

# ĐIỀU KHIỂN GÓC QUAY BÁNH XE DẪN HƯỚNG CỦA HỆ THỐNG LÁI STEER-BY-WIRE ĐIỆN TỬ - THỦY LỰC SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN RISE

CONTROL THE ROAD WHEEL STEERING ANGLE OF ELECTRO-HYDRAULIC STEER-BY-WIRE SYSTEM USING RISE CONTROLLER

Nguyễn Xuân Tuấn<sup>1</sup>,

Đinh Thị Thanh Huyền<sup>2,\*</sup>, Nguyễn Văn Bang<sup>2</sup>

## TÓM TẮT

Hệ thống lái Steer-by-Wire (SBW) là một bước phát triển vượt bậc so với các hệ thống lái cơ khí, thủy lực hoặc hệ thống lái điện, bởi khả năng nâng cao tính an toàn chuyển động cho ô tô, tính thoải mái, linh hoạt cho người lái, cũng như đáp ứng tốt nhất những yêu cầu cho một chiếc xe ô tô tự lái trong tương lai. Bài báo này giới thiệu về một phương pháp điều khiển bền vững liên tục dựa trên thuật toán điều khiển RISE cho cụm chấp hành lái của hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực để điều khiển bánh xe dẫn hướng bám theo quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái. Hiệu quả điều khiển của thuật toán được minh họa bởi chương trình mô phỏng trên Matlab ở nhiều vận tốc khác nhau của xe và ở hai loại biên dạng mặt đường nhựa ướt và khô.

**Từ khóa:** Hệ thống lái Steer-by-wire điện tử - thủy lực; điều khiển bền vững; điều khiển phi tuyến.

## ABSTRACT

Steer-by-Wire system is a great development compared to mechanical, hydraulic or electric steering systems, because of its ability to improve vehicle safety, comfortability, and flexibility for drivers, as well as the requirements for a self-driving car in the future. This paper introduces a continuous robust control method using RISE controller for the steering wheel mechanism of the electro-hydraulic SBW system to drive the front wheels to track the reference trajectory from the handwheel. The control efficiency of the introduced controller is illustrated by several Matlab simulations at different vehicle speeds and on two different road conditions as dry and wet asphalt road surfaces.

**Keywords:** Electro-hydraulic Steer-by-wire system; robust control; nonlinear control.

<sup>1</sup>Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

\*Email: huyentdinh@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/02/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/3/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2022

## 1. TỔNG QUAN

Công nghệ X-by wire đã được áp dụng trên một số hệ thống của ô tô như: Động cơ (Throttle-by-wire), hệ thống

phanh (Brake-by-wire), hệ thống treo (Active suspension), hệ thống lái (Steering-by-wire), hộp số (shift-by-wire)... công nghệ này đã cho thấy những lợi ích vượt bậc như: nâng cao tính tiện nghi, cải thiện hiệu suất, tăng độ tin cậy, độ an toàn, giảm chi phí sản xuất, chi phí vận hành [1].

Với sự loại bỏ hoàn toàn trực lái và thay thế bằng công nghệ lái điện tử, hệ thống lái Steer-by-Wire (SBW) đang là một bước phát triển vượt bậc so với các hệ thống lái cơ khí, thủy lực hoặc hệ thống lái điện, hiện đang được sử dụng trên các phương tiện xe cơ giới, bởi khả năng nâng cao an toàn chuyển động cho ô tô, tăng tính linh hoạt cho người lái, cũng như đáp ứng tốt nhất những yêu cầu cho một chiếc xe ô tô tự lái trong tương lai [2].

Gần đây, nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã tập trung vào vấn đề mô hình hóa và điều khiển cho hệ thống lái SBW [3-6]. Hai vấn đề điều khiển đối với hệ thống lái SBW bao gồm: điều khiển chấp hành dẫn hướng và điều khiển tạo cảm giác lái. Bài báo này tập trung vào vấn đề điều khiển dẫn hướng cho hệ thống lái SBW, nhiệm vụ là dẫn động cơ cấu lái làm quay bánh xe dẫn hướng bám theo góc quay vành lái.

Một số phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu và áp dụng cho hệ thống lái SBW. Nghiên cứu về các vấn đề điều khiển và an toàn cho hệ thống SBW của tác giả Paul Yih, trong đó phương pháp điều khiển cho mô hình tuyến tính của hệ thống lái đã được giới thiệu và tiến hành thực nghiệm trên xe [7]. Nghiên cứu của Chunyan Wang và cộng sự về điều khiển góc quay bánh xe dẫn hướng của hệ thống SBW sử dụng thuật toán PID thích nghi - mờ và tiến hành mô phỏng trong các điều kiện làm việc khác nhau cho thấy điều khiển góc bánh xe dẫn hướng dựa trên PID thích nghi - mờ có thể làm cho hệ thống đạt được sự kiểm soát tốt, ổn định trong các điều kiện nhất định [8]. Nghiên cứu của Yixin Yao về các phương pháp điều khiển cho hệ thống SBW [1].

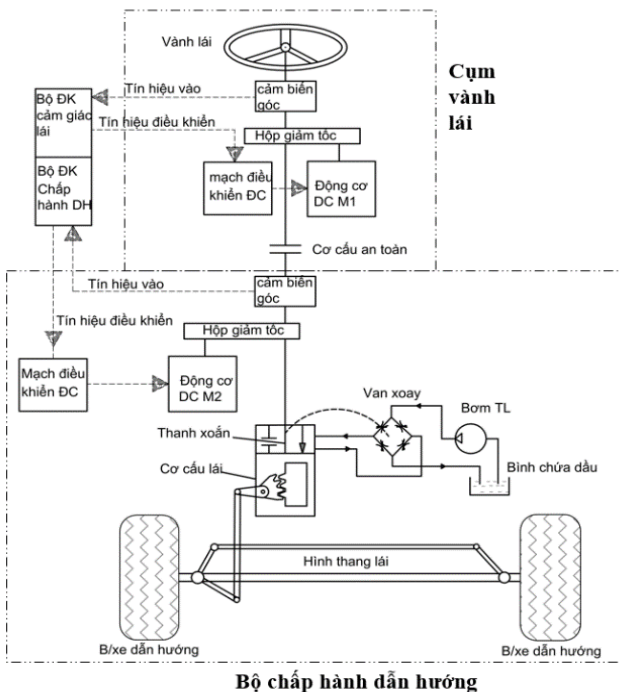
Tuy nhiên, các nghiên cứu điều khiển cho hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực, nhất là có xét tới các vấn đề về nhiễu và vấn đề không xác định của phương trình động

lực học còn hạn chế. Bộ điều khiển RISE (Robust Integral of the Sign of the Error) giới thiệu trong bài báo được thiết kế để thực hiện nhiệm vụ điều khiển góc đánh lái của cụm chấp hành dẫn hướng bám theo quỹ đạo tham chiếu của vành tay lái, tạo ra sự đồng bộ của hệ thống lái dù trục lái đã bị loại bỏ. Bộ điều khiển đưa ra là bộ điều khiển liên tục và có tính bền vững. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab đã minh họa cho hiệu quả của phương pháp điều khiển.

Phần tiếp theo của bài báo trình bày về mô hình động lực học của bộ chấp hành dẫn hướng hệ thống SBW điện tử - thủy lực, giới thiệu về bộ điều khiển RISE cùng với các yêu cầu lựa chọn các tham số điều khiển, các kết quả mô phỏng được thực hiện với hai chu kỳ lái khác nhau, ở nhiều vận tốc khác nhau của xe và hai điều kiện mặt đường.

## 2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA BỘ CHẤP HÀNH DẪN HƯỚNG

Sơ đồ khối của hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực được mô tả ở hình 1, bao gồm cụm vành lái, cụm bộ chấp hành dẫn hướng và cụm bộ điều khiển SBW. Tuy không có liên kết cơ khí bằng trụ lái giữa cụm vành lái và cụm bộ chấp hành dẫn hướng, tuy nhiên, bộ điều khiển SBW thực hiện việc kết nối bằng dây giữa vô lăng và cơ cấu bánh xe dẫn hướng. Trong đó, cụm bộ chấp hành dẫn hướng bao gồm: Động cơ điện M2, hộp giảm tốc, trợ lực thủy lực (góc xoắn của thanh xoắn điều khiển van thủy lực là liên kết giữa hệ cơ khí và hệ thủy lực được chỉ ra bằng đường nét đứt), cơ cấu lái, hình thang lái và bánh xe dẫn hướng [9].



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực

Phương trình động lực học của cụm bộ chấp hành dẫn hướng được mô tả bởi phương trình như sau [6, 9-12]:

$$J_t \ddot{\delta}_f + B_t \dot{\delta}_f + \tau_f + \tau_e = k_r u + r_p F_b \quad (1)$$

Trong đó:  $\delta_f, \dot{\delta}_f, \ddot{\delta}_f$  lần lượt kí hiệu góc quay, vận tốc góc và gia tốc góc của góc đánh lái. Trong (1),  $J_t$  và  $B_t$  kí hiệu mô men quán tính tổng thể và hệ số cản nhớt tổng thể của cụm bộ chấp hành dẫn hướng,  $\tau_f$  là thành phần ma sát của hệ,  $\tau_e$  kí hiệu mô men cản quay,  $u$  là mô men chủ động đặt lên hệ thống lái bởi động cơ dẫn động  $M_2$ , với  $k_r$  là tỉ số truyền của hộp giảm tốc. Ngoài ra,  $F_b$  là lực trợ lực thủy lực và  $r_p$  là bán kính bánh răng của cơ cấu thanh răng - bánh răng.

Phương pháp điều khiển trong bài báo được phát triển với giả thiết là góc quay, vận tốc góc  $\delta_f, \dot{\delta}_f$  có thể đo được để sử dụng xây dựng bộ điều khiển. Các đại lượng  $J_t, B_t, \tau_f$  và  $\tau_e$  là các đại lượng không xác định và bị chặn.

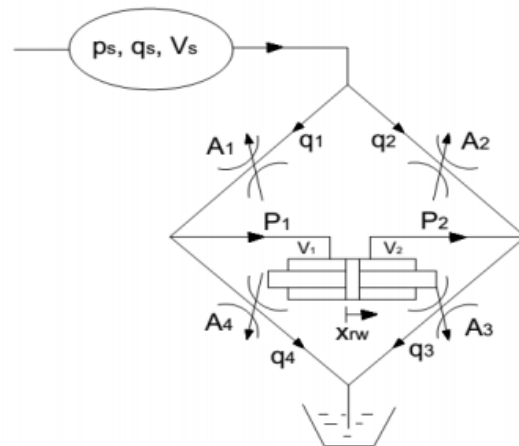
Mô men cản quay  $\tau_e$  là thành phần nhiễu chính bên ngoài tác động vào hệ thống lái, trong đó mô men  $\tau_e$  được ước lượng bởi công thức:

$$\tau_e = -C_f (t_m + t_p) \left( \beta + \frac{V_l}{V} - \delta_f \right) \quad (2)$$

Trong đó, động lực học của chuyển động lệch bên được xác định bởi [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_f - C_r}{mV} & -1 + \frac{C_{l_r} - C_{l_f}}{mV^2} \\ \frac{C_{l_r} - C_{l_f}}{I_z} & \frac{-C_{l_f}^2 - C_{l_r}^2}{I_z V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f \\ \frac{C_{l_f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (3)$$

Hệ thống thủy lực trợ lực được mô hình hóa như hình 2.



Hình 2. Mô hình hệ thống trợ lực thủy lực

Bơm thủy lực được dẫn động bởi động cơ; van thủy lực điều khiển dòng thủy lực vào/ra các bên của xi lanh: Trong cụm van có thanh xoắn, ống van trong, vỏ ngoài van. Khi người lái quay vành lái, thanh xoắn bị xoắn lại, ống van trong quay tương đối với vỏ ngoài, sẽ mở các cửa van làm tăng áp suất thủy lực tác động lên một phía pít tông đồng thời hạn chế dòng thủy lực đi vào phía bên kia; trong cụm xy lanh - pít tông: Sự chênh lệch về áp suất thủy lực giữa hai phía của pít tông sẽ tạo ra lực đẩy làm pít tông dịch chuyển thông qua cơ cấu đòn quay làm quay bánh xe dẫn hướng.

Áp suất tải  $p_L$  và áp suất hệ thống  $p_s$  được xác định bởi các phương trình dưới đây [13]:

$$\begin{aligned} \dot{p}_s &= \frac{\beta}{V_s} \left( q_p - C_d A_1 \sqrt{\frac{p_s - p_L}{\rho}} - C_d A_2 \sqrt{\frac{p_s + p_L}{\rho}} \right) \\ \dot{p}_L &= \frac{\beta}{V_0} \left( C_d A_1 \sqrt{\frac{p_s - p_L}{\rho}} - C_d A_2 \sqrt{\frac{p_s + p_L}{\rho}} - A_p x_r \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Trong (4),  $x_r$  là dịch chuyển của thanh răng,  $x_r = r_w \delta_f$ . Lực tác dụng lên pít tông làm pít tông dịch chuyển được tính theo phương trình (5) [13]:

$$F_B = A_p p_L \quad (5)$$

### 3. MỤC TIÊU ĐIỀU KHIỂN VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN RISE CHO CỤM CHẤP HÀNH DẪN HƯỚNG

Mục tiêu là điều khiển góc đánh lái  $\delta_f$  của bánh xe dẫn hướng đảm bảo bám quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái  $\delta_{fr}$  bất chấp sự tác động của nhiễu tác động ngoài và các thành phần không xác định trong hệ thống SBW. Trong đó, quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái  $\delta_{fr}$  là đại lượng tương ứng tỉ lệ với góc quay của vành tay lái  $\delta_h$  được giảm đi  $n_{sr}$  lần, với  $n_{sr}$  là tỉ số truyền của hệ thống lái. Phương trình động lực học của cụm vành tay lái có thể được biểu diễn như sau [14]:

$$J_h \ddot{\delta}_h + B_h \dot{\delta}_h + C_h \delta_h + \tau_r = \tau_h \quad (6)$$

Trong đó,  $J_h, B_h, C_h$  tương ứng là mô men quán tính, hệ số cản nhớt và hệ số cứng của vành tay lái,  $\tau_r$  là mô men cung cấp cảm giác lái được đặt lên bởi động cơ  $M_1$  và  $\tau_h$  là mô men đánh lái từ người lái. Từ đó, quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái  $\delta_{fr}$  được xác định như sau:

$$\delta_{fr} = \frac{\delta_h}{n_{sr}} \quad (7)$$

Thông tin về góc quay  $\delta_h$  và vận tốc góc  $\dot{\delta}_h$  của vành tay lái được đo lường để phản hồi cho bộ điều khiển. Bộ điều khiển cho mục tiêu này được lựa chọn là bộ điều khiển RISE với các ưu điểm về tính bền vững và tính liên tục của tín hiệu điều khiển. Tín hiệu điều khiển RISE được xây dựng dạng như sau:

$$u = \frac{1}{k_r} (k_{e_2} - k_{e_2}(0) + u), \quad (8)$$

Trong đó,  $u \in \mathbb{R}$  là nghiệm của phương trình vi phân:

$$\dot{u} = \alpha_2 e_2 + \beta_1 \text{sgn}(e_2). \quad (9)$$

Trong đó, từ mục tiêu điều khiển, các sai số điều khiển và sai số điều khiển phụ trợ trong (8), (9) được định nghĩa như sau:

$$e_1 \triangleq \delta_{fr} - \delta_f, \quad e_2 \triangleq \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1, \quad (10)$$

Với các tham số  $\alpha_1, \alpha_2, k, \beta_1 \in \mathbb{R}$  là các hằng số điều khiển dương, được lựa chọn theo điều kiện đủ [15, 16]. Bộ điều khiển RISE được cho trong phương trình (8), (9), với các tham số điều khiển được lựa chọn đủ lớn theo điều kiện đủ sẽ đảm bảo rằng sai số điều khiển bám quỹ đạo tiến tới 0 theo đường tiệm cận, tức  $\|e_2(t)\| \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ .

### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Một số mô phỏng được thực hiện bởi Matlab cho hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực để kiểm tra hiệu quả điều khiển của bộ điều khiển RISE trong (8), (9), cho mục tiêu bám quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái  $\delta_{fr}$ , bất chấp sự tác động của nhiễu tác động ngoài và các thành phần không xác định trong hệ thống. Thông số động học và động lực học của hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực được cho trong bảng 1 (các thông số được tham khảo từ [4] và [17]). Momen ma sát  $\tau_r$  trong (1) được lựa chọn dạng  $\tau_r = F_s \tanh(\delta_f)$ .

Bảng 1. Các tham số động học và động lực học của hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực

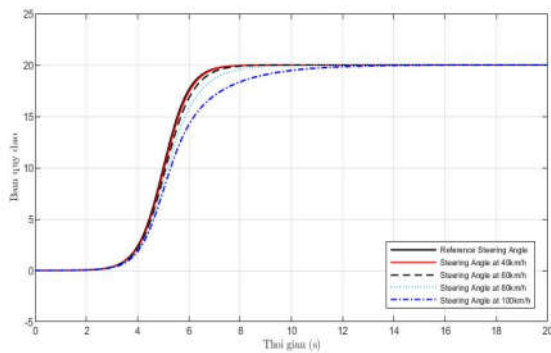
Kí hiệu	Giá trị (Đơn vị)
$J_{fw}, J_{sm}$	3,8; 0,0035 (kg.m <sup>2</sup> )
$B_{fw}, B_{sm}$	10; 0,018 (Nms/rad)
$m$	2000 (kg)
$k_r$	18
$F_s$	3 (Nm)
$l_r, l_f$	0,016; 0,023 (m)
$I_z$	1300 (kgm <sup>2</sup> )
$C_f = C_r$	45000 (N/rad) cho mặt đường nhựa ẩm; 80000 (N/rad) cho mặt đường nhựa khô
$r_w, r_p$	0,27 (m); 0,073 (m)
CA	0,6
$\rho$	830 (kg.m <sup>3</sup> )
$A_p, L$	8,26.10 <sup>-2</sup> (m <sup>2</sup> ); 0,4 (m)
$\beta$	8,7 (kgf/m <sup>2</sup> )
$V_s$	2.10 <sup>-2</sup> (m <sup>3</sup> )
$q_p$	9 (l/min)

Bộ điều khiển trong (8), (9) cung cấp tính bền vững đối với mô men cản quay  $\tau_e$ . Để so sánh kết quả mô phỏng, vận tốc xe  $V$  được giả sử là hằng số nhưng nhận các giá trị vận tốc khác nhau: 40km/h, 60km/h, 80km/h và 100km/h để minh họa cho tính bền vững của bộ điều khiển được đưa ra.

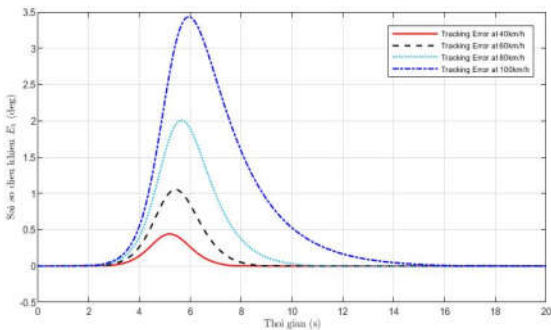
Chu kỳ lái của vành tay lái trong các mô phỏng này được lựa chọn với quỹ đạo tham chiếu  $\delta_{fr}$  dạng đường sigmoid, với vận tốc  $V$  của xe nhận các giá trị khác nhau. Để kiểm tra hiệu quả điều khiển lái, các giá trị độ cứng của lốp trước và sau khi quay vòng  $C_f, C_r$  được lựa chọn tương ứng với điều kiện mặt đường nhựa khô và ướt với giá trị trong bảng 1. Khi giá trị ban đầu của góc đánh lái được chọn là  $\delta_f(0) = 0$  (deg).

Các tham số điều khiển được lựa chọn như sau:  $\alpha_1 = 13,5; \alpha_2 = 22,5; \beta_1 = 10$  và  $k = 150$ . Kết quả mô phỏng cho nhiệm vụ bám chu kỳ lái dạng sigmoid cho điều kiện mặt đường khô được biểu diễn ở các hình 3 ÷ 6. Trong các hình vẽ này đều chỉ ra kết quả bám quỹ đạo rất tốt giữa bánh xe dẫn hướng và quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái. Ngoài ra, các giá trị RMS và giá trị max của sai số điều khiển và tín hiệu điều khiển được trình bày ở bảng 2. Kết quả mô

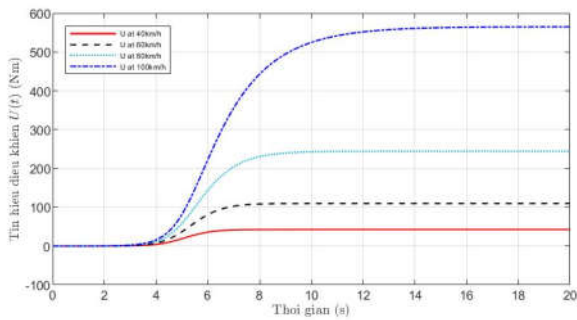
phòng chỉ ra rằng các sai số điều khiển đều khá nhỏ, tuy nhiên, tăng lên cùng với vận tốc của xe và lớn hơn ở điều kiện mặt đường nhựa ướt.



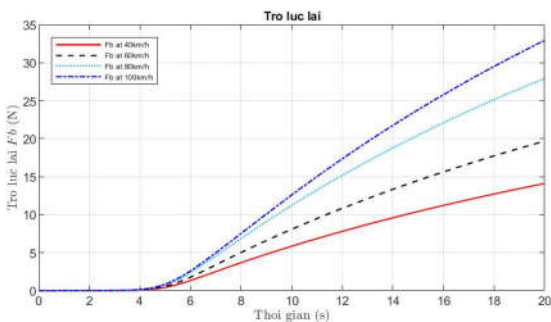
Hình 3. Đồ thị bám quỹ đạo tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường khô



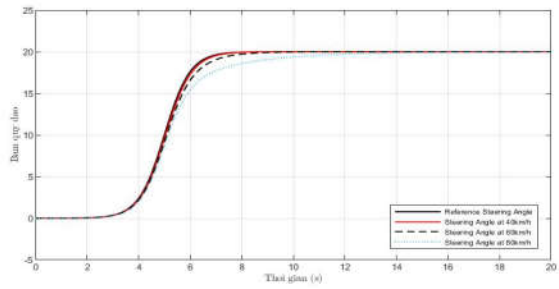
Hình 4. Đồ thị sai số bám quỹ đạo tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường khô



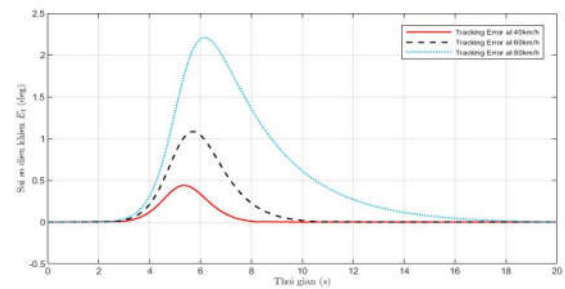
Hình 5. Đồ thị tín hiệu điều khiển tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường khô



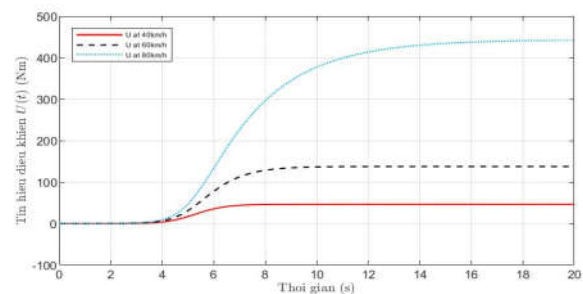
Hình 6. Đồ thị trợ lực lái tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường khô



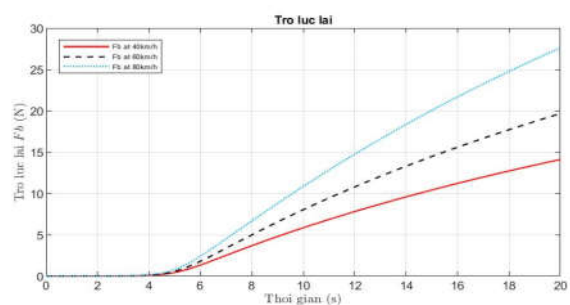
Hình 7. Đồ thị bám quỹ đạo tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường ướt



Hình 8. Đồ thị sai số bám quỹ đạo tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường ướt



Hình 9. Đồ thị tín hiệu điều khiển tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường ướt



Hình 10. Đồ thị trợ lực lái tại các vận tốc xe khác nhau ở điều kiện mặt đường ướt

Bảng 2. Giá trị RMS và max của sai số điều khiển và tín hiệu điều khiển ở các vận tốc và điều kiện mặt đường khác nhau

Chỉ tiêu	Mặt đường khô	Mặt đường ướt
RMS của sai số điều khiển (deg)	0,12 ở 40km/h	0,12 ở 40km/h
	0,29 ở 60km/h	0,33 ở 60km/h
	0,60 ở 80km/h	0,83 ở 80km/h
	1,18 ở 100km/h	

Max của sai số điều khiển (deg)	0,44 ở 40km/h	0,44 ở 40 km/h
	1,05 ở 60km/h	1,08 ở 60km/h
	2,01 ở 80km/h	2,21 ở 80km/h
	3,43 ở 100km/h	
RMS của tín hiệu điều khiển (Nm)	36,13 ở 40km/h	46,28 ở 40km/h
	91,85 ở 60km/h	137,44 ở 60km/h
	200,28 ở 80km/h	442,09 ở 80km/h
	440,12 ở 100km/h	
Max của tín hiệu điều khiển (Nm)	42,66 ở 40km/h	46,28 ở 40km/h
	109,76 ở 60km/h	137,44 ở 60km/h
	244,32 ở 80km/h	442,09 ở 80km/h
	564,98 ở 100km/h	

**5. KẾT LUẬN**

Một phương pháp điều khiển bám quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái cho bộ chấp hành dẫn hướng đã được giới thiệu trong bài báo. Phương trình động lực học của cụm chấp hành dẫn hướng cùng với hệ thống thủy lực trợ lực lái mang bản chất phi tuyến, không xác định và có tác động của nhiễu ngoài. Tín hiệu điều khiển RISE là tín hiệu liên tục được thiết kế có tính bền vững để loại bỏ tác dụng của nhiễu và lái bánh xe dẫn hướng bám theo quỹ đạo tham chiếu từ vành tay lái. Các kết quả mô phỏng từ Matlab cho hệ thống lái SBW điện tử - thủy lực được thực hiện để minh họa cho hiệu quả điều khiển ở các vận tốc xe khác nhau và ở hai điều kiện mặt đường khác nhau. Trong đó, các sai số điều khiển đều khá nhỏ, tuy nhiên, tăng lên cùng với vận tốc của xe và lớn hơn ở điều kiện mặt đường nhựa ướt.

**LỜI CẢM ƠN**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2021-CK-002.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Yao Y., 2006. *Vehicle steer-by-wire system control*, No. 2006-01-1175. SAE Technical Paper.

[2]. Kazemi R., Mousavinejad I., 2011. *A Comprehensive model for developing of steer-by-wire system*. Int J Mech Aerosp Ind Mechatron Eng, vol. 5, no. 8, pp. 17-23.

[3]. Mohamed E. S., Albatlan S. A., 2014. *Modeling and experimental design approach for integration of conventional power steering and a steer-by-wire system based on active steering angle control*. American Journal of Vehicle Design, vol. 2, no.1, pp. 32-42.

[4]. Do M. T., Man Z., Zhang C., Wang H., Tay F. S., 2013. *Robust sliding mode-based learning control for steer-by-wire systems in modern vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no.2, pp. 580-590.

[5]. Fahami S. M. H., Zamzuri H., Mazlan S. A., Zakaria M. A., 2012. *Modeling and simulation of vehicle steer by wire system*. In 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, pp. 765-770.

[6]. Dinh Thi Thanh Huyen, Nguyen Xuan Tuan, Nguyen Van Bang, 2022. *Design a robust controller for tracking control between steering wheel and road wheels in Steer-by-wire systems*. Science Journal of Transportation, no. 12.

[7]. Yih P., 2005. *Steer-by-wire: implications for vehicle handling and safety*. Stanford University.

[8]. Wang C., Zhou D., Zhao W., Gu X., 2015. *Front wheel angle control of steering by wire system based on fuzzy adaptive PID algorithm*. WSEAS Trans Syst Control, 10, 577-583.

[9]. N. X. Tuan, H. T. Dinh, N. V. Bang, 2019. *Research on Dynamic Modelling for Hydraulic Power Automotive Steering Systems with Nonlinear Friction*. Springer Nature, Lecture notes in Networks and Systems, no. 104, pp.620-627, doi: doi.org/10.1007/978-3-030-37497-6\_71.

[10]. P. Yih, J. C. Gerdes, 2005. *Modification of vehicle handling characteristics via steer-by-wire*. IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 13, no. 6, pp. 965-976.

[11]. P. Setlur, J. R. Wagner, D. M. Dawson, D. Braganza, 2006. *A trajectory tracking steer-by-wire control system for ground vehicles*. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 55, no. 1, pp. 76-85.

[12]. H. Wang, Z. Man, W. Shen, Z. Cao, J. Zheng, J. Jin, 2014. *Robust control for steer-by-wire systems with partially known dynamics*. IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 10, no. 4, pp. 2003-2015.

[13]. A. Dell'Amico, 2016. *On Electrohydraulic Pressure Control for Power Steering Applications Active Steering for Road Vehicles*. Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling, vol. 1739, Linköping University Electronic Press.

[14]. N. Bajcinca, R. Cortesao, M. Hauschild, 2005. *Robust control for steer-by-wire vehicles*. Auton. Robots, vol. 19, no. 2, pp. 193-214.

[15]. H. T. Dinh, R. Kamalapurkar, S. Bhasin, W. E. Dixon, 2014. *Dynamic neural network-based robust observers for uncertain nonlinear systems*. Neural Networks, 2014, vol. 60, pp. 44-52.

[16]. H. T. Dinh, S. Bhasin, R. Kamalapurkar, W.E. Dixon, 2017. *Dynamic neural network-based output feedback tracking control for uncertain nonlinear systems*. J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 139, no. 7, pp. 074502.

[17]. H. Wang, H. Kong, Z. Man, Z. Cao, W. Shen, 2013. *Sliding mode control for steer-by-wire systems with AC motors in road vehicles*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 3, pp. 1596-1611.

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Xuan Tuan<sup>1</sup>, Dinh Thi Thanh Huyen<sup>2</sup>, Nguyen Van Bang<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Automobile Technology, Hanoi University of Industry

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications