

## **Điều khiển trượt cho ổ từ dọc trục cấu trúc nguyên khối một bậc tự do**

Lê Ngọc Hội<sup>1,2</sup>, Nguyễn Quang Địch<sup>1</sup>, Lê Đức Thịnh<sup>1</sup>, Nguyễn Tùng Lâm<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội;

<sup>2</sup>Trường Đại học Công Nghiệp TP Hồ Chí Minh.

\*Email: lam.nguyentung@hust.edu.vn

Nhận bài: 30/8/2022; Hoàn thiện: 18/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.81-89>

### **TÓM TẮT**

*Bài báo này đề xuất phương pháp điều khiển trượt cho ổ từ dọc trục cấu trúc nguyên khối một bậc tự do. Mục đích của bài toán là điều khiển đĩa quay (rotor) đạt được vị trí mong muốn. Đầu tiên, mô hình động học của ổ từ cấu trúc nguyên khối một bậc tự do được xây dựng. Tuy nhiên, rất khó để thiết kế một bộ điều khiển dựa trên mô hình có thành phần nhiễu phi tuyến bất định như: Tổn hao dòng xoáy trong cơ cấu chấp hành, nhiễu tải bên ngoài và các tham số thay đổi trong mô hình. Để giải quyết vấn đề này, phương pháp điều khiển trượt được nghiên cứu đóng vai trò kháng nhiễu phi tuyến, tăng độ bền vững cho bộ điều khiển. Để kiểm chứng khả năng làm việc của ổ từ cấu tạo nguyên khối, một cấu trúc mô phỏng được thực hiện trên phần mềm MatlabSimulink. Kết quả cho thấy ổ từ làm việc ổn định bám theo giá trị đặt mong muốn và phương pháp điều khiển trượt áp dụng cho trường hợp hàm Sigmoid được đề xuất trong bài báo này đã cải thiện được nhược điểm của hàm Sign và Sat-Pi.*

**Từ khóa:** Sliding mode control; Non-laminated structure; Electromagnetic bearing; Disturbances; Fractional order derivative.

### **1. MỞ ĐẦU**

Mạch từ (stator và rotor) của ổ đỡ từ thường được ghép bằng các lá thép kỹ thuật để giảm tổn hao dòng xoáy khi có từ thông biến thiên trong vật liệu sắt từ. Tuy nhiên, đối với ổ từ dọc trục trong một số ứng dụng các cơ cấu chấp hành thường cấu tạo nguyên khối. Đặc biệt, do yêu cầu về độ bền cơ học và chi phí nên đĩa quay của ổ từ dọc trục thường được cấu tạo nguyên khối. Trong các ứng dụng của ổ đỡ từ cấu tạo nguyên khối hoạt động khi cấp dòng điện một chiều (DC) thay đổi theo thời gian vào hai đầu cuộn dây, dòng xoáy sẽ ảnh hưởng sâu sắc đến hoạt động của cơ cấu chấp hành và phải được xem xét trong mô hình hóa hệ thống và thiết kế bộ điều khiển.

Mặc dù phương pháp điều khiển trượt đã áp dụng cho ổ từ thông thường khi stator và rotor được cấu tạo bởi các lá thép kỹ thuật mỏng ghép lại khá nhiều. Nhưng đối với ổ từ cấu tạo nguyên khối [1-6], trong đó, động lực học có chứa thành phần dòng xoáy, thành phần đạo hàm cấp phân số rất ít công trình nghiên cứu về điều khiển phi tuyến nói chung và điều khiển trượt nói riêng được công bố. Các tác giả chỉ áp dụng phương pháp điều khiển kinh điển trên miền tần số như PID, FOPID [12], FBL [1] (bộ điều khiển bù phi tuyến), FBL-PID [1]. Đặc biệt vấn đề điều khiển cho những đối tượng mà động lực học có chứa đạo hàm cấp phân số là một vấn đề mới, chỉ phát triển trong vòng 1 thập kỷ vừa qua. Do đó việc nghiên cứu phương pháp điều khiển trượt cho ổ từ cấu tạo nguyên khối để hoàn thiện và nâng cao chất lượng điều khiển cho ổ từ cấu tạo nguyên khối là vấn đề mới và cần thiết.

Những đóng góp mới của bài báo có thể được tóm tắt như sau:

(i) Trong khi đối với các tài liệu [1-6] chỉ đưa ra được lực từ và hàm truyền của ổ từ cấu trúc nguyên khối trên miền tần số. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã xây dựng thành công mô hình toán học trên miền thời gian của ổ từ cấu trúc nguyên khối và đưa ra được tổng nhiễu phi tuyến bao gồm: Nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay, nhiễu do tham số bất định của mô hình, nhiễu do tổn hao dòng xoáy trong cơ cấu chấp hành ổ đỡ từ.

(ii) Trong khi các tác giả trước đây chỉ áp dụng SMC cho ổ từ cấu trúc xếp lớp. Trong bài báo

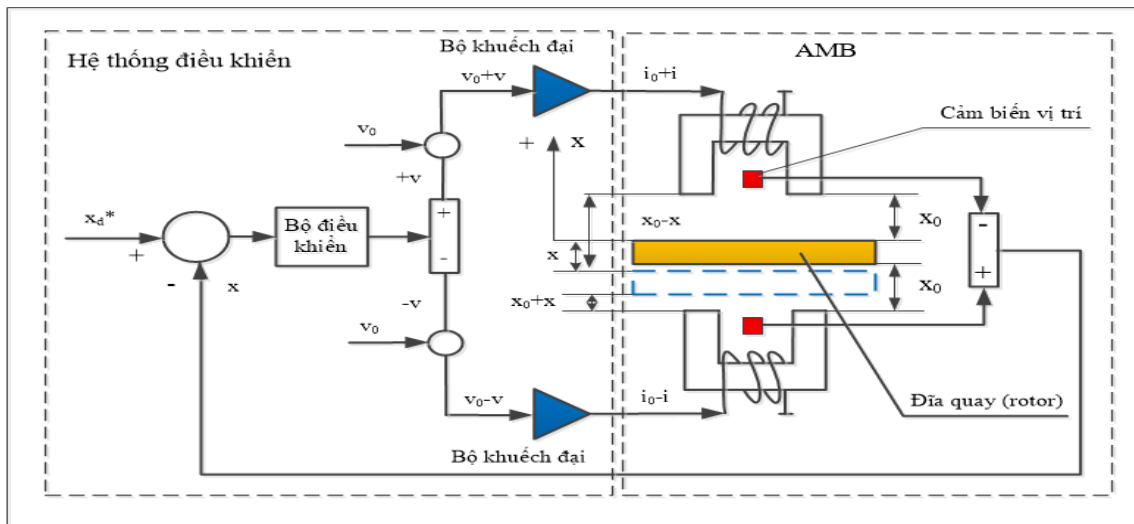
này đã áp dụng thành công điều khiển SMC cho ổ từ có cấu trúc nguyên khối. Với chức năng chính của bộ điều khiển trượt (SMC) đóng vai trò kháng nhiễu phi tuyến nên SMC rất thích hợp cho ổ từ cấu trúc nguyên khối có tổng nhiễu phi tuyến như: Nhiễu tải tác động bên ngoài, tham số bất định trong mô hình và tổn hao dòng xoáy gây ra trong cơ cấu chấp hành của ổ từ cấu trúc nguyên khối, điều khiển đĩa quay đạt giá trị đặt mong muốn.

(iii) Trong nghiên cứu này đã áp dụng SMC cho trường hợp hàm Sigmoid thay thế cho hàm Sign và Sat-Pi thông thường để khắc phục được các nhược điểm của hàm Sign và Sat-Pi, cụ thể: Giảm hiện tượng chattering, thời gian ổn định nhỏ.

Bài báo này được tổ chức như sau: Phần 2 mô tả ngắn gọn mô hình toán học trên miền thời gian của ổ từ một bậc tự do cấu trúc nguyên khối. Trong phần 3. Quy trình áp dụng phương pháp điều khiển trượt vào đối tượng nghiên cứu được mô tả chi tiết. Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển ổ từ một bậc tự do cấu tạo nguyên khối trong trường hợp có tham số bất định được cung cấp để chứng minh chất lượng phương pháp điều khiển trượt được đề xuất trong phần 4. Kết luận được rút ra trong phần 5.

## 2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Cấu trúc hệ thống điều khiển của ổ từ cấu trúc nguyên khối được thể hiện như hình 1 gồm: một đĩa quay có cấu trúc nguyên khối được treo tự do tại một khoảng cách mong muốn  $x_0$  bởi 2 nam châm điện từ hình C có cấu trúc nguyên khối.



**Hình 1.** Cấu trúc hệ thống điều khiển 1 cặp cực từ hình C cấu tạo nguyên khối.

Theo [1-6] lực điện từ trên miền tần số của cực từ phía trên cấu trúc nguyên khối là:

$$F_1(s) = K_i \cdot \frac{R^0}{R^0 + k\sqrt{s}} \cdot I(s) + K_x \cdot \frac{R^0}{R^0 + k\sqrt{s}} \cdot X(s) \quad (1)$$

Biến đổi tương đương (1) trở thành (2):

$$F_1(s) + \frac{k\sqrt{s}}{R^0} F_1(s) = K_i \cdot I(s) + K_x \cdot X(s) \quad (2)$$

Biến đổi Laplace ngược (2) ta được (3):

$$F_1(t) + \frac{k}{R^0} \frac{d^{1/2} F_1(t)}{dt^{1/2}} = K_i \cdot i + K_x \cdot x \quad (3)$$

Tương tự đối với cực từ phía dưới ta có lực điện từ trên miền tần số:

$$F_2(s) = -K_i \cdot \frac{R^0}{R^0 + k\sqrt{s}} \cdot I(s) - K_x \cdot \frac{R^0}{R^0 + k\sqrt{s}} \cdot X(s) \quad (4)$$

Tương tự như trên ta có phương trình lực từ trên miền thời gian đối với cực từ phía dưới:

$$F_2(t) + \frac{k}{R^0} \frac{d^{1/2} F_2(t)}{dt^{1/2}} = -K_i \cdot i - K_x \cdot x \quad (5)$$

Theo định luật Newton II ta có phương trình động lực mô tả cực từ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -C \cdot \dot{x} + F_1(t) - F_2(t) - mg + f_x \quad (6)$$

Từ (3), (5) và (6) suy ra phương trình (7):

$$m\ddot{x} = 2K_i \cdot i + 2K_x \cdot x - C \cdot \dot{x} - \frac{Ck}{R^0} \frac{d^{3/2} x}{dt^{3/2}} - \frac{km}{R^0} \frac{d^{5/2} x}{dt^{5/2}} - mg + \frac{k}{R^0} \frac{d^{1/2}(f_x)}{dt^{1/2}} + f_x \quad (7)$$

Từ (7) biến đổi tương đương trở thành (8):

$$\ddot{x} = \frac{2K_i}{m} i + \frac{2K_x}{m} x - \frac{C}{m} \dot{x} - \frac{Ck}{mR^0} \frac{d^{3/2} x}{dt^{3/2}} - \frac{k}{R^0} \frac{d^{5/2} x}{dt^{5/2}} - g + \frac{k}{mR^0} \frac{d^{1/2}(f_x)}{dt^{1/2}} + \frac{f_x}{m} = A + B\dot{x} + Ei + d(x) \quad (8)$$

Trong đó: C: Hệ số giảm chấn của đĩa quay [8],  $f_x$  là nhiễu tải bên ngoài,  $m$  là khối lượng của đĩa quay,  $l_i = 2h + 2c$  là chiều dài đường từ trường của sắt từ,  $k$  được xác định như (9) là hệ số biểu thị ảnh hưởng dòng xoáy trong ổ từ cấu trúc nguyên khối.

$$k = \left[ \frac{l_i}{4(a+b)} + \frac{b}{3a} - \frac{16b^2}{\pi^5 a^2} \tanh\left(\frac{\pi a}{2b}\right) \right] \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_r \mu_0}} \quad (9)$$

$R^0 = \frac{1}{\mu_0 A} \left( 2z_0 + \frac{l_i}{\mu_r} \right)$  là tổng từ trở tĩnh.  $K_i = \frac{2N^2 i_o}{\mu_0 A (R^0)^2}$  là hệ số tỉ lệ với dòng điện,

$K_x = \frac{1}{(R^0)^3} \left( \frac{2Ni_o}{\mu_0 A} \right)^2$  là hệ số tỉ lệ với độ dịch chuyển,  $A = \frac{2K_x}{m} x - g$ ,  $B = \frac{-C}{m}$ ,  $E = \frac{2K_i}{m}$ ,

$d(x) = -\frac{Ck}{mR^0} \frac{d^{3/2} x}{dt^{3/2}} - \frac{k}{R^0} \frac{d^{5/2} x}{dt^{5/2}} + \frac{k}{mR^0} \frac{d^{1/2}(f_x)}{dt^{1/2}} + \frac{f_x}{m}$  là nhiễu tải bên ngoài và nhiễu do tổn hao dòng xoáy.

Vậy (8) là động lực học tổng quát trên miền thời gian của ổ từ dọc trục (1 cặp cực từ) cấu trúc nguyên khối. Nhận thấy (8) là mô hình toán học có chứa đạo hàm bậc phân số 3/2 và 5/2 của độ dịch chuyển  $x$  theo thời gian là những thành phần thể hiện ảnh hưởng của dòng xoáy trong ổ từ cấu trúc nguyên khối.

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Từ (8) có thể tách  $f(x)$  và  $g(x)$  thành 2 thành phần cố định và thành phần bất định được thể hiện như (10)

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = (A_n + \Delta A) + (B_n + \Delta B)\dot{x} + (E_n + \Delta E) \cdot i + d(x) = A_n + B_n \dot{x} + E_n \cdot i + l(x) \quad (10)$$

Trong đó:  $l(x) = d(x) + \Delta A + \Delta B \dot{x} + \Delta E i$  là nhiễu tải bên ngoài, nhiễu do tham số bất định của mô hình và nhiễu do tổn hao dòng xoáy.  $A_n = \frac{2K_x}{m} x - g$ ,  $B_n = \frac{-C}{m}$  và  $E_n = \frac{2K_i}{m}$  là những thành phần ước lượng được,  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  và  $\Delta E$  do thành phần bất định sinh ra.  $l(x)$  được coi như

tổng nhiều bất định của mô hình. Để thiết kế bộ điều khiển trượt, việc ước lượng trước được giá trị chặn trên và chặn dưới của thành phần bất định  $l(x)$  là rất cần thiết. Với mục đích thiết kế tổng quát, ta giả sử tồn tại một số  $K$  đủ lớn thỏa mãn:

$$K \geq |l(x)|.$$

**Bước 1:** Thiết kế mặt trượt

Đặt: (11)  
 $e = x_d - x$

Đạo hàm 2 vế (11) kết quả thu được: (12)  
 $\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}$

Sử dụng mặt trượt bậc hai như sau:

$$s(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right) e(t) \quad (\lambda > 0) \quad (13)$$

Khi trạng thái hệ thống ở trên mặt trượt  $s(t)=0$  thì  $e = ae^{-\lambda t}$  nên khi  $t \rightarrow \infty$  thì  $e \rightarrow 0$ .  $\lambda$  là hệ số dương, được chọn sao cho đa thức  $A(p) = p + \lambda$  là đa thức Hurwitz.

**Bước 2:** Tìm hàm điều khiển  $i(t)$  để trạng thái hệ thống tiến về và trượt trên mặt  $s(t)$ .

Để làm được điều này, nguyên lý ổn định Lyapunov được sử dụng. Xét hàm ứng viên Lyapunov xác định dương:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) \quad (14)$$

Để hệ thống luôn ổn định tại  $s=0$  thì cần phải có:  $\dot{V}(t) = \dot{s}(t)s(t) < 0$ .

Đạo hàm của mặt trượt (13) theo thời gian:

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = \ddot{x}_d(t) - A_n - B_n \dot{x}_d - E_n i(t) - l(x) + (B_n + \lambda) \dot{e}(t) \quad (15)$$

Độ ổn định của đối tượng sẽ đạt được khi hàm điều khiển được thiết kế có dạng:

$$i(t) = \frac{1}{g_o(x)} (\ddot{x}_d(t) - A_n - B_n \dot{x}_d + (B_n + \lambda) \dot{e}(t) + K \text{sign}(s(t))) \quad (16)$$

**Chứng minh bộ điều khiển trượt thỏa mãn điều kiện trượt:**

Bằng cách thay (16) vào biểu thức đạo hàm của mặt trượt theo thời gian (15) kết quả đạt được:

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = -l(x) - K \text{sign}(s(t)) \quad (17)$$

Do  $K \geq |l(x)|$  nên  $\dot{s}(t) = -l(x) - K \text{sign}(s(t)) \leq -\eta \text{sign}(s(t))$  với  $\eta > 0$  và hàm số  $s(t) \text{sign}(s(t)) \geq 0 \forall s(t)$  nên tích  $s \frac{ds}{dt} = -s K \text{sign}(s) \leq 0 \Rightarrow$  thỏa mãn điều kiện trượt.

**4. MÔ PHỎNG**

Các thông số trong mô phỏng cho ổ đỡ từ cấu trúc nguyên khối 1 bậc tự do được chọn và tính toán kết quả như bảng 1:

**Bảng 1.** Các thông số của ổ đỡ từ để mô phỏng.

Mô tả thông số	Ký hiệu	Giá trị
1/2 chiều cao của cực từ	a	7.5 mm
1/2 chiều rộng của cực từ	b	2.5 mm
Chiều dài stator (hình 1)	c	20 mm

Chiều dài rotor (hình 1)	h	30 mm
Độ dẫn điện của sắt	$\sigma$	$2.5 \times 10^6$ S/m
Độ từ thẩm tương đối	$\mu_r$	5000
Độ từ thẩm chân không	$\mu_o$	$4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A
Khối lượng rotor cần nâng	m	2.25 kg
Khe hở không khí giữa stator và rotor	$x_o$	0.2mm
Số vòng dây	N	1200 Vòng
Dòng điện danh định	$i_0$	0.2 A
Diện tích mặt cắt ngang cực từ	A	$75 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup>
Dòng điện tối đa trên cực từ	$i_{max}$	1A
Tổng từ trở tĩnh	$R^0$	$4.4563 \times 10^6$ A/Wb
Hệ số tỉ lệ với dòng điện	$K_i$	307.7479 N/A
Hệ số tỉ lệ với độ dịch chuyển	$K_x$	$2.9309 \times 10^5$ N/m
Hệ số giảm chấn của đĩa quay	C	0.01
Hệ số dòng xoáy	k	$5.1619 \times 10^4$ A/Wb

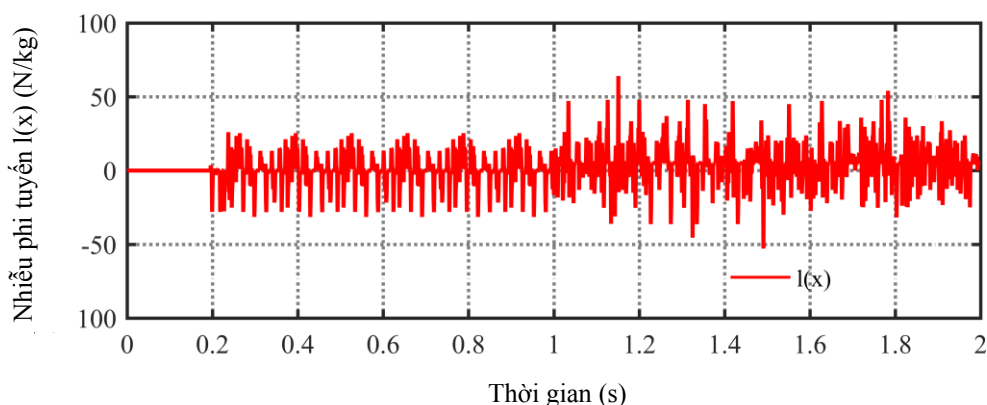
Để phản ánh được độ hiệu quả của hệ thống điều khiển đề xuất, thí nghiệm được mô phỏng trong thời gian 2s đối với trường hợp hàm Sign và hàm Sat-Pi, 0,5s đối với trường hợp hàm Sigmoid.

**Giai đoạn 1:** Trong điều kiện lý tưởng, đối tượng chỉ chứa dòng điện xoáy, không có sự tham gia của nhiễu tải bên ngoài và tham bất định của mô hình.

**Giai đoạn 2:**

Nhiều tải bên ngoài  $f_x$  và tham số bất định của mô hình  $\Delta A + \Delta B\dot{x} + \Delta E.i = (0.15x + 0.5\dot{i})$  được thêm vào từ thời điểm  $t=1s$  đối với hàm Sign và hàm Sat-Pi và 0.25s đối với hàm Sigmoid. Mô phỏng kiểm chứng với hàm  $sign(s)$ , với  $K = 20$ ,  $\lambda = 10000$ ,  $f_x = 10$ ,

$$sign(s) = \begin{cases} 1 & khi s \geq 0 \\ -1 & khi s < 0 \end{cases}$$

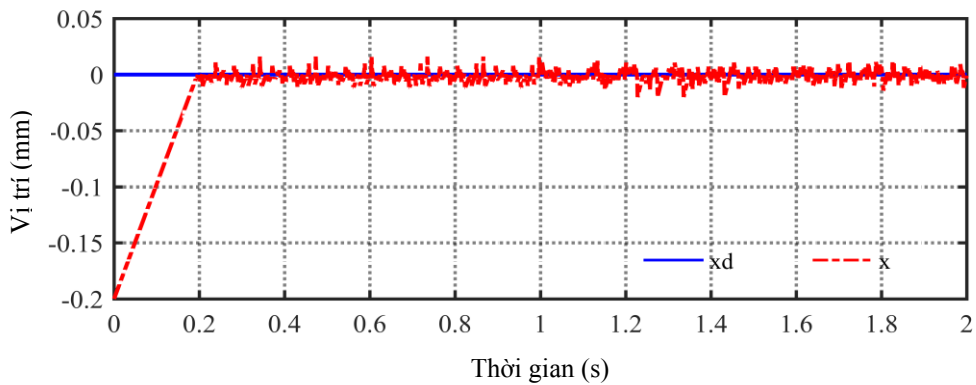


**Hình 2.** Tổng nhiễu phi tuyến  $l(x)$  tác động vào đĩa quay.

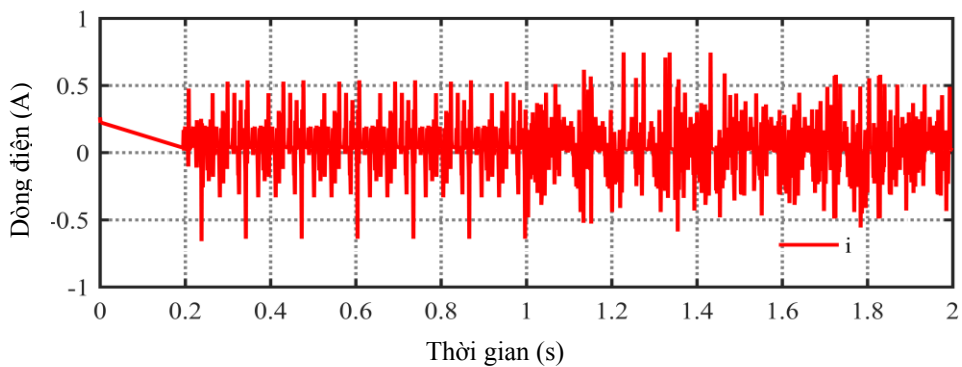
Kết quả mô phỏng đối với trường hợp hình sign được thể hiện trên hình 2-4. Theo hình 2 cho thấy tổng giá trị nhiễu phi tuyến gây ra do hiện tượng chattering của đạo hàm cấp phân số của độ dịch chuyển gây ra là rất lớn ngay cả trong giai đoạn đầu không có nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay và nhiễu do tham số bất định của thiết bị truyền động, tuy nhiên, giá trị cũng được giới hạn  $l(x) \leq 60$  nên vẫn thỏa mãn điều kiện trượt. Theo hình 3-4 cho thấy, mặc dù tín hiệu thực bám tín hiệu đặt sau 0.2s, đạt mục tiêu của điều khiển bám theo giá trị đặt ban đầu, tuy

nhiên, vị trí và dòng điện điều khiển đều có hiện tượng rung (chattering), dao động quanh vị trí cân bằng rất lớn, thời gian để giá trị thực ổn định và bám giá trị đặt lớn. Để khắc phục hiện tượng này hàm chuyển mạch tích phân-bão hòa (Sat-Pi) với  $K = 60$ ,  $\lambda = 1000$ ,  $f_x = 10$ ,  $k_0 = 300$ , được sử dụng để mô phỏng kiểm chứng:

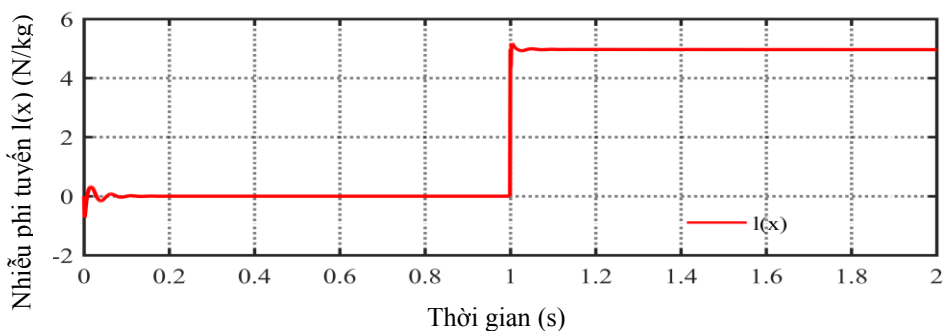
$$SatPi(s) = \begin{cases} sign(s) & khi |s| > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} + k_0 \int_{t_0}^t s(t) dt & khi |s| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (18)$$



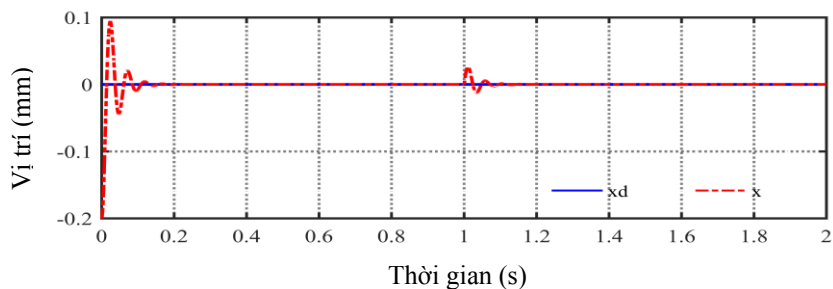
Hình 3. Vị trí của rotor đối với hàm sign.



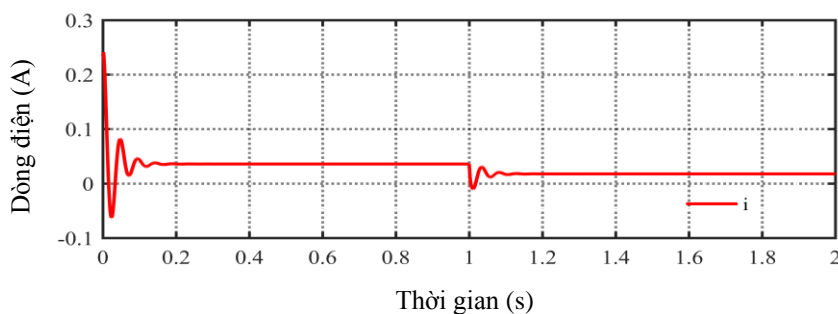
Hình 4. Dòng điện điều khiển cho đối tượng đối với hàm Sign.



Hình 5. Tổng nhiễu phi tuyến l(x) tác động vào đĩa qua.

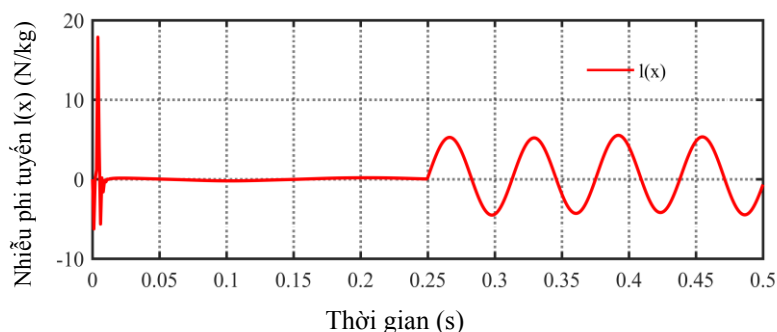


**Hình 6.** Vị trí của rotor của đối tượng đối với hàm Sat-Pi.



**Hình 7.** Dòng điện điều khiển cho đối tượng đối với hàm Sat-Pi.

Kết quả mô phỏng đối với trường hợp hàm Sat-Pi được thể hiện trên hình 5-7. Theo hình 5 cho thấy tổng giá trị nhiễu phi tuyến 5 (N/kg) thay không đáng kể so với giá trị (10/2.25) nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay, điều đó nói lên rằng, nhiễu do thành phần dòng xoáy gây ra là nhỏ hơn nhiều so với nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay nên việc gom các đại lượng do dòng xoáy gây ra, tham số bất định của mô hình,... là khả thi và giá trị cũng được giới hạn  $l(x) \leq 5$  nên thỏa mãn điều kiện trượt. Theo hình 6-7 kết quả cho thấy, tín hiệu thực bám tín hiệu đặt nhanh hơn trường hợp hàm sign, chỉ sau 0,15s đưa đĩa quay về giá trị đặt và đã khắc phục được hiện tượng rung (chattering). Tuy nhiên, trong quá trình quá độ ban đầu vẫn xuất hiện sự dao động lên xuống quanh vị trí đặt lớn, hơn nữa, tại vị trí 1s khi có nhiễu bên ngoài và tham số bất định của mô hình vẫn xuất hiện sự dao động quanh vị trí đặt, lệch khỏi vị trí đặt của rotor và mất 0,1s để rotor trở về vị trí mong muốn.

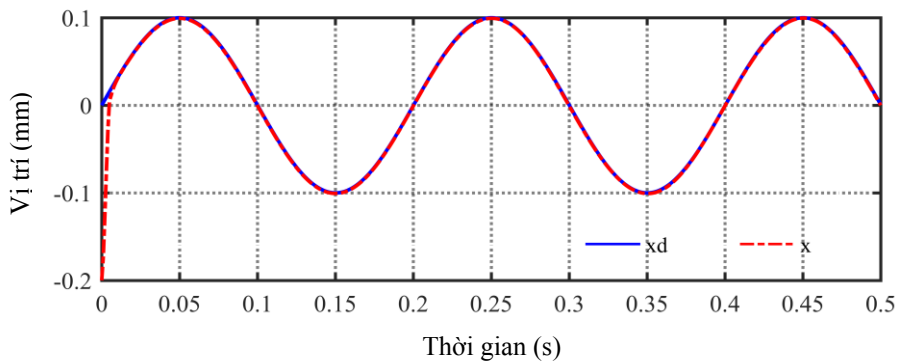


**Hình 8.** Tổng nhiễu phi tuyến  $l(x)$  tác động vào đĩa quay.

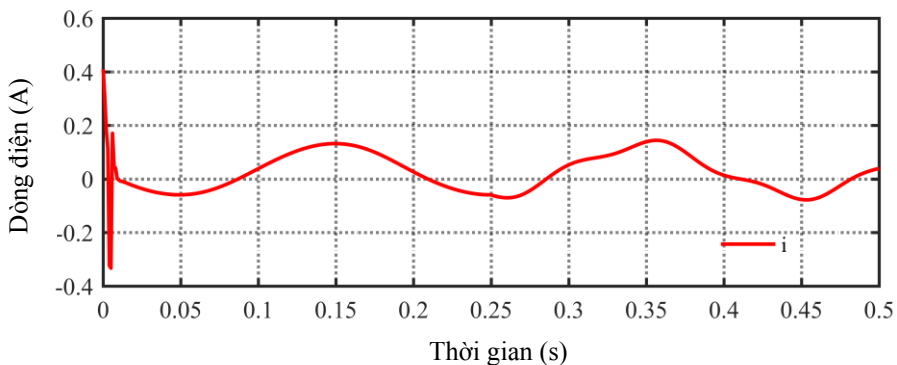
Để khắc phục những hạn chế trên hàm Sigmoid(s) được sử dụng để mô phỏng kiểm chứng, trong thời gian 0.5s với  $K = 60$ ,  $\lambda = 1000$ ,  $a = 500$ , tín hiệu đặt là dạng hàm  $x_d = 0.0001 \sin(31.4t)$ ,

với nhiễu tải bên ngoài  $f_x = 10 \sin(100t)$ :  $Sigmoid(s) = \frac{2}{1 + e^{-sa}} - 1$ ; với hệ số  $a > 0$ .

Kết quả mô phỏng đối với trường hợp hàm Sigmoid đối với nhiễu bên ngoài  $f_x=10\sin(100t)$  được thể hiện trên hình 8-10. Theo hình 8 cho thấy, tổng giá trị cực đại của nhiễu phi tuyến 5 (N/kg) thay không đáng kể so với giá trị (10/2.25) nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay, điều đó nói lên rằng nhiễu do thành phần dòng xoáy gây ra là nhỏ hơn nhiễu so với nhiễu tải bên ngoài tác động vào đĩa quay nên việc gom các đại lượng do dòng xoáy gây ra, tham số bất định của mô hình,... là khả thi và giá trị cũng được giới hạn  $l(x) \leq 5$  nên thỏa mãn điều kiện trượt.



Hình 9. Vị trí của rotor đối với hàm Sigmoid khi có nhiễu  $f_x=10\sin(100t)$ .



Hình 10. Dòng điện điều khiển cho đối tượng đối với hàm Sigmoid khi có nhiễu  $f_x=10\sin(100t)$ .

Theo hình 9-10 cho kết quả rất khả quan như vị mong muốn bám rất nhanh, chỉ sau 0.01s để đưa đĩa quay về vị trí đặt, không có hiện tượng rung (chattering), hiện tượng dao động quanh vị trí ban đầu trong cả trường hợp quá độ ban đầu và tại thời điểm 0.25s khi có nhiễu bên ngoài và tham số bất định tác động vào.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã triển khai thành công phương pháp SMC để điều khiển vị trí rotor của ổ đỡ từ một bậc tự do cấu trúc nguyên khối để đạt được vị trí mong muốn. Động lực học của hệ thống có thể không cần xác định chính xác và không có ràng buộc khắt khe. Các tín hiệu điều khiển được thiết kế đã hạn chế được ảnh hưởng của thành phần bất định vốn làm giảm chất lượng bộ điều khiển như: Tổn hao dòng xoáy, ma sát, nhiễu tải bên ngoài và tham số thay đổi của mô hình. Một hàm chuyển mạch tích phân bão hòa Sat-Pi và hàm Sigmoid được sử dụng làm giảm hiện tượng rung trong điều khiển trượt. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển SMC đối với hàm Sigmoid cho kết quả tốt nhất, đáp ứng vị trí mong muốn của hệ thống bám sát quỹ đạo đặt trong thời gian rất nhanh, không có hiện tượng rung (chattering), không có hiện tượng dao động quanh vị trí đặt trong cả 2 trường hợp quá độ ban đầu và tại thời điểm 1s khi có nhiễu tham số bất định mô hình và nhiễu bên ngoài.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zackary W. Whitlow “*Modeling and Control of Non-laminated Active Magnetic Thrust Bearings*” In Partial Fulfillment of the requirements for the Degree Master of Science (Mechanical and Aerospace Engineering), (2014).
- [2]. L. Zhu, C. Knospe, and E. Maslen, “*An analytical model of a nonlaminated cylindrical magnetic actuator including eddy currents*,” IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 4, pp. 1248–1258, (2005).
- [3]. L. Zhu, C. Knospe, and E. Maslen, “*Frequency domain modeling of nonlaminated C-shaped magnetic actuators*,” in Proc. 9th Int. Symp. Magn. Bearings, Lexington, KY, pp. 1–6, (2004).
- [4]. Lei Zhu, “*Non-laminated Magnetic Actuators: Modeling and Performance Limitations*”, A Dissertation Presented to the Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia (2005).
- [5]. Lei Zhu and Carl R. Knospe, Senior Member, IEEE, “*Modeling of Nonlaminated Electromagnetic Suspension Systems*”, IEEE/ASME transactions on mechatronics, vol. 15, no. 1, (2010).
- [6]. Carl R. Knospe, Senior Member, IEEE, and Lei Zhu, “*Performance Limitations of Non-Laminated Magnetic Suspension Systems*” IEEE transactions on control systems technology, vol. 19, no. 2, (2011).
- [7]. Vadim Utkin and Hoon Lee “*Chattering Problem in Sliding Mode Control Systems*”, Proceedings of the 2006 International Workshop on Variable Structure Systems Alghero, Italy, (2006).
- [8]. Te-Jen Su, Tsung-Ying Li, Tung-Yeh Tsou, Van-Nam Giap, Quang-Dich Nguyen “*Proportional–integral derivative/fuzzy sliding mode control for suspension of active magnetic bearing system*”, Advances in Mechanical Engineering 2017, Vol. 9(12) 1–8. (2017), DOI:10.1177/1687814017736654journals.sagepub.com/home/ade
- [9]. Zdzislaw Gosiewski and Mariusz Zokowski “*Sliding Mode Control for Active Magnetic Bearings*”, See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/319314701>.
- [10]. Mao, Jing Feng, et al. “*Sliding mode control of magnetic bearing system based on variable rate reaching law*”, Key Engineering Materials. Vol.460. Trans Tech Publications Ltd, (2011).
- [11]. Tsai, Yao-Wen, and Viet Anh Duong. “*Sliding mode control for active magnetic bearings of a flywheel energy storage system*”, 2016 IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). IEEE, (2016).
- [12]. Jianpeng Zhong and Lichuan Li “*Tuning Fractional-Order PI $\lambda$ D $\mu$  Controllers for a Solid-Core Magnetic Bearing System*”, IEEE transactions on control systems technology, vol. 23, no. 4, (2015).
- [13]. B. S. J. K. Hedrick, “*Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear Systems*”.
- [14]. L. Feng, M. Deng, S. Xu, and D. Huang, “*Speed Regulation for PMSM Drives Based on a Novel Sliding Mode Controller*” IEEE Access, vol. 8, pp. 63577-63584, (2020), doi:10.1109/ACCESS.2020.2983898.

## ABSTRACT

### **A sliding mode controller design for non-laminated magnetic levitation systems**

*This paper investigates sliding mode control methods for 1-DOF non-laminated active magnetic bearings 1 DOF. A dynamic model of non-laminated active magnetic bearings is expressed that it is difficult to design a model-based controller under nonlinear disturbance components such as eddy current losses in the actuator, external disturbance and uncertain parameters. In order to solve this problem, the sliding control methods are studied to improve the robustness of the controller. The working ability of the non-laminated active magnetic bearings and the effectiveness of the control system are demonstrated by Matlab/Simulink software and the sliding control method applied to the case of the Sigmoid function proposed in this paper has improved the disadvantages of Sign and Sat-Pi functions.*

**Keywords:** Sliding mode control; Non-laminated structure; Electromagnetic bearing; Disturbances; Fractional order derivative.