

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BỀN VỮNG CHO HỆ THỐNG PHANH ABS THÍCH ỨNG VỚI SỰ THAY ĐỔI KHỐI LƯỢNG XE

DESIGNING A ROBUST SLIDING MODE CONTROLLER FOR ABS SUBJECT TO VEHICLE MASS VARIATIONS

ThS. Nguyễn Đức Trung*, ThS. Tạ Thị Thanh Huyền, Bùi Minh Nghĩa, Trần Văn Khang,
PGS, TS. Trần Văn Như

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: trungnd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS) là thiết yếu cho an toàn phương tiện, nhưng hiệu suất bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi khối lượng xe. Bài báo này đề xuất giải pháp sử dụng bộ điều khiển trượt (SMC) bền vững, được thiết kế đặc biệt để giải quyết vấn đề này. Luật điều khiển xây dựng cho mô hình ABS 1/4 xe, sử dụng thông tin về khoảng giới hạn khối lượng từ $m_{\min}$ đến $m_{\max}$ để đảm bảo tính ổn định và hiệu suất duy trì độ trượt thực tế theo độ trượt mong muốn ($\lambda_d \approx 0.2$) bất chấp tải trọng thay đổi. Mô phỏng trong MATLAB/Simulink kiểm chứng hiệu quả của phương pháp. Kết quả cho thấy bộ điều khiển duy trì độ trượt mong muốn với sai số RMSE thấp (từ 0.008 đến 0.052) và thời gian đáp ứng chấp nhận được (từ 0.6s đến 2.6s) khi khối lượng xe thay đổi từ 190kg đến 230kg. Nghiên cứu khẳng định bộ điều khiển SMC bền vững đề xuất thể hiện tính hiệu quả và bền vững cao đối với bất định khối lượng, mang lại tiềm năng cải thiện an toàn phanh cho xe có tải trọng biến động.

Từ khóa: Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS); Điều khiển trượt (SMC); Điều khiển bền vững; Điều khiển độ trượt bánh xe.

ABSTRACT

The Anti-lock Braking System (ABS) is essential for vehicle safety, but its performance is affected by vehicle mass variations. This paper proposes a solution using a robust sliding mode controller (SMC), specifically designed to address this issue. The control law, developed for a quarter-car ABS model, utilizes information about the mass limit range from $m_{\min}$ to $m_{\max}$ to ensure stability and tracking performance for the desired slip ($\lambda_d \approx 0.2$) despite varying loads. Simulations in MATLAB/Simulink verify the method's effectiveness. Results show the controller maintains the desired slip with low Root Mean Square Error (RMSE) (from 0.008 to 0.052) and acceptable response times (from 0.6s to 2.6s) as the vehicle mass varies from 190 kg to 230 kg. The study confirms the proposed robust SMC demonstrates high effectiveness and robustness against mass uncertainty, offering potential to improve braking safety for vehicles with variable loads.

Keywords: Anti-lock Braking System (ABS); Sliding Mode Control (SMC); Robust Control; Wheel Slip Control.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống chống bó cứng phanh (ABS) là một thành phần an toàn chủ động không thể thiếu trong ô tô hiện đại. Nhiệm vụ cốt lõi của ABS là ngăn chặn hiện tượng bánh xe bị khóa cứng hoàn toàn trong quá trình phanh gấp, giúp người lái duy trì khả năng điều khiển hướng di chuyển và có thể rút ngắn quãng đường phanh, đặc biệt trên các bề mặt có độ bám thấp. Thông qua việc điều chỉnh áp suất dầu phanh đến từng bánh xe một cách nhanh chóng, ABS cố gắng giữ cho độ trượt của bánh xe nằm trong một khoảng giá trị tối ưu, nơi mà lực ma sát tiếp tuyến giữa lốp xe và mặt đường đạt giá trị cực đại.

Quá trình điều khiển hệ thống ABS đối mặt với nhiều thách thức đáng kể. Trước hết, động lực học của hệ thống vốn có tính phi tuyến cao, thể hiện rõ nhất qua mối quan hệ phức tạp giữa độ trượt và lực ma sát [1]. Thêm vào đó, hệ thống luôn chịu ảnh hưởng của các yếu tố bất định. Điều kiện mặt đường (khô, ướt, băng tuyết) có thể thay đổi đột ngột, dẫn đến sự thay đổi lớn trong hệ số ma sát [2]. Các tham số của chính chiếc xe không phải lúc nào cũng cố định hoặc được biết chính xác. Một trong những tham số bất định quan trọng nhất chính là khối lượng của xe m , giá trị này biến thiên đáng kể tùy thuộc vào số lượng hành khách và trọng lượng hàng hóa chuyên chở. Sự thay đổi khối lượng này tác động trực tiếp đến lực pháp tuyến tác dụng lên bánh xe, và do đó làm thay đổi lực ma sát tối đa mà lốp xe có thể tạo ra. Điều này làm biến đổi đặc tính động học của toàn hệ thống và có thể làm suy giảm nghiêm trọng hiệu quả của các bộ điều khiển ABS được thiết kế dựa trên giả định khối lượng không đổi.

Nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu và áp dụng cho ABS. Các bộ điều khiển kinh điển như PID hay các thuật toán dựa trên ngưỡng gia tốc và độ trượt được sử dụng

phổ biến do tính đơn giản [3]. Tuy nhiên, hiệu suất của chúng thường bị giới hạn và khó đạt tối ưu khi điều kiện vận hành thay đổi hoặc có bất định. Các phương pháp điều khiển thông minh như logic mờ (Fuzzy Logic) đã được đề xuất để đối phó tốt hơn với tính phi tuyến và bất định [3, 4]. Các kỹ thuật điều khiển dựa trên mô hình như LQR, đôi khi kết hợp với lịch trình độ lợi (gain scheduling) theo vận tốc xe, cũng cho thấy hiệu quả nhưng lại yêu cầu mô hình hệ thống tương đối chính xác và có thể nhạy cảm với sai số mô hình hóa [2, 3].

Trong bối cảnh đó, điều khiển trượt (SMC) nổi lên như một công cụ mạnh mẽ nhờ tính bền vững vốn có trước các bất định và nhiễu loạn [5]. Nguyên lý cơ bản của SMC là sử dụng một luật điều khiển chuyển mạch tần số cao để ép buộc quỹ đạo trạng thái của hệ thống hội tụ về và duy trì trên một “mặt trượt” được thiết kế trước trong không gian trạng thái. Khi đã ở trên mặt trượt, hệ thống trở nên không nhạy cảm với một lớp các bất định và nhiễu. Chính đặc tính này làm cho SMC rất phù hợp với bài toán điều khiển ABS, nơi các tham số như ma sát và khối lượng là không chắc chắn hoặc thay đổi theo thời gian [4]. Nhiều nghiên cứu đã khám phá ứng dụng SMC cho ABS, bao gồm cả SMC bền vững và SMC thích nghi để xử lý các bất định này. Ưu điểm nổi bật của SMC bền vững là khả năng đảm bảo tính ổn định và hiệu suất khi đối mặt với các bất định có giới hạn đã biết, ví dụ như khối lượng xe m nằm trong khoảng $[m_{\min}, m_{\max}]$. Tuy nhiên, SMC truyền thống có thể gây ra hiện tượng “chattering” (rung tần số cao ở tín hiệu điều khiển), đòi hỏi các kỹ thuật làm mịn hoặc sử dụng SMC bậc cao để khắc phục [5].

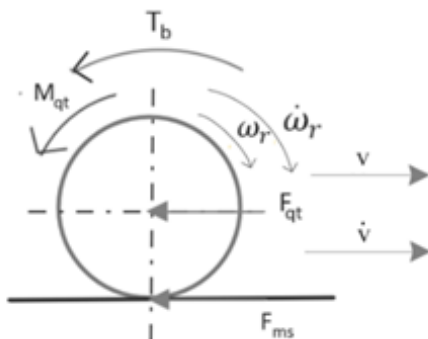
Trọng tâm của bài báo này là giải quyết vấn đề khối lượng xe thay đổi trong hệ thống ABS bằng phương pháp SMC. Đóng góp chính là đề xuất một luật điều khiển trượt bền vững được thiết kế đặc thù cho mô hình ABS 1/4 xe,

trong đó thông tin về giới hạn biên của khối lượng được tích hợp trực tiếp vào cấu trúc bộ điều khiển. Mục tiêu là đảm bảo hệ thống duy trì được tính ổn định và khả năng bám theo độ trượt mong muốn một cách hiệu quả trên toàn bộ dải khối lượng hoạt động, qua đó nâng cao tính thích ứng và độ tin cậy của ABS trong các điều kiện tải trọng thực tế.

Bài báo được cấu trúc như sau: Mục 2 trình bày chi tiết mô hình động lực học 1/4 xe, mô hình ma sát lốp với đường và mục tiêu điều khiển cần giải quyết. Mục 3 đi sâu vào việc thiết kế bộ điều khiển trượt bền vững. Mục 4 trình bày kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink và đưa ra các phân tích, thảo luận về hiệu quả của bộ điều khiển. Cuối cùng, mục 5 đưa ra kết luận và đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC PHANH

- Mô hình động lực học 1/4 xe:



Hình 1. Mô hình động lực học phanh bánh xe khi phanh

$$m\dot{v} = -F_{ms} \quad (1)$$

$$J\dot{\omega}_r = -T_b + F_{ms}r_r \quad (2)$$

Trong đó: m - Khối lượng bánh xe; v - Vận tốc tâm bánh xe; F_{ms} - Lực tương tác của lốp và đường theo phương dọc (lực phanh); T_b

- Mô men phanh tác dụng lên bánh xe; r_r - Bán kính bánh xe; ω_r - Tốc độ quay bánh xe; J - Mô men quán tính bánh xe.

- Mô hình độ trượt và ma sát:

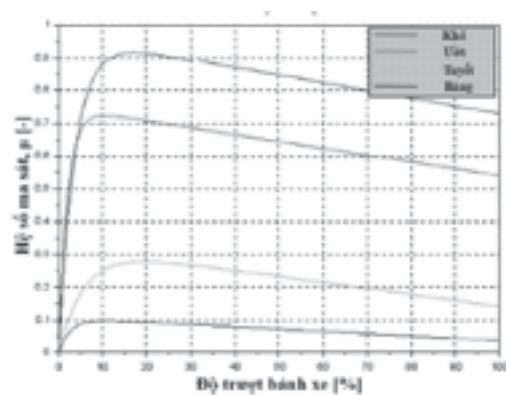
Theo [4], [3], lực tương tác của lốp với đường là hàm của độ trượt bánh xe.

$$F_{ms} = mg\mu(\lambda) \quad (3)$$

Trong đó: $\mu(\lambda)$ - Hệ số ma sát giữa bánh xe và mặt đường; λ - Độ trượt bánh xe.

Độ trượt bánh xe được xác định:

$$\lambda = \frac{v - \omega_r r_r}{v} \rightarrow \lambda = 1 - \frac{\omega_r r_r}{v} \quad (4)$$



Hình 2. Đồ thị mối quan hệ giữa hệ số ma sát - độ trượt trên các loại đường

Lực ma sát lốp với đường đạt cực đại khi độ trượt đạt giá trị từ 10-20% tùy loại đường. Do vậy, hầu hết các nghiên cứu điều khiển hệ thống ABS đều lấy giá trị độ trượt 20% là giá trị độ trượt mục tiêu λ_d . Tại độ trượt này, lực phanh đạt giá trị gần cực đại, trong khi lực bám ngang đủ lớn để đảm bảo tính điều khiển khi phanh.

Theo [6] phương trình thực nghiệm mối quan hệ giữa hệ số ma sát theo phương dọc và độ trượt:

$$\mu(\lambda) = C_1(1 - e^{C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (5)$$

Trong đó: C_1, C_2, C_3 là các hệ số được xác định theo thực nghiệm phụ thuộc tình trạng mặt đường.

Mục tiêu của bài báo là đề xuất luật điều khiển mô men phanh sao cho sai số độ trượt mong muốn và độ trượt thực tế bám và hội tụ về 0. Yêu cầu cốt lõi là bộ điều khiển phải đảm bảo tính bền vững, nghĩa là duy trì được hiệu suất bám tốt (sai số nhỏ, đáp ứng nhanh) ngay cả khi khối lượng thay đổi trong khoảng đã biết.

3. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN SMC BỀN VỮNG CHO HỆ THỐNG PHANH ABS

Gọi $e(t)$ là sai lệch độ trượt bánh xe mục tiêu λ_d và độ trượt bánh xe, ta có:

$$\begin{aligned} \lambda &= \left(-\frac{r}{v}\right) \cdot \dot{\omega} + \frac{\omega \cdot r}{v^2} \cdot \dot{v} \\ \lambda &= \left(-\frac{r}{v}\right) \cdot \frac{1}{J} [-T_b + F_{ms} \cdot r] + \frac{\omega \cdot r}{v^2} \cdot \left(\frac{F_{ms}}{m}\right) \\ \dot{\lambda} &= \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r}{v}\right) \cdot T_b - \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r^2}{v}\right) \cdot m \cdot g \cdot f(\lambda) - \left(\frac{\omega \cdot r}{v^2}\right) \cdot \frac{m \cdot g \cdot f(\lambda)}{m} \\ \dot{\lambda} &= \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r}{v}\right) \cdot T_b - \left(\frac{g \cdot r^2}{J \cdot v}\right) \cdot m \cdot f(\lambda) - \left(\frac{g \cdot \omega \cdot r}{v^2}\right) \cdot f(\lambda) \\ &\rightarrow \dot{\lambda} = \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r}{v}\right) \cdot T_b - \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{g \cdot r^2}{v}\right) \cdot m \cdot f(\lambda) - \left[\frac{1}{v} \cdot \frac{g}{v} \cdot (1 - \lambda) \cdot v\right] \cdot f(\lambda) \\ &\rightarrow \dot{\lambda} = \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r}{v}\right) \cdot T_b - \left[\left(\frac{g \cdot r^2}{J}\right) \cdot m + g \cdot (1 - \lambda)\right] \cdot \frac{1}{v} \cdot f(\lambda) \end{aligned}$$

Đặt:

$$g(\lambda) = \left[\left(\frac{g \cdot r^2}{J}\right) \cdot m + g \cdot (1 - \lambda)\right] \cdot \left(\frac{1}{v}\right) \cdot f(\lambda) \quad (6)$$

$$\rightarrow \dot{\lambda} = \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{r}{v}\right) \cdot T_b - g(\lambda)$$

Với $g(\lambda)$ là hàm của khối lượng m trong khoảng $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$.

Chọn hàm Lyapunov:

$$v = \frac{1}{2}s^2, s = \alpha_1 \cdot e + \alpha_2 \int e dt \quad (7)$$

Với α_1, α_2 là các hệ số dương tùy ý.

Điều kiện ổn định theo Lyapunov:

$$\dot{v} = s \cdot \dot{s} \leq 0 \rightarrow e \rightarrow 0$$

$$\dot{v} = s \cdot \dot{s} \leq \alpha_1 \cdot s^2 \leq 0 \rightarrow e(t) \rightarrow 0$$

Từ đó, luật điều khiển được xác định theo biểu thức:

$$\begin{cases} T_b = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{v}\right)}\right) [k_1 \cdot e + s + g_{\max}(\lambda) + k_2] & \text{với } s > 0 \\ T_b = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{v}\right)}\right) [k_1 \cdot e + s + g_{\min}(\lambda) - k_2] & \text{với } s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Với k_1, k_2 là các hệ số dương tùy ý.

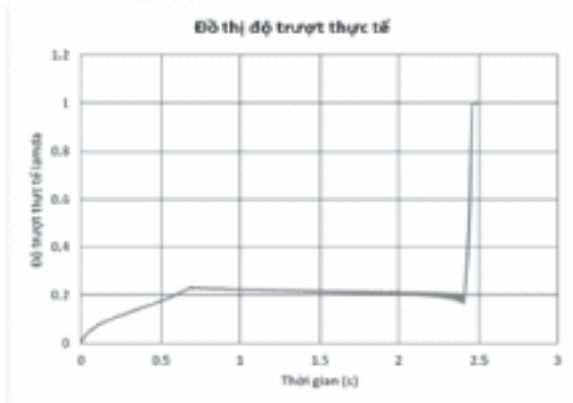
Bảng 1. Các tham số mô phỏng và bộ điều khiển

Tham số	Giá trị
Mô men quán tính bánh xe J_r	5 kg.m ²
Bán kính bánh xe r_r	0,28 m
Hệ số ma sát C_1	1,2801
Hệ số ma sát C_2	23,99
Hệ số ma sát C_3	0,52
Khối lượng [$m_{\min}$ $m_{\max}$]	[190÷230]kg
Độ lợi điều khiển k_1	1,33
Độ lợi điều khiển k_2	1
Độ trượt mục tiêu λ_d	0,2
Vận tốc ban đầu v_0	28 m/s

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

- Thiết lập mô phỏng: Mô phỏng được tiến hành trong môi trường MATLAB/Simulink sử dụng các phương trình mô hình đã trình bày và các tham số liệt kê trong Bảng 1. Quá trình phanh được mô phỏng từ một vận tốc ban đầu cho đến khi xe gần dừng. Để đánh giá tính bền vững, các mô phỏng riêng biệt được thực hiện tại các giá trị khối lượng m cố định khác nhau trong khoảng [190kg, 230kg].

- Phân tích hiệu suất tại khối lượng danh định ($m = 195\text{kg}$):



Hình 3. Đáp ứng độ trượt bánh xe thực tế theo thời gian (s) cho $m = 195\text{kg}$.

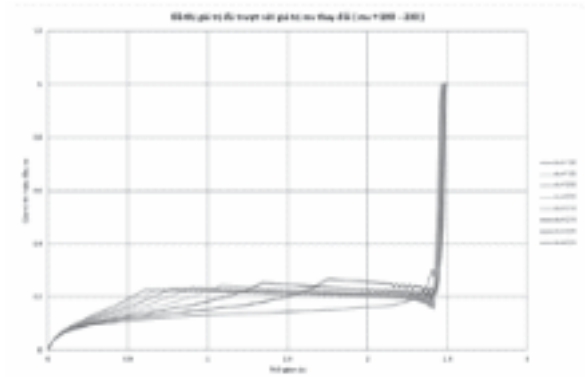


Hình 4. Vận tốc (Xe/Ngoại vi bánh xe) theo thời gian (s) với $m = 195\text{kg}$.

Với khối lượng danh định $m = 195\text{ kg}$ (Hình 3), bộ điều khiển thể hiện khả năng bám tốt. Sau giai đoạn quá độ ban đầu (từ 0 đến khoảng 0.7s), độ trượt λ nhanh chóng hội tụ và dao động quanh giá trị mục tiêu bằng 0.2. Các dao động nhỏ quan sát được có thể là do bản chất chuyển mạch của SMC (chattering) hoặc do động lực học nội tại của hệ thống. Khi xe gần dừng (khoảng $t = 2.4\text{s}$, $v \approx 0$), độ trượt tăng vọt lên 1 (bó cứng), đây là hiện tượng vật lý bình thường và không phải lỗi của bộ điều khiển, vì định nghĩa độ trượt (3) trở nên không xác định hoặc rất nhạy khi $v \rightarrow 0$. Hình 4 cho thấy quá trình giảm tốc hiệu quả, với vận tốc xe

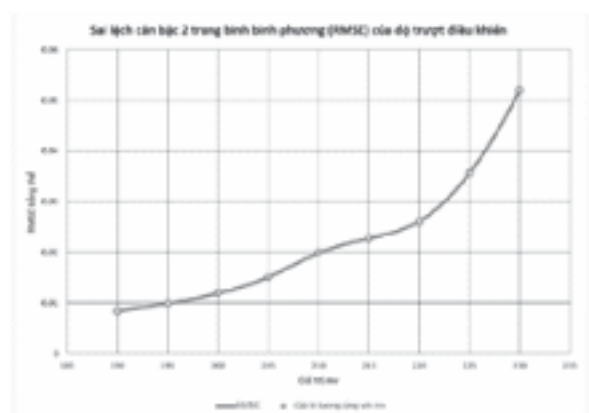
giảm gần như tuyến tính và vận tốc bánh xe dao động để duy trì độ trượt mong muốn.

- Phân tích tính bền vững khi khối lượng thay đổi ($190\text{kg} - 230\text{kg}$):



Hình 5. Các đáp ứng độ trượt xếp chồng với khối lượng thay đổi (190kg đến 230kg)

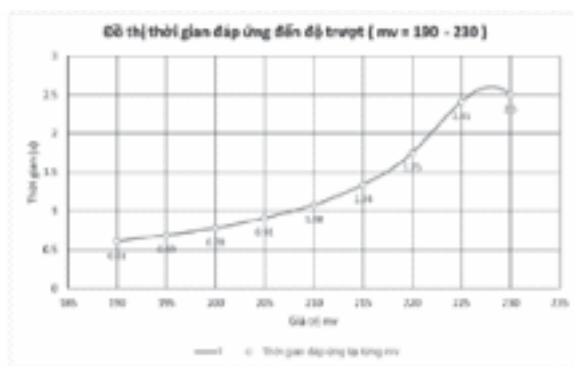
Hình 5 là minh chứng trực quan cho tính bền vững của bộ điều khiển. Mặc dù khối lượng thay đổi hơn 20%, tất cả các đường cong độ trượt đều hội tụ về vùng lân cận của 0.2 và duy trì ổn định ở đó trong suốt quá trình phanh chính. Điều này cho thấy luật điều khiển, nhờ sử dụng $m_{\min}/m_{\max}$, đã thành công trong việc bù trừ ảnh hưởng của sự thay đổi khối lượng.



Hình 6. Sai số RMSE của việc bám độ trượt theo khối lượng xe (kg)

Hình 6 định lượng hóa hiệu suất bộ điều khiển

khuyến. Sai số RMSE tăng từ ~ 0.008 tại 190kg lên ~ 0.052 tại 230kg. Sự gia tăng này là có thể hiểu được: khối lượng lớn hơn đồng nghĩa với quán tính lớn hơn, làm cho việc điều chỉnh chính xác và nhanh chóng trở nên khó khăn hơn, đòi hỏi mô men phanh lớn hơn để tạo ra cùng một sự thay đổi gia tốc góc bánh xe. Tuy nhiên, giá trị RMSE vẫn rất nhỏ trên toàn dải, khẳng định hiệu suất bộ điều khiển cao được duy trì.



Hình 7. Thời gian đáp ứng (s) để đạt độ trượt bằng 0.19 theo khối lượng xe (kg)

Hình 7 cho thấy thời gian đáp ứng (thời gian để độ trượt đạt 0.19) tăng đáng kể theo khối lượng, từ $\sim 0.6s$ lên $\sim 2.6s$. Đây là hệ quả vật lý trực tiếp của việc tăng quán tính. Xe nặng hơn cần nhiều thời gian hơn để bộ điều khiển đưa độ trượt từ 0 về giá trị mục tiêu. Mặc dù chậm hơn, bộ điều khiển vẫn đảm bảo hệ thống đạt được trạng thái mong muốn trong khoảng thời gian hợp lý.

- Tổng hợp và so sánh:

Tổng hợp kết quả, bộ điều khiển SMC bền vững đề xuất đã chứng tỏ khả năng duy trì hiệu suất điều khiển độ trượt tốt cho hệ thống ABS khi khối lượng xe thay đổi trong phạm vi xác định. Việc sử dụng m_{min} và m_{max} trong luật điều khiển là chìa khóa cho tính bền vững này.

Có một sự đánh đổi (trade-off) rõ ràng giữa hiệu suất (RMSE, thời gian đáp ứng) và khối lượng xe. Khối lượng càng lớn, sai số và thời gian đáp ứng càng tăng. Tuy nhiên, sự suy giảm hiệu suất này là có giới hạn và nằm trong mức chấp nhận được.

So sánh về mặt lý thuyết với các phương pháp khác:

- PID: Một bộ điều khiển PID được chỉnh định cho khối lượng danh định có thể hoạt động kém hoặc thậm chí mất ổn định khi khối lượng thay đổi đáng kể, trừ khi có cơ chế thích nghi hoặc gain scheduling phức tạp.

- SMC truyền thống (không xét bất định khối lượng): Có thể vẫn bền vững ở mức độ nào đó, nhưng hiệu suất không được đảm bảo trên toàn dải khối lượng và có thể bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi sự thay đổi này. Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo tính ổn định và hiệu suất một cách chặt chẽ hơn nhờ việc thiết kế tường minh cho khoảng bất định khối lượng. Hiện tượng chattering, mặc dù không quá rõ rệt trong các đồ thị này, vẫn là một đặc điểm cần lưu ý của SMC bậc một và có thể cần các biện pháp giảm thiểu trong ứng dụng thực tế [5].

Khả năng duy trì độ trượt gần tối ưu bất chấp tải trọng thay đổi giúp tối đa hóa lực phanh, góp phần nâng cao an toàn và hiệu quả phanh. Việc mở rộng mô hình sang nửa xe hoặc toàn bộ xe sẽ phức tạp hơn nhưng là cần thiết để đánh giá ảnh hưởng của chuyển tải trọng và tương tác giữa các bánh xe.

5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo đã trình bày thành công việc thiết kế và kiểm chứng qua mô phỏng một bộ điều khiển trượt bền vững cho hệ thống ABS 1/4 xe. Đóng góp chính và điểm mới là luật điều khiển được xây dựng để xử lý hiệu quả sự

bất định về khối lượng xe bằng cách sử dụng thông tin về giới hạn biên $[m_{\min}, m_{\max}]$, qua đó đảm bảo hiệu suất bám độ trượt ổn định trên một dải tải trọng rộng [190kg 230kg]. Kết quả mô phỏng đã xác nhận tính hiệu quả và bền vững của phương pháp đề xuất.

Mặc dù kết quả mô phỏng rất khả quan, một số hướng nghiên cứu và phát triển tiếp theo có thể được thực hiện:

- Giảm Chattering: Áp dụng các kỹ thuật như phương pháp lớp biên (boundary layer) hoặc SMC bậc cao (Higher-Order SMC), ví dụ như thuật toán Super-Twisting [5], để làm mịn tín hiệu điều khiển và giảm rung động cơ khí tiềm ẩn.

- SMC thích nghi: Phát triển bộ điều khiển SMC thích nghi (Adaptive SMC) có khả năng ước lượng trực tuyến khối lượng xe hoặc các tham số ma sát thay đổi, giúp cải thiện hiệu suất khi giới hạn bất định không rõ hoặc thay đổi.

- Tối ưu hóa tham số: Sử dụng các thuật toán tối ưu hóa (ví dụ: giải thuật di truyền, tối ưu hóa bầy đàn) để tìm bộ tham số bộ điều khiển (k_1, k_2) tối ưu nhằm cải thiện đồng thời RMSE, thời gian đáp ứng và giảm chattering.

- Kiểm chứng thực nghiệm: Tiến hành thử nghiệm trên các hệ thống Hardware-in-the-Loop (HIL) hoặc trên xe thực tế để đánh giá hiệu năng của bộ điều khiển trong môi trường phức tạp hơn, có nhiễu và trễ tín hiệu.

- Mô hình mở rộng: Mở rộng phương pháp thiết kế cho các mô hình xe phức tạp hơn (nửa xe, toàn bộ xe) để tính đến các yếu tố như chuyển tải trọng động, động lực học phương ngang và sự tương tác giữa các bánh xe trong quá trình phanh và đánh lái. ♦

Ngày nhận bài: 17/3/2026

Ngày phản biện: 26/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. S. Rajendran, S. K. Spurgeon, G. Tsampardoukas, and R. Hampson, "Estimation of road frictional force and wheel slip for effective Anti-lock Braking System (ABS) control". *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 28, no. 17, pp. 5081-5125, Nov. 2018, doi: 10.1002/rnc.4345.
- [2]. T. A. Johansen, I. Petersen, J. Kallkuhl, and J. Lüdemann, "Gain-Scheduled Wheel Slip Control in Automotive Brake Systems". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 798-810, Nov. 2003. doi: 10.1109/TCST.2003.818395.
- [3]. F. Pretagostini, L. Ferranti, G. Berardo, V. Ivanov, and B. Shyrokau, "Survey on Wheel Slip Control Design Strategies, Evaluation and Application to Antilock Braking Systems". *IEEE Access*, vol. 8, pp. 16839-16854, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965644.
- [4]. S. S. Landge and A. A. Godbole, "Overview of Design of Wheel Slip Control Strategies of Antilock Braking System". *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, no. 12, pp. 186-195, Dec. 2024. doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P117.
- [5]. Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica, Università degli Studi di Cagliari, "A quick introduction to sliding mode control and its applications", Cagliari, Italy.
- [6]. M. G. Unguritu and T. C. Nichitelea, "Design and Assessment of an Anti-lock Braking System Controller". *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 21-32, 2023. doi: 10.55523/rojst.2023.26.1.21.
- [7]. R. Morselli and R. Zanasi, "A self-tuning ABS control for electromechanical braking systems". In *Proc. 4th IFAC Symp. Mechatronic Syst*, Heidelberg, Germany, Sep. 2006, pp. 1-6. doi: 10.3182/20060912-3-DE-2911.00108.
- [8]. C. Unsal and P. Kachroo, "Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems". In *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Control Appl. (CCA)*, Kohala Coast, HI, USA, 1999, pp. 1048-1053 vol. 2. doi: 10.1109/CCA.1999.805566.
- [9]. M. Meléndez-Useros, M. Jiménez-Salas, F. Viadero-Monasterio, and B. López Boada, "Tire Slip H-infinity Control for Optimal Braking Depending on Road Condition". *Sensors*, vol. 23, no. 3, Art. no. 1417, Jan. 2023. doi: 10.3390/s23031417.
- [10]. I. Miller and D. Cebon, "Tyre curve estimation in slip-controlled braking". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 230, no. 1, pp. 36-50, Jan. 2016. doi: 10.1177/0954407015592830.