. Hệ thống lái kiểu 2WS và 4WS đã được sử dụng phổ biến hiện nay [1]. Hệ thống lái 4WS đã cải thiện rõ đặc tính lái của phương tiện so với các phương tiện lái bánh trước truyền thống. Ô tô sử dụng hệ thống lái kiểu 4WS có thể điều khiển bánh trước và bánh sau riêng biệt để quay vòng, do đó nâng cao khả năng ổn định hướng chuyển động, giảm hiện tượng thừa lái và thiếu lái, từ đó nâng cao độ an toàn của ô tô [2].

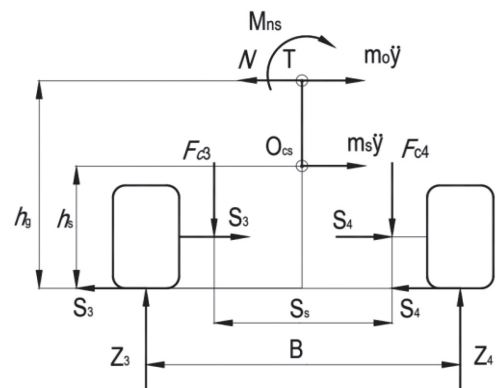
Qua quá trình tìm hiểu, tác giả nhận thấy hệ thống lái bốn bánh dẫn hướng (Four Wheel Steering - 4WS) là một công nghệ mới được áp dụng nhiều vào hệ thống lái trên các dòng xe hiện nay, do đó cần có nhiều nghiên cứu khảo sát hệ thống này trên các dòng xe hiện nay. Nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống lái 4WS đã được thực hiện [3-11]. Các nghiên cứu đã xây dựng được mô hình mô phỏng hệ thống lái bốn bánh xe dẫn hướng dùng cho ô tô con bằng phần mềm Matlab/Simulink và mô phỏng trong một số trường hợp điển hình. Kết quả cho thấy hệ thống phù hợp với tài liệu của nhà sản xuất đưa ra. Các nghiên cứu [6-9] đã cho thấy sự ảnh hưởng của các yếu tố lên khả năng dẫn hướng cũng như động lực học phương ngang của ô tô. Những nghiên cứu [10-11] đã xây dựng được các mô hình khảo sát ô tô hệ thống lái 4 bánh dẫn hướng từ đó cho thấy hiệu quả của ô tô dùng hệ thống lái 4WS so với các ô tô 2WS.

Việc xây dựng mô hình động lực học hệ thống lái 4WS để khảo sát các yếu tố ảnh hưởng là rất cần thiết. Từ các kết quả nghiên cứu được, tác giả tiến hành thiết lập mô hình hệ thống lái 4WS.

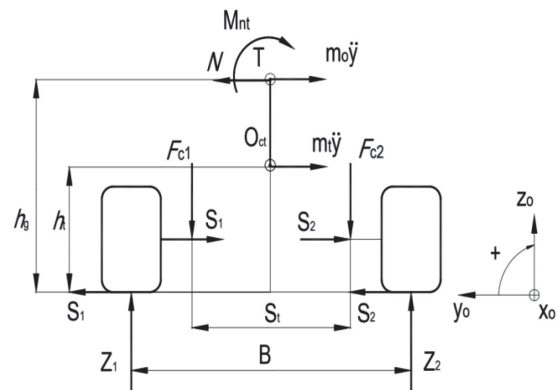
2. Mô hình động lực học của ô tô sử dụng hệ thống lái 4WS



Hình 1. Lực và moment tác dụng lên ô tô trong mặt phẳng nằm ngang



Hình 2. Lực và moment ở cầu sau



Hình 3: Lực và moment ở cầu trước

Ghi chú:

✓ Lực dọc F_{ij} ; lực bên S_{ij} ; lực cản lăn P_{ni} ; moment cản quay của các bánh xe (M_{si}). Với i là chỉ số chỉ các bánh xe dẫn hướng ($i=1\div 4$).

✓ Trọng tâm T của ô tô đặt cách tâm trục cầu sau một đoạn là b; cách tâm trục cầu trước một đoạn là a. Chiều dài cơ sở $L = a + b$

✓ h_p, h_s : chiều cao từ trọng phân khối lượng không được treo cầu trước và cầu sau tới mặt đường [m]

✓ Lực cản không khí xét theo phương dọc trục xe là P_w và theo phương ngang là N.

✓ Tại trọng tâm ô tô (T) có lực quán tính F_a , và lực li tâm P_j . Khi thân xe quay vòng, xuất hiện mô men quán tính xung quanh trục T_z và có giá trị là $J_z \cdot \varepsilon$

✓ Do đây là hệ thống lái 4 bánh dẫn hướng nên góc quay của các bánh xe dẫn hướng là β_i , kích thước chiều rộng của vết lốp của hai cầu là B.

Trong bài báo này, tác giả giả thuyết các bánh xe luôn tiếp xúc với mặt đường và phản lực thẳng đứng tác dụng lên các bánh xe bằng tải trọng phân bố lên các bánh xe. Tải trọng phân bố lên các bánh xe phụ thuộc vào tọa độ khối tâm của xe và các thành phần gia tốc của thân xe theo các phương thẳng đứng (gia tốc trọng trường), dọc xe (gia tốc phanh hay tăng tốc) và phương ngang xe (gia tốc bên). Giả thiết gia tốc trọng trường không đổi,

khi có gia tốc dọc và ngang thân xe, có sự phân bố lại trọng lượng trên các bánh xe. Hệ phương trình động lực học tham khảo tài liệu [5].

$$Z_1 = Z_1^T + \frac{1}{2} \cdot \Delta Z - \Delta Z_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_2^T + \frac{1}{2} \cdot \Delta Z - \Delta Z_2 \quad (2)$$

$$Z_3 = Z_3^T + \frac{1}{2} \cdot \Delta Z - \Delta Z_3 \quad (3)$$

$$Z_4 = Z_4^T + \frac{1}{2} \cdot \Delta Z - \Delta Z_4 \quad (4)$$

Trong đó, Z_i^T là trọng lượng phân bố ở trạng thái tĩnh lên các bánh xe, ΔZ là phần trọng lượng phân bố lại giữa cầu trước và cầu sau do gia tốc dọc gây ra, Δt và Δs lần lượt là phần trọng lượng phân bố lại giữa hai bánh xe cầu trước và giữa hai bánh xe cầu sau do gia tốc bên gây ra.

Lực tác dụng của không khí được phân tách thành hai thành phần: Thành phần tác dụng trong phương dọc P_w và thành phần tác dụng theo phương ngang N (giả thiết lực tác dụng tại trọng tâm ô tô). Tại trọng tâm ô tô còn xuất hiện các lực quán tính theo phương dọc F_a , theo phương ngang (lực li tâm) P_j và mô men quán tính trong mặt phẳng nằm J_z.

2.1 Phương trình động lực học theo phương x của ô tô:

$$m \cdot \ddot{x} = F_1 \cdot \cos(\beta_1) + F_2 \cdot \cos(\beta_2) + F_3 \cdot \cos(\beta_3) + F_4 \cdot \cos(\beta_4) - S_1 \cdot \sin(\beta_1) - S_2 \cdot \sin(\beta_2) + S_3 \cdot \sin(\beta_3) + S_4 \cdot \sin(\beta_4) - P_w - P_f$$

$$\Leftrightarrow \ddot{x} = \frac{1}{m} \cdot [F_1 \cdot \cos(\beta_1) + F_2 \cdot \cos(\beta_2) + F_3 \cdot \cos(\beta_3) + F_4 \cdot \cos(\beta_4) - S_1 \cdot \sin(\beta_1) - S_2 \cdot \sin(\beta_2) + S_3 \cdot \sin(\beta_3) + S_4 \cdot \sin(\beta_4) - P_w - P_f]$$

$$\Leftrightarrow \dot{x} = \int \frac{1}{m} \cdot [F_1 \cdot \cos(\beta_1) + F_2 \cdot \cos(\beta_2) + F_3 \cdot \cos(\beta_3) + F_4 \cdot \cos(\beta_4) - S_1 \cdot \sin(\beta_1) - S_2 \cdot \sin(\beta_2) + S_3 \cdot \sin(\beta_3) + S_4 \cdot \sin(\beta_4) - P_w - P_f] \cdot dt + v_{0x}$$

$$\Leftrightarrow x = \int \dot{x} dt + x_0$$

(5)

2.2 Phương trình động lực học theo phương y của ô tô:

$$m \cdot \ddot{y} = S_1 \cdot \cos(\beta_1) + S_2 \cdot \cos(\beta_2) + S_3 \cdot \cos(\beta_3) + S_4 \cdot \cos(\beta_4) + F_1 \cdot \sin(\beta_1) + F_2 \cdot \sin(\beta_2) - F_3 \cdot \sin(\beta_3) - F_4 \cdot \sin(\beta_4) + N$$

$$\Leftrightarrow \dot{y} = \frac{1}{m} \cdot \int [S_1 \cdot \cos(\beta_1) + S_2 \cdot \cos(\beta_2) + S_3 \cdot \cos(\beta_3) + S_4 \cdot \cos(\beta_4) + F_1 \cdot \sin(\beta_1) + F_2 \cdot \sin(\beta_2) - F_3 \cdot \sin(\beta_3) - F_4 \cdot \sin(\beta_4) + N] dt + v_{0y}$$

$$\Leftrightarrow y = \int \dot{y} \cdot dt + y_0 \quad (6)$$

2.3 Phương trình xoay quanh trục Z tại trọng tâm T của ô tô

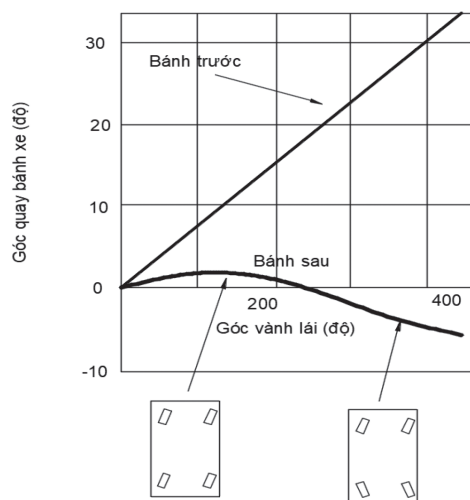
$$J_z \cdot \ddot{\varepsilon} = [F_1 \cdot \sin(\beta_1) + F_2 \cdot \sin(\beta_2)] \cdot a + [F_3 \cdot \sin(\beta_3) - F_4 \cdot \sin(\beta_4)] \cdot b + [S_1 \cdot \cos(\beta_1) + S_2 \cdot \cos(\beta_2)] \cdot a - [S_3 \cdot \cos(\beta_3) + S_4 \cdot \cos(\beta_4)] \cdot b + [S_1 \cdot \sin(\beta_1) - S_2 \cdot \sin(\beta_2)] \cdot \frac{B}{2} - [S_3 \cdot \sin(\beta_3) - S_4 \cdot \sin(\beta_4)] \cdot \frac{B}{2} - [F_1 \cdot \cos(\beta_1) - F_2 \cdot \cos(\beta_2)] \cdot \frac{B}{2} - [F_3 \cdot \cos(\beta_3) - F_4 \cdot \cos(\beta_4)] \cdot \frac{B}{2}$$

$$\Leftrightarrow \dot{\varepsilon} = \frac{1}{J_z} \left\{ [F_1 \cdot \sin(\beta_1) + F_2 \cdot \sin(\beta_2)] \cdot a + [F_3 \cdot \sin(\beta_3) - F_4 \cdot \sin(\beta_4)] \cdot b + [S_1 \cdot \cos(\beta_1) + S_2 \cdot \cos(\beta_2)] \cdot a - [S_3 \cdot \cos(\beta_3) + S_4 \cdot \cos(\beta_4)] \cdot b + [S_1 \cdot \sin(\beta_1) - S_2 \cdot \sin(\beta_2)] \cdot \frac{B}{2} - [S_3 \cdot \sin(\beta_3) - S_4 \cdot \sin(\beta_4)] \cdot \frac{B}{2} - [F_1 \cdot \cos(\beta_1) - F_2 \cdot \cos(\beta_2)] \cdot \frac{B}{2} - [F_3 \cdot \cos(\beta_3) - F_4 \cdot \cos(\beta_4)] \cdot \frac{B}{2} \right\} \cdot dt + \varepsilon_0$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon = \int \dot{\varepsilon} \cdot dt + \varepsilon_0 \quad (7)$$

Các lực tác dụng của mặt đường lên bánh xe theo phương dọc F_i và theo phương ngang S_i được xác định theo tải trọng thẳng đứng Z_i , độ trượt s và góc lệch bên của bánh xe α từ các quan hệ trên hình 1. Mô hình tính toán các lực tương tác giữa bánh xe với mặt đường và tính toán các thông số động lực học của toàn bộ ô tô được xây dựng trong môi trường Matlab/Simulink.

Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng lớp xe là dựa trên các đồ thị đặc tính thực nghiệm [7]



Hình 4. Liên hệ giữa góc quay vành lái và chuyển động của bánh lái

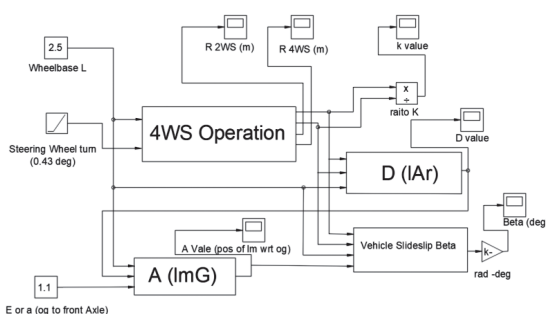
Theo tài liệu [3] và quan sát hình 2, ta nhận thấy tại góc quay vành lái ở khoảng từ 240^0 trở lên, chiều quay của bánh sau bắt đầu thay đổi và ngược chiều với bánh trước (điều này thường được sử dụng khi xe chạy ở vận tốc thấp, đặc biệt khi đỗ xe). Còn khi góc quay vành lái từ 240^0 trở xuống,

chuyển động của bánh trước và bánh sau là cùng chiều (điều này thường xảy ra khi xe chạy trên đường, đặc biệt ở các dải tốc độ cao). Trong bài báo, tác giả mô phỏng ở hai giá trị vận tốc lần lượt là 30 km/h và 90 km/h và xem góc vành lái bằng 240^0 là điểm chuẩn để đánh giá các giá trị khảo sát.

3. Xây dựng mô hình mô phỏng động lực học ô tô trong Matlab/Simulink

Bảng 1. Thông số cơ bản của ô tô Lexus LS500h 2017 [13]

Đại lượng	Giá trị	Đơn vị	
Chiều dài cơ sở (L)	2500	mm	
Chiều rộng cơ sở (B)	1639	mm	
Khoảng cách từ trọng tâm đến cầu trước (a)	1100	mm	
Khoảng cách từ trọng tâm đến cầu sau (b)	1400	mm	
Chiều cao gầm (tối thiểu)	169	mm	
Góc nghiêng chính	14	Độ	
Góc khởi hành	16	Độ	
Khối lượng không tải	Cầu trước	1135	kg
	Cầu sau	1080	kg
	Toàn bộ	2215	kg
Khối lượng toàn tải	Cầu trước	1220	kg
	Cầu sau	1505	kg
	Toàn bộ	2725	kg
Tốc độ tối đa	250	Km/h	
Thời gian tăng tốc từ 0 km/h lên 100 km/h	5.4	giây	



Hình 5. Sơ đồ khối mô hình khảo sát khả năng ổn định hướng của xe 2WS và 4WS

Quy trình mô phỏng:

Bước 1: Xây dựng các phương trình động lực học hệ thống lái 4WS và 2WS.

Bước 2: Lập mô hình mô phỏng hệ thống lái 4WS và 2WS trong Matlab/Simulink.

Bước 3: Nhập các thông số cần thiết theo bảng 1.

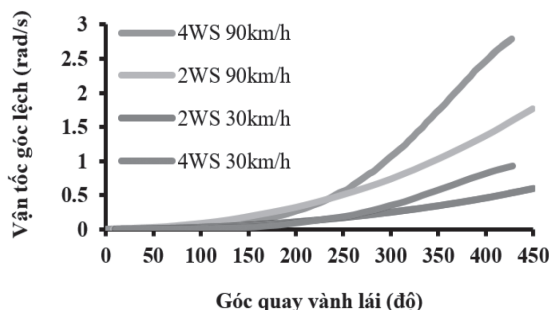
Bước 4: Chạy mô phỏng và nhận kết quả qua đồ thị.

Bước 5: Phân tích, đánh giá, so sánh kết quả mô phỏng

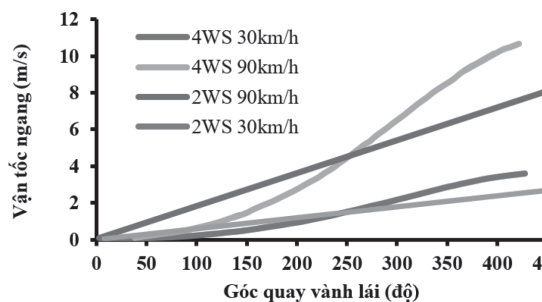
4. Kết quả khảo sát và thảo luận

Giả thuyết xe chạy trên đường phẳng có hệ số bám là 0.8 và lực cản gió là không đáng kể.

4.1 Khảo sát vận tốc góc lệch và vận tốc ngang của xe 4WS và 2WS



Hình 6: Vận tốc góc lệch của xe 4WS và 2WS theo góc quay vô lăng lái



Hình 7: Vận tốc ngang của xe 4WS và 2WS theo góc vành lái

Nhận xét 1: Xe 4WS (kể cả xe 2WS) di chuyển ở vận tốc cao ($v=90\text{km/h}$) có vận tốc ngang và vận tốc góc lệch lớn hơn nhiều so với xe khi đang chạy ở vận tốc thấp ($v=30\text{km/h}$). Nếu người lái điều khiển xe ở tốc độ tương đối cao ở một góc cua gấp, điều này sẽ khiến xe có xu hướng bị lật cao hơn. Tài xế nên chạy với tốc độ định mức cho phép.

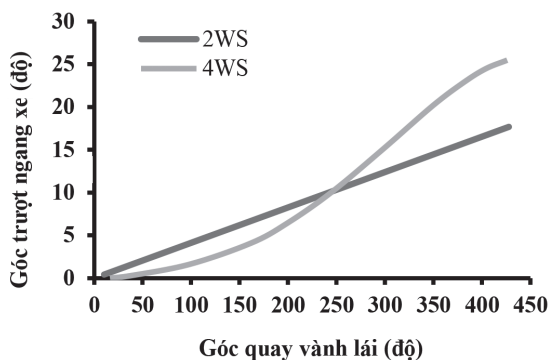
Nhận xét 2: Góc quay vành lái dưới 240° , vận tốc ngang và vận tốc góc lệch của ô tô 4WS đều thấp hơn nhiều so với xe với

2WS. Ở vận tốc 30 km/h , thấp hơn 57%. Tương tự ở vận tốc 90m/h , thấp hơn 20%. Điều này cho thấy xe 4WS có xu hướng ổn định hơn xe 2WS ở góc quay vành lái dưới 240° . Vận tốc ngang thấp hơn chứng tỏ khả năng chống lật đổ của 4WS cũng tốt hơn nhiều so với 2WS. Điều này giúp giảm tình trạng tai nạn giao thông.

Nhận xét 3: Góc quay trên 240° , vận tốc ngang và vận tốc lệch của ô tô 4WS cao hơn so với ô tô 2WS và sự chênh lệch này có xu hướng tăng dần ở góc quay vô lăng càng lớn. Điều này chứng tỏ ô tô 4WS có khả năng cơ động tốt hơn khi xe quay đầu, đây là một lợi thế của xe 4WS trong các trường hợp như đỗ xe hoặc vào cua.

4.2 Mô phỏng góc trượt ngang

4.2.1 Góc trượt ngang của xe β

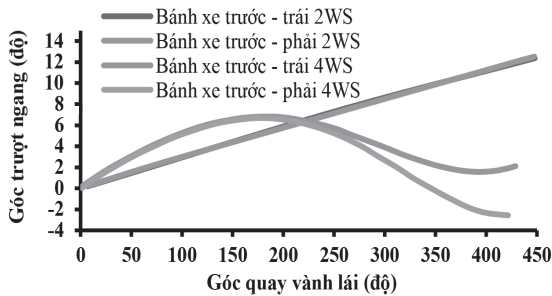


Hình 8: Góc trượt ngang của xe theo góc đánh lái

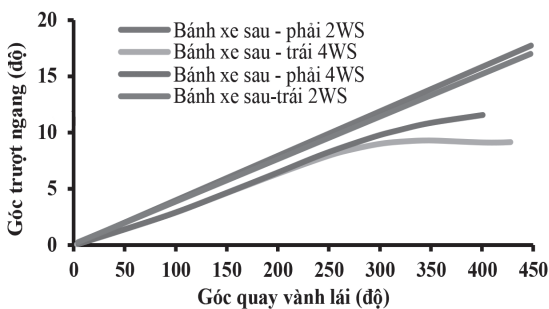
Nhận xét 4: Ta nhận thấy khi góc quay vành lái dưới vô lăng 240° , xe 4WS có độ trượt ngang ít hơn 2WS, nghĩa là xe ít có xu hướng lệch hướng hơn so với xe 2WS. Đây là ưu điểm của 4WS khi vô lăng dưới 240° sẽ ít bị mất ổn định ở tốc độ cao (như chúng ta đã quan sát ở hình 2 và tài liệu [12] người lái hiếm khi cầm quay vô lăng quá nhiều khi lái xe ở tốc độ cao trên đường. Nhưng ở tốc độ thấp, xét khi quay

đầu xe hoặc đỗ xe, khi vô lăng quay hơn 240° thì giá trị góc trượt ngang lại lớn hơn (lớn hơn 56% ở góc quay 400°), điều này chứng tỏ xe 4WS có xu hướng dễ dàng quay đầu xe hơn

4.2.2 Góc trượt bánh xe



Hình 9: Góc trượt ngang của bánh xe trước của xe 2WS và 4WS



Hình 10: Góc trượt ngang của bánh xe sau của xe 2WS và 4WS

Nhận xét 5: Trong hình 7 và 8, ta nhận thấy góc trượt ngang của xe 2WS gần như là đường thẳng. Trong khi đó, đồ thị của xe 4WS là một đường cong như một đồ thị hình sin. Điều này cho thấy khả năng thích ứng của xe 4WS ở các dãy vận tốc khác nhau là tốt hơn.

Nhận xét 6: Trong hình 7 và hình 8, góc trượt ngang của bánh trước đạt cực đại trong phạm vi từ 150° đến 200° , vô lăng quay là do tại thời điểm đó, xe 4WS đang đạt các điều kiện giống như xe 2WS góc quay bánh sau của 4WS đạt đến mức 0. Đó là lý do tại sao lại có đường cong như vậy. Sau đó, giá trị sẽ giảm dần vì khả năng quay bánh sau của 4WS đang đạt mức sử dụng

tối đa; trong đó góc quay của bánh sau đạt 5° (góc quay tối đa), ảnh hưởng đến tác dụng của góc trượt ngang của bánh trước.

Nhận xét 7: Chúng ta sẽ xem xét giá trị góc trượt ngang tối đa cho cả 2WS và 4WS. Còn đối với 2WS, góc trượt ngang của bánh xe có thể lên tới 12° đối với bánh trước và 18° đối với bánh sau. Đối với 4WS, góc trượt ngang bánh tối đa chỉ đạt khoảng $6,8^\circ$ đối với bánh trước (ít hơn 79%) và 11° (ít hơn 63%) đối với bánh sau. Dữ liệu này cho thấy bánh xe 4WS có phạm vi góc trượt ngang thấp hơn so với bánh xe 2WS. Góc trượt ngang thấp hơn có nghĩa là bánh xe 4WS có tỷ lệ mòn lốp thấp hơn, giúp bánh xe 4WS sử dụng lốp lâu hơn và tính ổn định cũng tốt hơn.

5. Kết luận và hướng phát triển

Nghiên cứu này đã xây dựng được mô hình và mô phỏng khảo sát ảnh hưởng của góc xoay vô lăng lái (4WS và 2WS) đến vận tốc góc lệch, vận tốc ngang, góc trượt ngang của xe, góc trượt ngang tại bánh xe trước và sau tại vận tốc 30 km/h và 90 km/h. Kết quả cho thấy ở góc quay vô lăng nhỏ hơn 240° , xe 4WS có các giá trị đánh giá tính ổn định tốt hơn rất nhiều so với xe 2WS, điều này cho thấy xe 4WS ổn định hơn khi chạy ở vận tốc cao. Ngược lại, ở góc quay vô lăng lớn hơn 240° , xe 4WS có tính cơ động tốt hơn, điều này giúp xe dễ dàng đỗ xe hay vào cua. Ngoài ra, nghiên cứu cho thấy lốp của xe 4WS sử dụng được lâu hơn và có tính ổn định tốt hơn.

Nghiên cứu cho thấy ô tô 4WS ở vận tốc cao tuy ổn định hơn xe 2WS nhưng cũng rất nguy hiểm, điều này khuyến cáo tài xế nên chạy xe trong vận tốc an toàn.

Đề tài có thể khảo sát vận tốc nguy hiểm của ô tô ở các góc cua khác nhau tại các vận tốc khác nhau cho các xe khác nhau, từ đó đưa ra các cảnh báo an toàn ở các giao lộ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO**Tài liệu tiếng Việt**

- [1]. Nguyễn Khắc Trai, Nguyễn Trọng Hoan, Hồ Hữu Hải, “Giáo trình Kết Cấu Ô Tô”, nhà xuất bản Đại Học Bách khoa Hà Nội, năm 2020.
- [2]. Phạm Quang Hưng, “Mô phỏng hệ thống lái bốn bánh xe dẫn hướng dùng cho ô tô con”, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, năm 2007.
- [3]. Lê Ngọc Trung, “Mô phỏng quỹ đạo chuyển động của Ô tô bốn bánh xe dẫn hướng”, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, năm 2008.
- [4]. Hoàng Tùng Nghĩa, “Nghiên cứu xác định vận tốc nguy hiểm của ô tô con khi quay vòng bằng phần mềm Vehiclesim”, Hoàng Tùng Nghĩa, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào năm 2016.
- [5]. Nguyễn Thị Vy Thảo, “Nghiên cứu ảnh hưởng của lực ngang đến tính chất chuyển động của ô tô khách 16 chỗ”, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng, năm 2017.
- [6]. Bùi Quốc Huy “Xây dựng mô hình và mô phỏng động lực học ngang ô tô”, luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, năm 2017.
- [7] Lại Năng Vũ “Tổng hợp bộ điều khiển điện tử và mô phỏng hệ thống phanh có ABS trên ô tô du lịch”, luận án Tiến sĩ, năm 2007.

Tài liệu tiếng Anh

- [8]. Tourajizadeh, Hami, Mohsen Sarvari, and Sadegh Ordoo. “Modeling and Optimal Control of 4 Wheel Steering Vehicle Using LQR and its Comparison with 2 Wheel Steering Vehicle.” 2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE, 2018.
- [9]. Vilaplana, Miguel A., et al. “Control of sideslip and yaw rate in automobiles equipped with 4-wheel steer-by-wire.” SAE transactions (2004): 1082-1094.
- [10]. Hang, Peng, and Xinbo Chen. “Path tracking control of 4-wheel-steering autonomous ground vehicles based on linear parameter-varying system with experimental verification.” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 235.3 (2021): 411-423.4
- [11]. Singh, Arun, et al. “Study of 4 wheel steering systems to reduce turning radius and increase stability.” International Conference of Advance Research and Innovation (IAUTOMOTIVEI-2014). 2014.
- [12]. Four-wheel Steering (4WS) (Automobile), <https://what-when-how.com/automobile/four-wheel-steering-4ws-automobile/>
- [13] LS 500 LS 500h - V - Lexus Europe, <https://11-movies.lexus-europe.com/media/downloads/ls-brochure.pdf>