

## Điều khiển trượt toàn cục kết hợp quan sát trạng thái mở rộng trong bám độ trượt bánh xe

Đàm Hữu Mạnh<sup>1</sup>, Nguyễn Xuân Nam<sup>1</sup>, Phạm Xuân Đức<sup>1</sup>,  
Nguyễn Thế Anh<sup>1</sup>, Lê Đức Thịnh<sup>2</sup>, Nguyễn Tùng Lâm<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam;

<sup>2</sup>Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Thủy lợi, 175 Tây Sơn, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam.

\*Tác giả liên hệ: lam.nguyentung@hust.edu.vn

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 08/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.72-78>

### TÓM TẮT

Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS) là một bộ phận quan trọng được thiết kế để duy trì lực kéo của bánh xe trong quá trình phanh, tăng cường sự an toàn cho xe bằng cách ngăn chặn hiện tượng bó cứng bánh xe. Nhằm nâng cao hiệu suất của hệ thống ABS, nghiên cứu này đề xuất một chiến lược điều khiển trượt toàn cục (GSMC) cải tiến. Cụ thể, bộ điều khiển này được thiết kế dựa trên luật tiếp cận hàm mũ mới, giúp loại bỏ thành phần đưa biến trạng thái tiến về mặt trượt và đảm bảo hiệu suất mạnh mẽ cho quá trình đáp ứng của hệ thống so với bộ điều khiển trượt (SMC). Đồng thời, bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) được sử dụng kết hợp với GSMC để ước lượng tổng thành phần bất định tác động lên hệ thống. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính khả thi của chiến lược điều khiển đề xuất, giúp đạt độ trượt bánh xe mong muốn và giảm thời gian phanh.

**Từ khóa:** Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS); Chiến lược điều khiển trượt toàn cục (GSMC); Bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO); Điều khiển trượt (SMC).

### 1. MỞ ĐẦU

Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS) là một trong những thành phần thiết yếu nhất trên các phương tiện hiện đại nhằm cải thiện sự an toàn và chắc chắn của xe với chức năng chính là để tránh bánh xe bị bó cứng khi phanh và tăng hiệu suất phanh [1]. ABS hoạt động với hai mục đích chính và cũng trở thành hai yếu tố quan trọng bậc nhất trong các phương tiện ngày nay đó là: tối ưu hóa lực phanh để đạt được hiệu quả tối đa và kiểm soát các lực tác động lên bánh xe nhằm duy trì độ ổn định cho tay lái. Để đáp ứng nhu cầu này, rất nhiều giải pháp áp dụng trên ABS đã được đưa ra và phát triển. Ví dụ kiểm soát ổn định điện tử (ESC) hệ thống có thể đạt được sự ổn định ngang bằng cách ra lệnh mô men phanh hoặc độ trượt bánh xe mong muốn [2]; hệ thống phanh khẩn cấp tự động (AEB) có thể ngăn ngừa tai nạn và giảm thương vong đồng thời bằng cách điều khiển phanh mô-men xoắn hoặc độ trượt bánh xe mong muốn [3]. Phương pháp phổ biến gần đây có xu hướng kiểm soát độ trượt bánh xe, ngăn bánh xe đang chuyển động không đột ngột bị khóa cứng bằng cách kiểm soát và bám độ trượt của nó liên tục theo thời gian [4].

Các phương pháp kiểm soát độ trượt bánh xe như đã nhắc ở trên có thể chia làm hai nhóm chính: kỹ thuật điều khiển dựa trên quy tắc độ trượt của bánh xe làm trung tâm và kỹ thuật kiểm soát mô-men phanh trực tiếp dựa trên mô hình động lực học của xe hoặc bánh xe. Challa và cộng sự đề xuất thuật toán ngưỡng tăng tốc bánh xe và trượt dựa trên quy tắc 3 pha kết hợp cho phanh chống bó cứng trong HCRV và đưa ra phương pháp xác định đặc tính các giá trị ngưỡng tạo nên thuật toán ABS dựa trên quy tắc [5]. Vignati và cộng sự đề xuất phương pháp dựa trên đạo hàm lực và gia tốc ngoại vi của bánh xe. Những thay đổi về ngưỡng và mức tăng của chiến lược kiểm soát được thực hiện để cải thiện hiệu suất bằng cách ước tính tải trọng bình thường và ma sát hệ số [6]. Solyom và cộng sự cũng đã giới thiệu bộ điều khiển theo lịch trình khuếch đại để kiểm soát độ trượt của lốp được đề xuất cùng với mô hình thiết kế và bộ điều khiển được đề xuất đã được cân nhắc kỹ lưỡng một số phương pháp kiểm tra khác về mặt giảm tốc [7]. Một bộ điều khiển lực kéo chế độ trượt bậc hai cho ô tô đã được đề xuất bởi Amodeo và cộng sự, và các kết quả mô

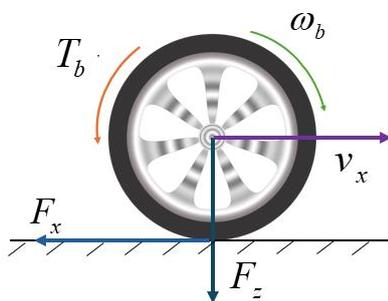
phòng đã cho thấy hệ thống điều khiển đề xuất có hiệu quả [8]. Mirzaei và Mirzaeinejad đã xây dựng mô hình một phần tư xe sử dụng mô hình lớp Dugoff làm mô hình danh nghĩa và đề xuất một phương pháp dự đoán lý tưởng để phát triển bộ điều khiển trượt bánh xe phi tuyến bền vững [9]. Nghiên cứu của Johansen và cộng sự đã đóng góp vào hệ thống kiểm soát trượt bánh xe dựa trên mô hình kết hợp với điều chỉnh khuếch đại. Mô hình này được tuyến tính hóa về độ trượt bánh xe và tốc độ của xe được coi là một tham số thay đổi theo thời gian [10].

Lý thuyết điều khiển chế độ trượt (SMC) cũng đã được sử dụng phổ biến nhờ các ưu điểm như đáp ứng nhanh, bền vững với các thành phần bất định [11, 12]. ABS là một những hệ thống đã được áp dụng chiến lược điều khiển này trong các nghiên cứu trước. Tuy nhiên, đặc tính bền vững chỉ được đảm bảo sau khi hệ thống đạt đến mặt trượt. Cùng với đó, tác động của nhiễu bất định bên ngoài không được thảo luận trong bất kỳ nghiên cứu nào đã đề cập ở trên; chỉ tác động của bất định thông số mô hình đến hiệu suất hệ thống được kiểm tra. Thiết kế bộ điều khiển trượt bánh xe dựa trên mô hình bao gồm bất định thông số mô hình và nhiễu bất định bên ngoài là cần thiết.

Để khắc phục hạn chế đó, nghiên cứu này đề xuất phương pháp điều khiển trượt toàn cục dựa trên mô hình xe bốn bánh kết hợp với ESO. ESO được sử dụng để ước tính các biến trạng thái và tổng độ không đảm bảo của mô hình mà không cần đến dạng đạo hàm của biến trượt. Đồng thời, nghiên cứu này trình bày sự so sánh chi tiết giữa hai chiến lược điều khiển trượt toàn cục kết hợp ESO và chiến lược điều khiển trượt truyền thống để thiết kế bộ điều khiển dựa trên mô hình một phần tư xe có thành phần bất định.

## 2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Mô hình đối tượng của nghiên cứu này là mô hình một phần tư xe, do tính đơn giản gồm 2 bậc tự do: vận tốc dọc và vận tốc góc. Hình 1 minh họa mô hình một phần tư xe.



**Hình 1.** Mô hình một phần tư xe.

Các phương trình động lực học của mô hình một phần tư xe khi phanh được thể hiện như sau:

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_b = rF_x - T_b \\ m\dot{v}_x = -F_x \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó,  $J$  là mô men quán tính của bánh xe,  $\omega_b$  là vận tốc góc của bánh xe,  $r$  là bán kính định danh của bánh xe,  $F_x$  là lực ma sát giữa lốp xe với mặt đường,  $T_b$  là mô men phanh,  $m$  là khối lượng của một phần tư xe và  $v_x$  là vận tốc của bánh xe theo trục dọc. Độ trượt bánh xe được biểu diễn như phương trình (2):

$$\lambda = \frac{v_x - \omega_b r}{v_x} \quad (2)$$

Mối quan hệ giữa độ trượt của bánh xe và hệ số ma sát lốp-đường được trình bày bởi mô hình lốp xe phát triển bởi Burckhardt:

$$\mu(\lambda) = \delta_1 (1 - e^{-\lambda \delta_2}) - \lambda \delta_3 \quad (3)$$

Trong đó,  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  là các hệ số ma sát ứng với từng điều kiện đường cụ thể.  $F_x$  được viết lại là:

$$F_x = F_z \mu(\lambda) \quad (4)$$

Với  $F_z$  là lực tương tác giữa lốp và mặt đường tại điểm tiếp xúc.

Thay phương trình (4) vào phương trình (1), thu được hệ phương trình động lực học:

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_b = rF_z\mu(\lambda) - T_b \\ m\dot{v}_x = -F_z\mu(\lambda) \end{cases} \quad (5)$$

**Giả sử:** Tổng độ không đảm bảo của mô hình và nhiễu loạn bên ngoài đều tồn tại trong bất định của mô hình, và tổng nhiễu loạn của chúng được biểu diễn là  $\Delta D$ , được thêm vào phương trình động lực học như sau:

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_b = rF_z\mu(\lambda) - T_b + \Delta D \\ m\dot{v}_x = -F_z\mu(\lambda) \end{cases} \quad (6)$$

Đặt  $x_1 = \lambda$ , phương trình (6) có thể được viết gọn lại thành:

$$\dot{x}_1 = f(x_1) + Gu + D_x \quad (7)$$

Với  $f(x_1) = -\frac{1}{v_x} \left( \frac{r^2}{J} + \left( \frac{1-x_1}{m} \right) \right) mg\mu(x_1)$ ;  $G = \frac{r}{Jv_x}$ ;  $D_x = -\frac{r}{Jv_x} \Delta D$ ; phương trình (7) sẽ là mô hình danh nghĩa thiết kế bộ điều khiển.

### 3. THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG

Dựa trên thiết kế ESO tiêu chuẩn, từ (7), đặt  $x_2 = D_x$ , do đó  $\dot{x}_2 = \dot{D}_x$ . Hệ thống ban đầu sau đó có thể được chuyển sang:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + Gu + f(x_1) \\ \dot{x}_2 = \dot{D}_x \end{cases} \quad (8)$$

ESO được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \frac{k_1}{\varepsilon} (\hat{x}_1 - x_1) + Gu + f(\hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{k_2}{\varepsilon^2} (\hat{x}_1 - x_1) \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó,  $\varepsilon$  là hằng số thời gian quan sát cho bởi công thức dưới đây:

$$\frac{1}{\varepsilon} = R = \sigma \frac{1 - e^{-\lambda_1 t}}{1 + e^{-\lambda_2 t}}, 0 < t < t_{\max} \quad (10)$$

Với  $\sigma, \lambda_1, \lambda_2$  là các hằng số dương.

**Nhận xét 1:** Hằng số thời gian của bộ quan sát  $\varepsilon$  được thiết kế để ngăn chặn hiện tượng vượt đỉnh. Hiện tượng này xảy ra khi hệ thống phản ứng quá nhanh với nhiễu hoặc tín hiệu không mong muốn, dẫn đến sự dao động lớn và không mong muốn trong đáp ứng của hệ thống. Có thể thấy từ phương trình (9) rằng các sai số ước lượng có thể được làm nhỏ tùy ý bằng cách tăng hằng số thời gian của bộ quan sát  $\varepsilon$ . Tuy nhiên, khi hằng số thời gian quan sát  $\varepsilon$  cao sẽ tăng độ nhạy với nhiễu

và sau đó làm giảm hiệu suất điều khiển của hệ thống vòng kín. Do đó, hằng số thời gian quan sát cần được chọn sao cho cân bằng giữa sai số ước lượng và khả năng chịu nhiễu trong các ứng dụng thực tiễn.

Các biến trạng thái  $x_1, x_2$  từ công thức (15) được thay thế bởi  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$  là các biến trạng thái của ESO,  $\varepsilon > 0, k_1, k_2$  là hằng số dương,  $s^2 + k_1s + k_2$  là đa thức Hurwitz.

Định nghĩa:

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2]^T \quad (11)$$

Trong đó:

$$\eta_1 = \frac{x_1 - \hat{x}_1}{\varepsilon}, \eta_2 = D_x - \hat{x}_2 \quad (12)$$

Công thức sai số của bộ quan sát là:

$$\varepsilon \dot{\eta} = A\eta + B\tilde{f} + \varepsilon CD_x \quad (13)$$

Trong đó,  $A = \begin{pmatrix} -k_1 & 1 \\ -k_2 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $C = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{f} = f(x_1) - f(\hat{x}_1)$

#### 4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển GSMC được thiết kế nhằm cải tiến luật điều khiển, sử dụng hàm mũ với hai mục tiêu: Thứ nhất là khắc phục hạn chế của SMC đảm bảo độ bền cho hệ thống trong giai đoạn tiếp cận bề mặt trượt, và thứ hai là giữ cho quỹ đạo trạng thái hệ thống tiếp tục trên bề mặt trượt.

Cụ thể hơn, mục tiêu bộ điều khiển được thiết kế để độ trượt bánh xe quan sát  $\hat{x}_1$  có thể bám theo độ trượt mong muốn  $\lambda_d$  càng sớm càng tốt. Phương trình sai số độ trượt quan sát:

$$\theta(t) = \hat{x}_1 - \lambda_d \quad (14)$$

**Nhận xét 2:** Nhược điểm của SMC là hiệu suất không được đảm bảo do trong giai đoạn tiếp cận mặt trượt, SMC phản ứng rất nhạy cảm với nhiễu loạn của hệ thống. GSMC được thiết kế với cơ chế mạnh mẽ hơn, GSMC giới thiệu một mặt trượt phi tuyến có chức năng chuyển đổi chế độ trượt, nhờ đó khắc phục hạn chế của SMC ở giai đoạn tiếp cận mặt trượt, đảm bảo rằng trạng thái ban đầu của hệ thống nằm trên đó thì hệ thống bị ràng buộc vào bề mặt trượt.

**Bước 1:** Mặt trượt GSMC được xác định:

$$\hat{S}(\theta, t) = K\theta(t) - F(t) \quad (15)$$

Trong đó,  $F(t)$  được thiết kế với vai trò là phần bù cho khâu tiếp cận mặt trượt, mặt trượt (15) trở thành:

$$\hat{S}(\theta, t) = K\theta(t) + K\lambda_d e^{-\eta t} \quad (16)$$

**Bước 2:** Luật điều khiển trượt thiết kế để điều khiển trạng thái quỹ đạo của hệ thống trên mặt trượt có thời gian giới hạn và duy trì trên mặt trượt. Vì vậy, luật điều khiển cần thỏa mãn điều kiện đạt được mặt trượt:

$$\hat{S}(\theta, t) \dot{\hat{S}}(\theta, t) < 0 \quad (17)$$

Luật tiếp cận hàm mũ cơ bản:

$$\dot{\hat{S}}(\theta, t) = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(\hat{S}(\theta, t)) - \varepsilon_2 \hat{S}(\theta, t) \quad (18)$$

Luật tiếp cận hàm mũ cải tiến:

$$\dot{\hat{S}}(\theta, t) = -\varepsilon_1 \left( \ln \left( 1 + \left| \alpha_1 \hat{S}(\theta, t) \right| \right) \right) \left| \alpha_2 \hat{S}(\theta, t) \right| \operatorname{sgn}(\hat{S}(\theta, t)) - \varepsilon_2 \hat{S}(\theta, t) \quad (19)$$

Với  $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$ .

**Nhận xét 3:** Khi  $\hat{S}(\theta, t)$  lớn thì luật tiếp cận hàm mũ (18) thể hiện đặc trưng của luật tiếp cận hàm mũ (17) và tốc độ đạt được mặt trượt lớn hơn nhờ hệ số  $\ln \left( 1 + \left| \alpha_1 \hat{S}(\theta, t) \right| \right) \left| \alpha_2 \hat{S}(\theta, t) \right|$  cho hiệu quả bám tốt hơn nhiều so với luật tiếp cận hàm mũ (17). Khi  $\hat{S}(\theta, t)$  nhỏ thì  $\ln \left( 1 + \left| \alpha_1 \hat{S}(\theta, t) \right| \right)$  sẽ tiến gần đến 0, tốc độ đạt đến mặt trượt của luật tiếp cận hàm mũ (18) sẽ chậm hơn nhiều so với luật tiếp cận hàm mũ (21), do vậy làm giảm quán tính và đặc tính bám được tối ưu.

Từ phương trình mặt trượt (10) và luật tiếp cận hàm mũ (13), tín hiệu điều khiển được xác định bởi công thức:

$$u = G^{-1} K^{-1} \left[ -\varepsilon_1 \left( \ln \left( 1 + \left| \alpha_1 \hat{S}(\theta, t) \right| \right) \right) \left| \alpha_2 \hat{S}(\theta, t) \right| \operatorname{sgn}(\hat{S}(\theta, t)) - \varepsilon_2 \hat{S}(\theta, t) \right] + G^{-1} \left( \lambda_d \eta e^{-\eta t} - \hat{f}(\theta, t) - \hat{D}_x \right) \quad (20)$$

**Nhận xét 4:** Bộ quan sát ESO được thiết kế để đảm bảo rằng trạng thái thực của hệ thống được phản ánh chính xác bởi trạng thái quan sát theo thời gian. Khi đó, bộ điều khiển GSMC điều chỉnh trạng thái quan sát sao cho nó tiến dần về trạng thái đặt. Như vậy, trạng thái thực sẽ tiệm cận trạng thái đặt khi thời gian tiến đến vô cùng. Tín hiệu điều khiển được tạo ra bởi GSMC đảm bảo quá trình này diễn ra hiệu quả, cân bằng giữa độ chính xác và khả năng chịu nhiễu của hệ thống.

## 5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

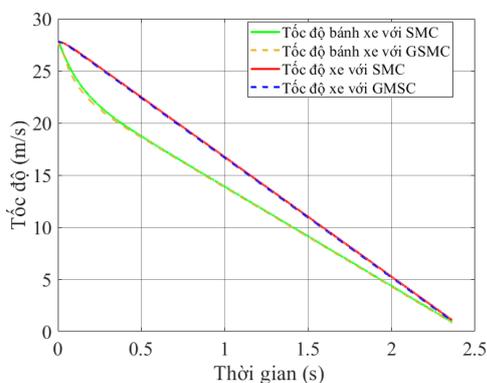
Bộ điều khiển được thiết kế được mô phỏng bằng MATLAB/Simulink. Nghiên cứu thử nghiệm bộ điều khiển được thiết kế trên đường nhựa bằng phẳng, khô ráo bằng cách sử dụng hàm bước nhảy như là độ trượt bánh xe mong muốn. Các thông số của mô hình một phần tư xe là  $m = 354$  kg,  $J = 0.9$  kgm,  $r = 0.310$  m và  $F_z = 3540$  N. Thông số mặt đường trong điều kiện đường nhựa bằng phẳng khô ráo:  $\delta_1 = 1.28$ ;  $\delta_2 = 23.99$ ;  $\delta_3 = 0.52$ . Vận tốc ban đầu của bánh xe là  $v = 27,78$  m/s và mô phỏng kết thúc khi tốc độ giảm xuống còn 1 m/s. Giả sử tổng thành phần bất định là mô men xoắn được biểu diễn dưới dạng hàm sin, được thêm vào các phương trình động lực học ở tần số 25 rad/s và biên độ là 100 Nm.

Các tham số của ESO được thiết kế được chọn như sau để đạt được độ chính xác trong việc ước lượng nhiễu quá trình:  $\sigma = 5000$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 = 3$ ,  $k_1 = 6$ ,  $k_2 = 11$ . Các thông số GSMC được thiết kế được chọn là:  $K = 1$ ,  $\eta = 26$ ,  $\varepsilon_1 = 0.7$ ,  $\varepsilon_2 = 6$ ,  $\alpha_1 = 100$ ,  $\alpha_2 = 1$ . Để đạt được khả năng bám độ trượt bánh xe chính xác, các thông số của SMC được chọn:  $c = 200$  và  $K_o = 100$ .

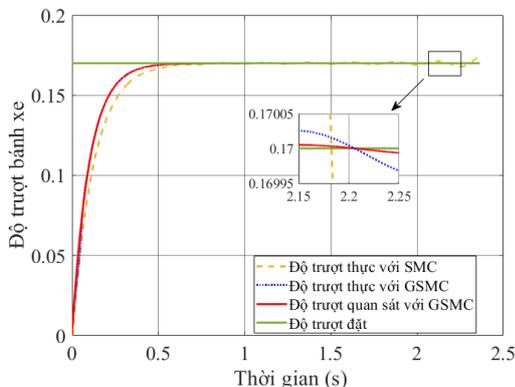
Giá trị độ trượt đặt mong muốn là 0.17 và độ trượt thực tế của các bộ điều khiển được thể hiện trong hình 3. Kết quả chỉ ra rằng, cả hai bộ điều khiển đều có khả năng giảm tác động của nhiễu quá trình và giúp tốc độ của xe ổn định hơn, đồng thời giảm tốc độ bánh xe một cách hiệu quả. Đặc biệt, khi so sánh giữa độ trượt bánh xe mong muốn và độ trượt bánh xe thực tế trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển GSMC có và không có ESO, giá trị khi sử dụng bộ điều khiển SMC được thể hiện trên hình 3.

Từ kết quả này có thể thấy rằng, giá trị thực tế khi sử dụng bộ điều khiển GSMC có ESO là gần

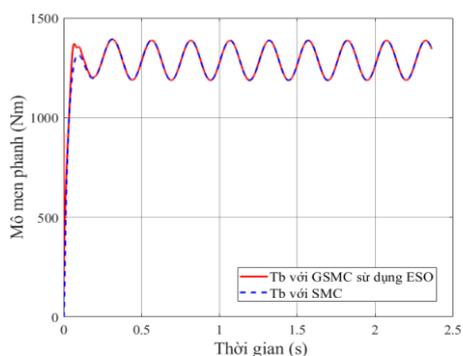
nhất và ổn định nhất so với độ trượt bánh xe mong muốn, tiếp theo là GSMC không có ESO. Trong khi đó, giá trị thực tế của SMC là kém ổn định nhất và rất dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu trong suốt quá trình phanh. Hình 4 thể hiện giá trị mô men phanh được tạo ra trong cả hai bộ điều khiển. Cuối cùng, hình 5 minh họa khả năng ước tính nhiễu bất định của toàn bộ hệ thống của ESO.



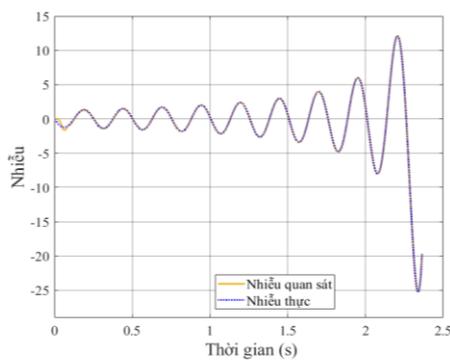
**Hình 2.** Tốc độ xe và tốc độ bánh xe.



**Hình 3.** Độ trượt bánh xe.



**Hình 4.** Mô-men phanh.



**Hình 5.** Đáp ứng quan sát nhiễu bất định.

Kết quả cho thấy ESO có khả năng ước tính và đối phó với sự bất định của hệ thống một cách chính xác và hiệu quả. Điều này càng làm nổi bật vai trò quan trọng của ESO trong việc cải thiện độ ổn định và hiệu suất của hệ thống điều khiển. Ngoài các kết quả đã trình bày, quãng đường phanh trong quá trình từ vận tốc 100 km/h (27.78 m/s) xuống 1 m/s. Kết quả cho thấy quãng đường phanh đạt được là 34.4 m với thời gian khoảng 2.3 giây trong điều kiện đường khô ráo, bằng phẳng.

## 6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một sự so sánh chi tiết giữa hai chiến lược điều khiển chế độ trượt khác nhau: chiến lược điều khiển trượt truyền thống và chiến lược điều khiển chế độ trượt toàn cục. Hiệu quả của các bộ điều khiển đề xuất đã được kiểm chứng thông qua các kết quả mô phỏng, trong đó, bộ quan sát trạng thái mở rộng đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và ước lượng chính xác các yếu tố không đảm bảo của mô hình thông qua việc sử dụng các tham số thiết kế cụ thể. Điều này giúp cải thiện độ tin cậy và hiệu suất của hệ thống điều khiển, đảm bảo rằng nó có thể phản ứng nhanh chóng và hiệu quả với các thay đổi trong điều kiện hoạt động.

## 7. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Harifi, A. Aghagolzadeh, G. Alizadeh và M. Sadeghi, "Designing a sliding mode controller for slip control of antilock brake systems," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tập 16, số 6, tr. 731-741, (2008).

- [2]. C. Geng, L. Mostefai, M. Denai và Y. Hori, “Direct Yaw-Moment Control of an In-Wheel-Motored Electric Vehicle Based on Body Slip Angle Fuzzy Observer,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, tập 56, số 5, tr. 1411-1419, (2009).
- [3]. M. Segata và R. L. Cigno, “Automatic emergency braking: Realistic Analysis of Car Dynamics and Network Performance,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, tập 62, số 9, tr. 4150-4161, (2013).
- [4]. J. Zhang và J. Li, “Adaptive backstepping sliding mode control for wheel slip tracking of vehicle with uncertainty observer,” Measurement and Control, tập 51, số 9-10, tr. 396-405, (2018).
- [5]. A. Challa, K. Ramakrishnan, P. V. Gaurkar, S. C. Subramanian, G. Vivekanandan và S. Sivaram, “A 3-phase combined wheel slip and acceleration threshold algorithm for anti-lock braking in heavy commercial road vehicles,” Vehicle System Dynamic, tập 60, số 7, tr. 2312-2333, (2022).
- [6]. I. A.-H. a. W. Pasillas-Lépine, “Jumps and synchronization in anti-lock brake algorithms,” trong AVEC 2008, N--A, (2008).
- [7]. A. R. a. J. L. S. Solyom, “Synthesis of a model-based tire slip controller,” Vehicle System Dynamic, tập 41, số 6, tr. 475-499, (2004).
- [8]. M. Amodeo, A. Ferrara, R. Terzaghi và C. Vecchio, “Wheel slip control via second order sliding-mode generation,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, tập 11, số 1, tr. 122-131, (2009).
- [9]. M. Mirzaei và H. Mirzaeinejad, “Optimal design of a non-linear controller for anti-lock braking system,” Transportation research part C: emerging technologies, tập 24, tr. 19-35, (2012).
- [10]. T. A. Johansen, I. Petersen, J. Kalkkuhl và J. Ludemann, “Gain-scheduled wheel slip control in automotive brake systems,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, tập 11, số 6, tr. 799-811, (2003).
- [11]. J. Tan, Y. Fan, P. Yan, C. Wang và H. Feng, “Sliding mode fault tolerant control for unmanned aerial vehicle with sensor and actuator faults,” Sensors, tập 19, số 3, tr. 1-15, (2019).
- [12]. M.-J. Zhang và Z.-Z. Chu, “Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot,” Ocean Engineering, tập 45, tr. 56-62, (2012).

### ABSTRACT

#### Global sliding mode control integrated with extended state observer for wheel slip tracking

*The Anti-lock Braking System (ABS) is crucial for vehicle safety by maintaining wheel traction during braking and preventing wheel lock-up. This study proposes an advanced Global Sliding Mode Control (GSMC) strategy to enhance ABS performance. The nonlinear global sliding mode of the surface is designed based on the exponential approach law. The method can eliminate the reaching phase compared with Sliding Mode Control (SMC), and guarantee the system robustness during the whole control process. The Extended state observer (ESO) is used in combination with the design of the GSMC in order to estimate the total uncertainty in the system. Simulation results demonstrate that the proposed global sliding mode control scheme enables the wheel slip-ratio to converge to optimal value quickly with the small oscillation, and has a relatively short braking distance and braking time, which is very suitable to prevent the wheel from being locked during braking.*

**Keywords:** Anti Block System (ABS); Global Sliding Mode Control (GSMC); Extended State Observer (ESO); Sliding Mode Control (SMC).