

NGHIÊN CỨU GIẢM RUNG KHI ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHANH ABS BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

AN INVESTIGATION INTO THE REDUTION OF THE CHATTERING
PHENOMENON IN ANTI-LOCK BRACKING SYSTEM CONTROL USING SLIDING
MODE CONTROL

ThS. Nguyễn Đức Trung*, PGS, TS. Trần Văn Như, Bùi Minh Nghĩa, Nguyễn Việt Hoàng

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: trungnd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Mục tiêu của bài báo là thiết kế bộ điều khiển hệ thống chống hãm cứng bánh xe khi phanh (Anti-lock Braking System – ABS) dựa trên thuật toán điều khiển chế độ trượt (Sliding Mode Control – SMC) để điều khiển độ trượt bánh xe xung quanh độ trượt mục tiêu. Các tham số tùy chọn trong bộ điều khiển SMC được phân tích và lựa chọn phù hợp, đồng thời khắc phục được hiện tượng rung (chattering) của bộ điều khiển SMC khi đưa giá trị mặt trượt, $s = 0$. Các luật điều khiển đề xuất xây dựng dựa vào điều kiện ổn định Lyapunov, sau đó được kiểm tra qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Với hai phương án được đưa ra, các kết quả mô phỏng cho thấy chúng đều có khả năng điều khiển ổn định độ trượt bánh xe trên các loại đường khác nhau. Trong đó, bộ điều khiển thứ hai đã loại bỏ hoàn toàn hiện tượng chattering, giúp cải thiện chất lượng điều khiển.

Từ khóa: Hệ thống chống bó cứng bánh xe khi phanh; Thuật toán điều khiển trượt; Tham số tùy chọn; Giá trị bề mặt trượt; Hiện tượng rung.

ABSTRACT

This paper aims to design an anti-lock braking system (ABS) controller that utilizes the sliding mode control (SMC) algorithm to regulate wheel slip in relation to a target slip value. The optional parameters in the SMC controller are analyzed and selected appropriately, and the chattering phenomenon is overcome when the slip surface value, $s = 0$, is set. The proposed control laws are built based on the Lyapunov stability condition and then verified through simulation using Matlab-Simulink software. With the two proposed solutions, the simulation results indicate that they are both capable of stably controlling the wheel slip on different types of roads. In particular, the second controller eliminates the chattering phenomenon, helping to improve the control quality.

Keywords: Anti-lock Brake System; Sliding Mode Control Algorithm; Optional Parameters; Slip Surface Value; Chattering Phenomenon.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

ABS là hệ thống an toàn quan trọng trên ô tô, việc nghiên cứu thuật toán điều khiển hệ thống phanh ABS đã và đang được rất nhiều nhà khoa học quan tâm. Hai yếu tố quan trọng khi xây dựng thuật toán điều khiển đó là đặc tính phi tuyến và các thông số không chắc chắn trong mô hình điều khiển hệ thống phanh ABS. Yếu tố phi tuyến đến từ mối quan hệ phi tuyến của hệ số ma sát giữa lốp xe – đường và độ trượt bánh xe. Các yếu tố không chắc chắn bao gồm điều kiện đường, phản lực từ đường tác dụng lên bánh xe, lực gió, lực bên... Các hướng nghiên cứu tập trung vào việc giải quyết hai yếu tố này. Trong nghiên cứu [1], để cải thiện chất lượng điều khiển, ngoài sử dụng cảm biến tốc độ bánh xe, tác giả sử dụng thêm cảm biến đo mô men bánh xe. Việc này, giúp bộ điều khiển có thông tin trực tiếp mô men đầu vào và đầu ra của hệ thống là gia tốc góc của bánh xe giúp hiểu biết phản ứng của hệ thống tốt hơn và đưa ra tác động xử lý hiệu quả hơn. Tuy nhiên, việc đưa vào cảm biến mô men bánh xe làm cho hệ thống phức tạp hơn. Để nâng cao chất lượng điều khiển, nhiều nghiên cứu tập trung vào cải thiện thuật toán điều khiển mà không cần thêm cảm biến, cải thiện chất lượng điều khiển với điều kiện đường khác nhau. Sử dụng hàm Lyapunov để tổng hợp bộ điều khiển thích nghi với sự thay đổi điều kiện bám khác nhau [2], sử dụng phương pháp điều khiển trượt (SMC – Sliding Mode Control) để đáp ứng được với sự thay đổi điều kiện bám mặt đường và sự không chính xác của mô hình [5]. Trong nghiên cứu [4], tác giả sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu toàn phương (LQR) để so sánh với các bộ điều khiển SMC và điều khiển PID. Để sử dụng bộ điều khiển SMC và LQR cũng đòi hỏi nhiều cảm biến hơn để đo các thông số động học của hệ thống. Trong thực tế, nhiều bộ điều khiển đơn giản cũng phát huy

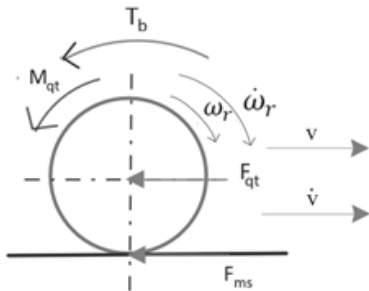
được hiệu quả điều khiển, như bộ điều khiển ON-OFF [3], bộ điều khiển PID [4]. Tuy nhiên, hiệu quả điều khiển chỉ phát huy được trong điều kiện bám nhất định. Bộ điều khiển SMC có khả năng điều khiển các hệ thống phi tuyến mạnh, có khả năng ổn định hệ thống có tham số không chắc chắn trong mô hình điều khiển. Trong các nghiên cứu, bộ điều khiển SMC cho thấy hiệu quả điều khiển tốt với sự thay đổi điều kiện bám khác nhau, sự không chính xác của mô hình. Tuy nhiên, bộ điều khiển này có nhược điểm gây ra hiện tượng rung ở tần số lớn (hiện tượng chattering) trong hệ thống.

Mục tiêu của nghiên cứu là tìm phương pháp cải thiện chất lượng điều khiển của bộ điều khiển SMC cho hệ thống ABS nhằm giảm hiện tượng rung, khi bộ điều khiển đưa vector trạng thái về mặt trượt $s = 0$. Để đạt được mục đích trên, nghiên cứu tổng hợp một bộ điều khiển theo thuật toán SMC từ phương trình động lực học quay bánh xe và phương trình động lực học tịnh tiến $\frac{1}{4}$ xe, đánh giá và lựa chọn hai tham số tùy chọn k, ε của bộ điều khiển. Bộ điều khiển tổng hợp tồn tại hiện tượng chattering, nguyên nhân cốt lõi là sự tồn tại của hàm dấu trong luật điều khiển, khiến thành phần đi cùng hàm dấu luôn thay đổi từ -1 đến 1 và ngược lại làm luật điều khiển thay đổi gián đoạn. Để khử hiện tượng trên, đề tài sử dụng phương pháp lớp biên (Boundary Layer Method) làm “mềm” sự gián đoạn của hàm dấu bằng cách thay thế nó bằng một hàm liên tục trong một vùng lân cận của mặt trượt ($s = 0$). Việc đánh giá hiệu quả giảm rung của bộ điều khiển được thực hiện thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC PHANH

Trong quá trình phanh ô tô, mô men phanh sinh ra tại cơ cấu phanh, kết hợp với lực

dọc tương tác của lốp với đường (lực phanh) sẽ làm tốc độ quay bánh xe chậm lại. Lực phanh theo hướng dọc cũng làm xe ô tô chuyển động chậm lại. Vì khối lượng quán tính của bánh xe nhỏ hơn rất nhiều so với tốc độ quán tính của xe, nên trong quá trình phanh, bánh xe là thành phần có xu hướng dừng trước, việc này sẽ làm độ trượt của bánh xe tăng lên làm giảm tính điều khiển khi phanh. Mô hình phân tích lực tác dụng lên bánh xe thể hiện trên hình 1 và động lực học phanh bánh xe được mô tả bằng phương trình vi phân (1), (2):



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

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

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

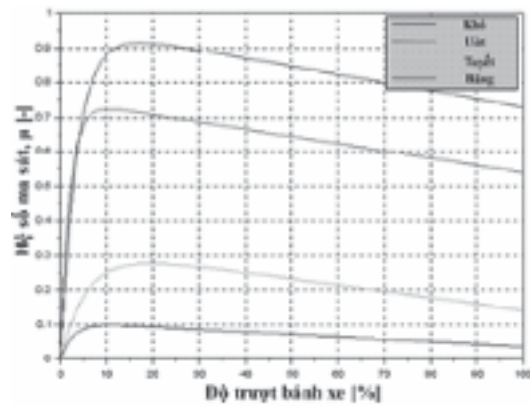
Trong đó: m - Khối lượng bánh xe; v - Vận tốc tâm bánh xe; F_{ms} - Lực tương tác của lốp và đường theo phương dọc (lực phanh); T_b - Mô men phanh tác dụng lên bánh xe; r_r - Bán kính bánh xe; ω_r - Tốc độ quay bánh xe; J - Mô men quán tính bánh xe.

Theo [3], [6], 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 [3], 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 (Bảng 1).

Bảng 1. Giá trị hệ số cho các mặt đường khác nhau (theo [3])

Mặt đường	C_1	C_2	C_3
Khô	1.2801	23.99	0.52
Ướt	0.857	33.82	0.347
Tuyết	0.1946	94.12	0.0646
Băng	0.05	306.3	0

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

Gọi T_b là mô men phanh bánh xe, là tín hiệu điều khiển, $e(t)$ là sai lệch độ trượt bánh xe mục tiêu λ_d và độ trượt bánh xe, ta có:

$$e(t) = \lambda_d - \lambda \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \dot{e}(t) &= \dot{\lambda}_d - \dot{\lambda} \\ \Leftrightarrow \dot{e}(t) &= -\dot{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

Chọn mặt trượt tích phân:

$$s(t) = e(t) + k \int e(t) dt \quad (8)$$

Trong đó: k là hằng số dương tùy chọn. Chọn hàm Lyapunov V :

$$V = \frac{1}{2} s^2$$

$$\rightarrow \dot{V} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot s \cdot \dot{s} = s \cdot \dot{s}$$

Theo điều kiện ổn định Lyapunov, với hàm $V \geq 0$, $\dot{V} \leq 0$ thì hệ ổn định.

Như vậy, điều kiện để đảm bảo $e(t) \rightarrow 0$ thì $\dot{s}(t)s(t) < 0$. Để thỏa mãn điều kiện này, chọn $\dot{s}(t) = -\varepsilon \text{sign}(s(t))$ với ε là hằng số dương.
 $\rightarrow \dot{e} = -\varepsilon \text{sign}(s) - k e$

Theo (4), (7), ta có:

$$\dot{\lambda} = -\frac{r_r \dot{\omega}_r}{v} + \frac{r_r \omega_r \dot{v}}{v^2}$$

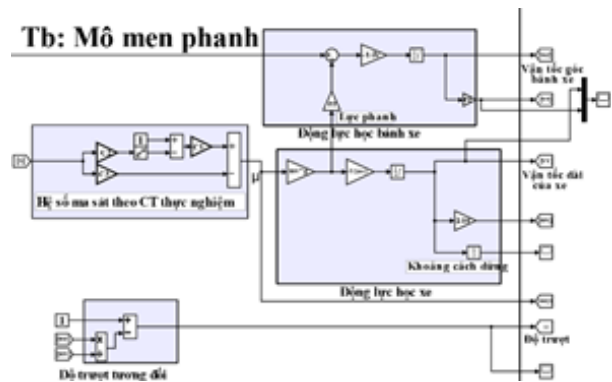
Kết hợp với (4):

$$\rightarrow \dot{\omega}_r = \frac{1}{r_r} \left(\frac{r_r \omega_r \dot{v}}{v} - \varepsilon v \text{sign}(s) - k v e \right)$$

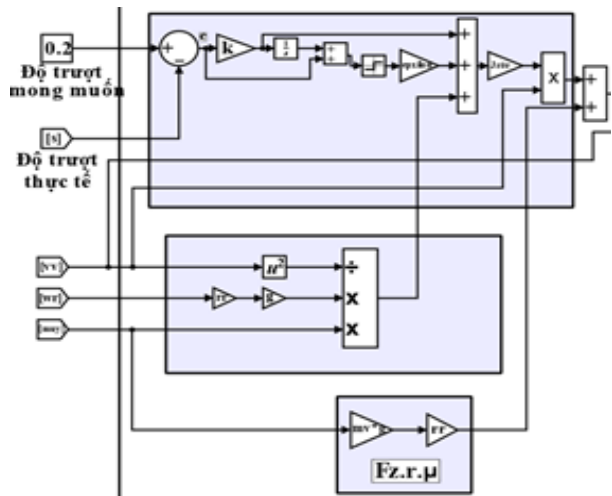
Kết hợp với (1), (2), ta được luật điều khiển SMC:

$$T_b = \frac{Jv}{r_r} \left(\frac{r_r \omega_r g \mu(\lambda)}{v^2} + \varepsilon \text{sign}(s) + k e \right) + m g \mu(\lambda) r_r \quad (9)$$

Sơ đồ mô phỏng động lực học phanh bằng phần mềm Matlab-Simulink thể hiện trên hình 3 và hình 4.



Hình 3. Mô hình Simulink - phản động lực học phanh



Hình 4. Mô hình Simulink - phản bộ điều khiển SMC

Các số liệu đầu vào cho mô hình mô phỏng tham khảo [3] gồm:

$$J = 5 \text{ kgm}^2, m = 800 \text{ kg}, v_0 = 28 \text{ m/s}, r_r = 0.28 \text{ m}.$$

4. CHỌN THAM SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC VÀ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

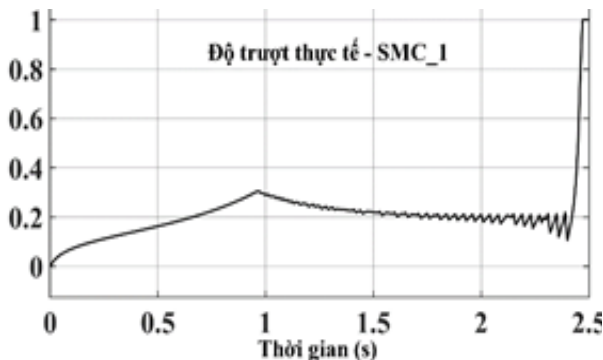
Bộ điều khiển SMC theo (9) có hai tham số k, ε là các hằng số dương tùy chọn. Hai tham

số trên ảnh hưởng lớn đến độ ổn định, độ nhạy, độ chính xác của điều khiển. Để phân tích sự ảnh hưởng của các hệ số trên tới hiệu quả của bộ điều khiển SMC, bài báo thực hiện khảo sát với các hệ số k , ε cho như trong bảng 2, để đề xuất một bộ tham số hợp lý. Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 5 đến 13.

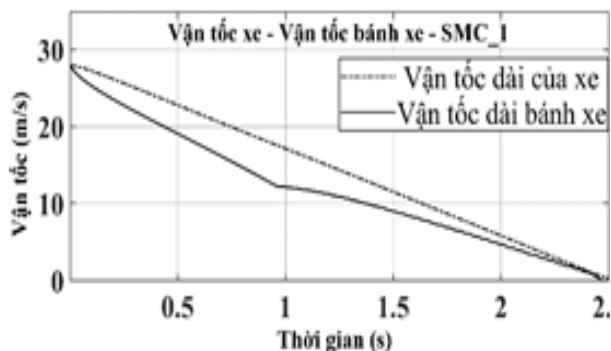
Bảng 2. Giá trị các hệ số dương k , ε trong bộ điều khiển SMC

Bộ điều khiển	k	ε
SMC_1	3	570
SMC_2	17	570
SMC_3	17	12

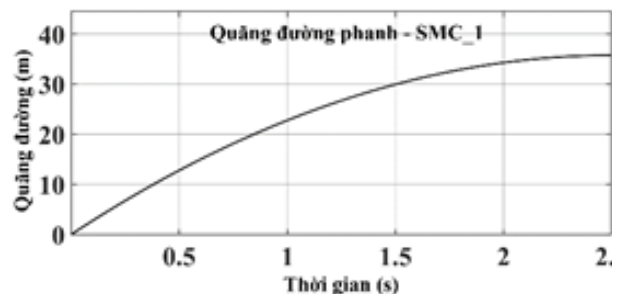
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC_1:



Hình 5. Đồ thị độ trượt tương đối - SMC_1

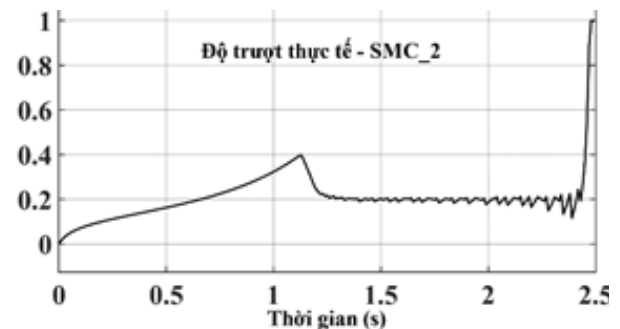


Hình 6. Đồ thị vận tốc xe - SMC_1

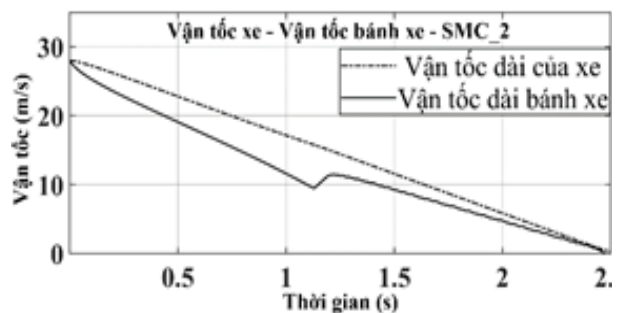


Hình 7. Đồ thị quãng đường phanh - SMC_1

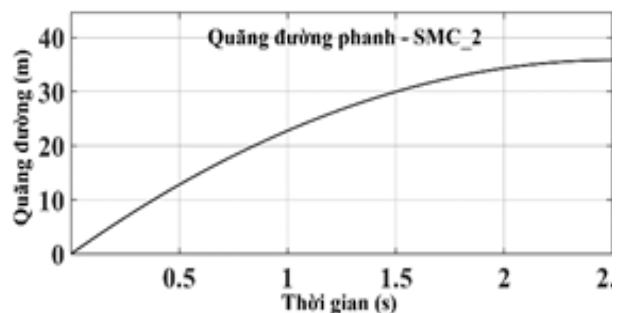
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC_2:



Hình 8. Đồ thị độ trượt tương đối - SMC_2

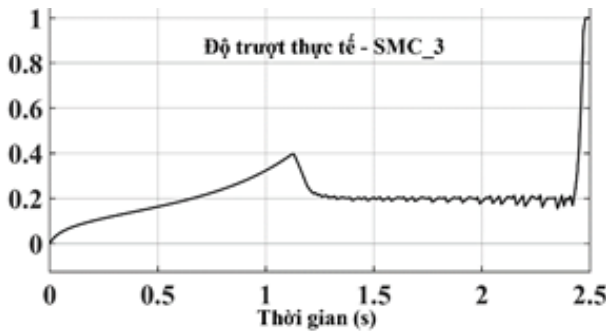


Hình 9. Đồ thị vận tốc xe - SMC_2

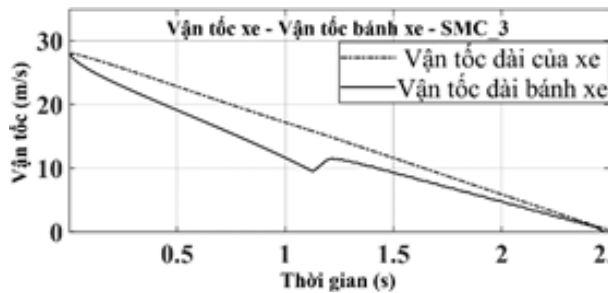


Hình 10. Đồ thị quãng đường phanh - SMC_2

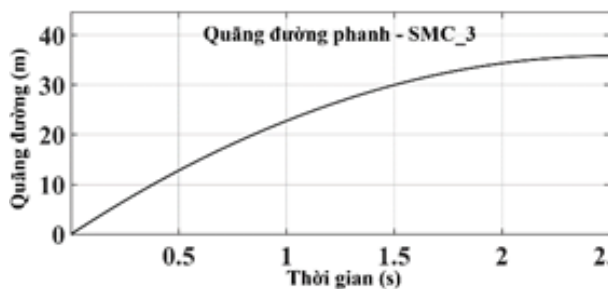
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC₃:



Hình 11. Đồ thị độ trượt thực tế - SMC₃



Hình 12. Đồ thị vận tốc xe - SMC₃



Hình 13. Đồ thị quãng đường phanh - SMC₃

- Khi mặt trượt s đến $s(t) = 0$, thì tham số k quyết định thời gian sai lệch $e(t)$ tiệm cận về 0. Theo kết quả mô phỏng thực tế, thời gian đưa $e(t) \rightarrow 0$ đối với bộ điều khiển SMC₁ khoảng trên 1.5 giây, SMC₂, SMC₃ khoảng 1.2 giây, như vậy khi k lớn, thời gian đưa $e(t)$ về 0 nhanh hơn.

- Tham số ε quyết định khả năng duy trì $s(t)$ quanh mặt trượt $s(t) = 0$, ảnh hưởng đến

tốc độ hội tụ của $e(t)$ và độ bền vững của luật điều khiển khi thông số mô hình hay điều kiện hoạt động thay đổi. Tuy nhiên, tham số ε càng lớn dẫn tới quá điều chỉnh càng lớn, làm s đi xa khỏi mặt trượt $s = 0$. Điều này dẫn tới hiện tượng rung với biên độ lớn. Theo kết quả mô phỏng, hiện tượng này thể hiện rõ ở thời điểm từ 2,3 giây trở đi (hình 5, 8, 11). Đặc biệt với bộ điều khiển SMC₁ và SMC₂ với tham số ε lớn (Hình 5, 8). Tuy nhiên, khi ε càng nhỏ, tính bền vững của bộ điều khiển càng kém, nhất là đối với động lực học phanh, có rất nhiều thông số bất định và thay đổi.

- Từ các kết quả mô phỏng thực tế, nghiên cứu lý thuyết, tác giả lựa chọn tham số bộ điều khiển SMC₃, do bộ điều khiển này đảm bảo độ nhạy, độ chính xác điều khiển, và độ rung ở mức chấp nhận được, và không tiếp tục khảo sát để lựa chọn các bộ điều khiển khác có hệ số ε nhỏ hơn nữa. Chất lượng của bộ điều khiển SMC₃ sẽ được cải thiện hơn khi áp dụng giải pháp giảm rung ở phần sau.

5. GIẢI PHÁP GIẢM RUNG CHO BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC

Nguyên nhân chính gây ra hiện tượng rung là do trong luật điều khiển chứa hàm dấu $\text{sign}(s)$. Tuy nhiên, hàm đó cũng là yếu tố để duy trì mặt trượt $s = 0$. Để giảm hiện tượng này, thay thế hàm $\text{sign}(s)$ bằng hàm $\text{sat}(s/\phi)$, luật điều khiển trượt cải tiến từ biểu thức (9) như sau:

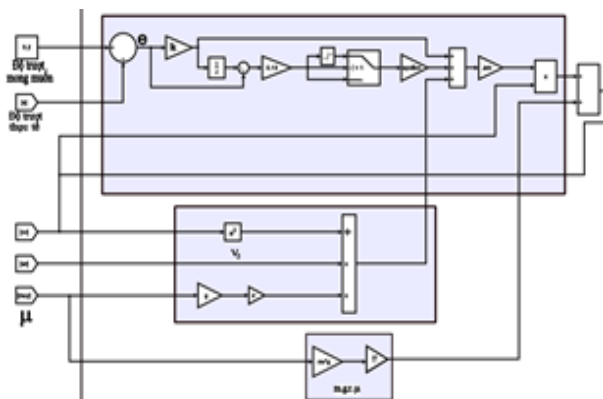
$$T_b = \frac{J_v}{r_r} \left(\frac{r_r \omega_r g \mu(\lambda)}{v^2} + \varepsilon \text{sat}(s/\phi) + k e \right) + m g \mu(\lambda) r_r \quad (10)$$

Trong đó, hàm $\text{sat}(s/\phi)$ được xác định:

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} \text{sign}(s) & \text{khi } |s/\phi| \geq 1 \\ s/\phi & \text{khi } |s/\phi| < 1 \end{cases} \quad (11)$$

Với: ϕ là hệ số dương được lựa chọn

sao cho để giảm hiện tượng rung. Khi mặt trượt đủ nhỏ $s(t) < \phi$, khi đó bộ điều khiển SMC trở thành bộ điều khiển ổn định tiệm cận. Khi đi quá xa mặt trượt $s(t) > \phi$ thì bộ điều khiển trở về bộ điều khiển SMC giúp cho $s(t) \rightarrow 0$ trong thời gian xác định đủ nhỏ.

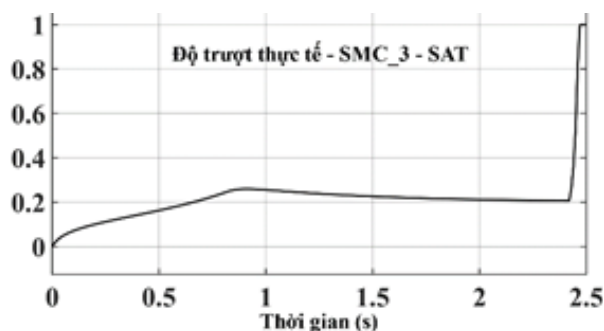


Hình 14. Mô hình Simulink điều khiển ABS bằng SMC khử chattering - phân bộ điều khiển

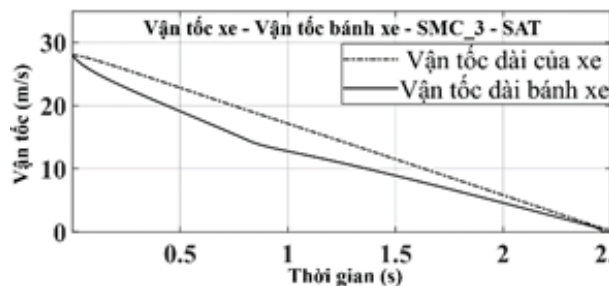
Trên hình 14 là sơ đồ phân khối điều khiển trượt giảm rung theo biểu thức (10) và (11). Các thông số bộ điều khiển thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Giá trị các hệ số dương k, ε trong bộ điều khiển SMC_{3_sat}

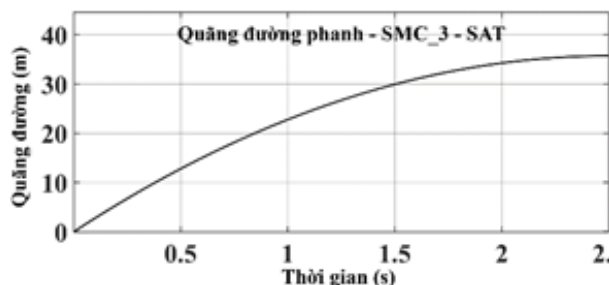
Bộ điều khiển	k	ε	ϕ
SMC _{3_sat}	17	12	7.7



Hình 15. Đồ thị độ trượt tương đối



Hình 16. Đồ thị vận tốc xe



Hình 17. Đồ thị quãng đường phanh

Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 15, 16 và 17. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả giảm rung rất rõ ràng như trên đồ thị độ trượt - hình 15 so với bộ điều khiển SMC₃. Hệ số trượt λ tiệm cận về hệ số trượt đặt λ_d trong khoảng thời gian xác định, khoảng trên 2 giây. Khi bộ điều khiển trượt đưa mặt trượt s về 0, và duy trì tại đó, độ rung của véc tơ trạng thái cải thiện rõ rệt. Tuy nhiên, thời gian này lớn hơn so với bộ điều khiển SMC₃. Hệ số ϕ được lựa chọn sao cho cân bằng giữa hai yếu tố thời gian xác lập và hiện tượng rung. Khi chọn ϕ nhỏ, thời gian xác lập nhanh nhưng vẫn xảy ra hiện tượng rung và ngược lại. Khi ϕ lớn thì thời gian xác lập lâu hơn nhưng khử được hiện tượng rung.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra hai phương pháp tổng hợp bộ điều khiển hệ thống ABS theo thuật toán SMC, và thuật toán SMC cải tiến giảm hiện tượng rung. Phân tích sự ảnh hưởng của hai tham số tùy chọn k, ε trong luật điều khiển

trượt thông qua ba bộ điều khiển trượt SMC1, SMC2, SMC3, với tham số k thay đổi từ 3 đến 17 và ε thay đổi từ 12 đến 570. Qua các kết quả mô phỏng, khi k lớn, thời gian đưa sai lệch $e(t)$ về 0 nhanh hơn, khi tham số ε càng lớn dẫn tới quá điều chỉnh càng lớn. Bộ điều khiển SMC_3 có hiệu suất tốt nhất, có khả năng điều khiển được hệ thống động lực học phanh ABS có tính phi tuyến mạnh, miễn là biết được điều kiện đường. Bộ điều khiển SMC_3 cải tiến tiếp tục cải thiện hiện tượng rung so với bộ điều khiển SMC_3. Tuy nhiên, thời gian để độ trượt λ xác lập về độ trượt mong muốn λ_d lâu hơn (trên 2 giây).

Hướng nghiên cứu tiếp theo: Kết quả của nghiên cứu chỉ dựa trên nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink, nếu có thêm thực nghiệm sẽ khẳng định nghiên cứu sâu sắc hơn. Khi xây dựng bộ điều khiển, tác giả đã phân tích và lựa chọn hai tham số tùy chọn của bộ điều khiển sao cho cân bằng từ ba loại đường mẫu. Tuy nhiên, thực tế hai tham số trên sẽ thay đổi tùy thuộc rất nhiều loại đường, để cải thiện có thể sử dụng kết hợp một bộ điều khiển mờ để chỉnh hai tham số, hoặc sử dụng phương pháp học máy tăng cường để xác định hai tham số theo các thông số trạng thái hệ thống. Hai cải thiện này sẽ nâng cao chất lượng điều khiển của thuật toán trên. ❖

Ngày nhận bài: 25/8/2025

Ngày phản biện: 03/9/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Steur, E. (2004), “Study on improvement of ABS performance using additional sensor information”. Technische Universiteit Eindhoven, DCT rapporten; Vol. 2004.077.
- [2]. Stefano Di Gennaro and María Eugenia Sánchez-Morales (2016), “An adaptive controller applied to an anti-lock braking system laboratory”. 2016 Universidad Nacional de Colombia, Vol. 83, no. 199, pp. 69-77.
- [3]. Maria-Geanina Unguritu and Teodor-Constantin Nichit, Elea (2023), “Design and Assessment of an Anti-lock Braking System Controller”. Romanian Journal of Information Science And Technology, Volume 26, 21-32, Number 1, 2023.
- [4]. Francesco Pretagostini, Laura Ferranti, Giovanni Berardo, Valentin Ivanov, Barys Shyrokau (2020), “Survey on Wheel Slip Control Design Strategies, Evaluation and Application to Antilock Braking Systems”. IEEE Access 2020.2965644.
- [5]. Cem Unsal, Pushkin Kachroo (1999), “Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking Systems”. Electrical and Computer Engineering Faculty Publications.
- [6]. Tor A. Johansen, Idar Petersen, Jens Kalkkuhl, and Jens Lüdemann (2003), “Gain-Scheduled Wheel Slip Control in Automotive Brake Systems”. IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol.11, No.6.