

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG CHO Ổ TỪ DỌC TRỤC CÓ XÉT ẢNH HƯỞNG CỦA DÒNG XOÁY

SLIDING MODE CONTROL BASED ON EXTENDED STATE OBSERVER
FOR THRUST MAGNETIC BEARINGS CONSIDERING THE EFFECT OF EDDY CURRENTS

Lê Ngọc Hội^{1,*}, Ngô Thanh Quyền¹, Phan Minh Thân¹,
Phạm Trung Kiên², Nguyễn Tùng Lâm³, Lê Đức Thịnh⁴

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.304>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày đề xuất về thiết kế bộ điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng cho ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng dòng xoáy. Mục đích của bài toán đưa ảnh hưởng của dòng xoáy vào mô hình toán học và dùng phương pháp điều khiển loại bỏ ảnh hưởng của dòng xoáy, và tác động của nhiễu ngoại vi bất định vào rotor để đạt được vị trí mong muốn. Mô hình toán học đối tượng thực hiện có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy một bậc tự do được nghiên cứu, nhưng việc này rất phức tạp để xây dựng bộ điều khiển khi đối tượng có sự ảnh hưởng bởi tổng nhiễu phi tuyến như: nhiễu do ảnh hưởng của dòng xoáy trong cơ cấu chấp hành, nhiễu tải bên ngoài tác động vào rotor và nhiễu do các tham số bất định trong mô hình. Phương pháp điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng được nghiên cứu đóng vai trò ước lượng vị trí, vận tốc và tổng nhiễu phi tuyến, từ đó kháng tổng nhiễu bất định và tăng sự bền vững của hệ thống điều khiển. Để kiểm chứng khả năng làm việc của ổ từ có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy, một cấu trúc mô phỏng sử dụng mô trường Matlab Simulink thu được đáp ứng cho thấy ổ từ đã giữ được cân bằng với sai lệch tĩnh nhỏ để hệ thống có thể hoạt động được dưới tác động của nhiễu bất định và có khả năng giảm cảm biến đo tốc độ quay của rotor so với các bộ điều khiển trượt thông thường.

Từ khóa: Điều khiển trượt; dòng xoáy; bộ quan sát trạng thái mở rộng; nhiễu tải bên ngoài; đạo hàm bậc phân số.

ABSTRACT

This paper investigates an extended state observer based sliding mode observer for active thrust magnetic bearings considering the eddy current influence. The proposed control system is to incorporate the influence of eddy currents into the active bearing system and use control system to eliminate the influence of eddy currents and external load disturbances acting on the rotor to achieve the desired position. First, a mathematical model of the thrust magnetic bearings considering the influence of one-degree-of-freedom eddy currents is built. However, the under a lumped disturbance such as: the influence of eddy currents in the actuator, uncertain parameters, and external load disturbances acting on the rotor. A sliding mode controller based an extended state observer is studied to play the role in estimating position, velocity, total nonlinear disturbance. To demonstrate the performance of the active magnetic bearing considering the influence of the lumped disturbance and eddy currents, Matlab/Simulink environment is used that the active magnetic bearing works stably following the desired set value with static deviation compared with the conventional sliding mode control and reduce the sensor measuring the rotor's rotation speed.

Keywords: Sliding mode control; Eddy currents; extended state observer; external load disturbances; fractional-order.

¹Khoa Công nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp TP. HCM

²Phòng Tổ chức - Hành chính, Trường Đại học Công nghiệp TP. HCM

³Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

⁴Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Thủy Lợi

*Email: lengochoi@iuh.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 09/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

CHỮ VIẾT TẮT

SMC	Điều khiển trượt
CMAC	Cấu trúc mô hình tiểu não
PID	Điều khiển tỷ lệ, vi phân, tích phân
FO PID	Điều khiển tỷ lệ, vi phân, tích phân bậc phân số
FBL	Phản hồi tuyến tính
ESO	Bộ quan sát trạng thái mở rộng
SMC-ESO	Điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng

1. GIỚI THIỆU

Với những ưu điểm nổi bật là không có tổn hao ma sát, không chịu mài mòn, không chất bôi trơn và khả năng làm việc ở những môi trường khắc nghiệt, ổ từ dọc trục (ổ chặn dùng lực từ) đang là đối tượng được nghiên cứu nhiều trong thời gian gần đây. Các nghiên cứu thường tập trung theo hướng về cấu trúc, về nguyên lý tạo lực nâng, nhân dạng tham số hay điều khiển nâng cao chất lượng làm việc ổ từ dọc trục. Do bộ truyền động ổ từ không tiếp xúc mang lại lợi ích to lớn cho nhiều ứng dụng công nghiệp bao gồm máy quay [1], vận chuyển kim loại [2], quy trình phủ kim loại [3], vận chuyển silicon [4], hệ thống servo công cụ [5] và quang khắc [6].

Stator và rotor của ổ từ bình thường được cấu tạo bằng các lá thép kỹ thuật để giảm tổn hao dòng xoáy khi có dòng điện thay đổi theo thời gian cấp vào hai đầu cuộn dây stator, khi các lá thép kỹ thuật càng mỏng thì tổn hao dòng xoáy càng nhỏ, tuy nhiên các lá thép kỹ thuật dù mỏng đến mức nào vẫn tồn tại tổn hao dòng xoáy. Trong một số ứng dụng, đặc biệt đối ổ từ dọc trục do mối quan tâm đến kinh phí chế tạo và yêu cầu về độ bền cơ học nên rotor thường được cấu tạo nguyên khối. Để phân tích rõ ràng ảnh hưởng của dòng xoáy đối với ổ từ dọc trục, một số công trình đã nghiên cứu xây dựng mô hình toán học cho ổ từ dọc trục cấu tạo nguyên khối [7, 9-15].

Các nghiên cứu về điều khiển đối với ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy chưa có nhiều tác giả nghiên cứu. Vào năm 2014, công trình [7] đã nghiên cứu bộ điều khiển PID, FBL và FBL-PID cho ổ từ dọc trục xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy. Vào năm 2015, công trình [8] cũng đã nghiên cứu bộ điều khiển FO PID cho ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy, đa số các công trình nói trên các tác giả đã dùng phương pháp điều khiển cổ điển trên miền tần số cho ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy một cực từ. Gần đây trong công

trình của tác giả đã công bố phương pháp SMC thông thường cho ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy một cặp cực từ [9], các phương pháp điều khiển hiện đại trên miền thời gian nói chung chưa có nhiều công trình công bố và phương pháp SMC dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) nói riêng chưa có công trình nào công bố.

Điều khiển cho những đối tượng mà động lực học có dạng đạo hàm cấp phần số như ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy là một vấn đề mới, chỉ phát triển trong vòng hai thập niên trở lại đây. Do đó việc nghiên cứu đưa ảnh hưởng của dòng xoáy vào mô hình toán học, từ đó đưa ra phương pháp điều khiển phù hợp đó là SMC kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng cho ổ từ dọc trục có ảnh hưởng dòng xoáy để loại bỏ ảnh hưởng của dòng xoáy nâng cao chất lượng làm việc của ổ từ là vấn đề rất mới.

Có thể nói những đóng góp mới của nghiên cứu này được thể ở hai ý chính như sau:

(i) Xây dựng được phương pháp SMC dựa trên ESO với mô hình toán học có ảnh hưởng của dòng xoáy và loại bỏ sự ảnh hưởng của dòng xoáy để nâng cao chất lượng làm việc của ổ từ dọc trục, trạng thái mở rộng của bộ quan sát trạng thái ($ESO-\hat{x}_3$) được ước lượng, từ đó đưa vào SMC để tăng khả năng kháng nhiễu của SMC. kết quả mô phỏng cho chất lượng tốt hơn các bộ điều khiển CMAC, SMC thông thường.

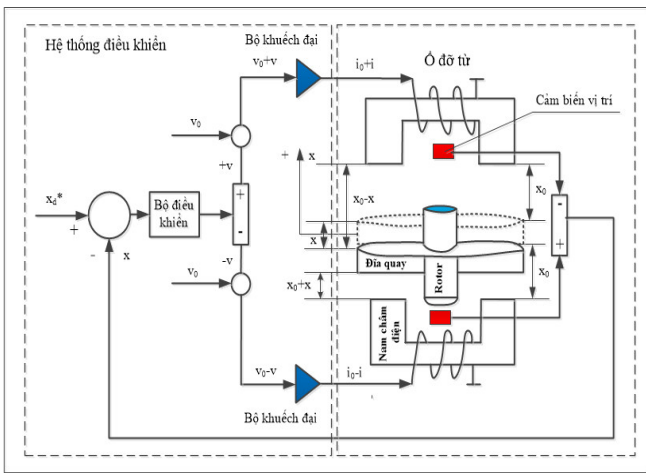
(ii) Nếu SMC không dựa trên ESO thì phải dùng hai cảm biến là cảm biến đo độ dịch chuyển và cảm biến đo tốc độ quay của rotor. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả thiết kế phương pháp SMC dựa trên ESO thì đầu vào của ESO là độ dịch chuyển x của rotor, đầu ra của ESO là các trạng thái ước lượng được như độ dịch chuyển của rotor (\hat{x}_1), tốc độ quay của rotor (\hat{x}_2) và trạng thái mở rộng là tổng nhiễu phi tuyến (\hat{x}_3). Từ đó, ba trạng thái ước lượng được này đưa vào bộ điều khiển SMC, do đó đã giảm được cảm biến đo tốc độ quay của rotor.

Cấu trúc của nghiên cứu này được trình bày như sau: Phần 2, trình bày tóm tắt mô hình toán học của ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy một cặp cực từ. Phần 3, bộ quan sát trạng thái mở rộng áp dụng cho ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy được thiết kế một cách chi tiết. Phần 4, phương pháp SMC dựa trên ESO được áp dụng cho ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy được xây dựng. Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển cho ổ từ dọc trục có ảnh hưởng của dòng xoáy một cặp cực từ trong trường hợp có tham số thay đổi mô hình,

nhiều ngoại vi bất định vào rotor để chứng minh chất lượng SMC dựa trên ESO được trình bày trong phần 5. Phần 6, kết luận chung được rút ra.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC Ổ TỪ DỌC TRỰC CÓ ẢNH HƯỞNG CỦA DÒNG XOÁY

Đối với ổ từ dọc trục do yêu cầu về độ cứng và chi phí chế tạo nên rotor thông thường cấu tạo nguyên khối, khi đó dòng xoáy ảnh hưởng rất lớn đối với ổ từ dọc trục khi có dòng điện biến thiên cấp vào hai đầu cuộn dây stator. Để thấy rõ ràng và phân tích ảnh hưởng của dòng xoáy đối với ổ từ dọc trục các nghiên cứu cấu trúc hệ thống điều khiển của ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy như hình 1 gồm: một rotor được treo tự do tại một khoảng cách mong muốn x_0 bởi 2 stator đều có cấu tạo nguyên khối.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống điều khiển ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng dòng xoáy một cặp cực

Theo [7, 9-15], phương trình chuyển động với với ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy gồm một cặp cực từ trên miền thời gian là:

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

(1)

Vậy (1) là phương trình chuyển động của ổ từ dọc trục gồm một cặp cực từ có xét ảnh hưởng dòng xoáy. Trong phương trình chuyển động (1) có chứa thành phần đạo hàm bậc phân số 3/2, 5/2 của độ dịch chuyển x, đây là những thành phần thể hiện ảnh hưởng của dòng xoáy ổ từ dọc trục.

Trong đó: c là chiều dài stator, h là chiều dài rotor, μ_r là độ từ thẩm tương đối của vật liệu sắt, μ_0 là độ từ thẩm chân không, x_0 là khoảng cách giữa stator và rotor tại vị trí cân bằng, i_0 là dòng điện tiền từ hóa (dòng cố định) để

nâng rotor lên vị trí cân bằng, N là số vòng dây stator, A là tiết diện mạch từ, C là hệ số giảm chấn của rotor [16, 17], f_x là nhiễu ngoại vi bất định vào rotor, m là khối lượng của rotor, $l_i = 2h + 2c$ là chiều dài đường từ trường của phần

tử sắt từ, $K_i = \frac{2N^2i_0}{\mu_0A(R^0)^2}$ là hệ số độ cứng dòng điện,

$K_x = \frac{1}{(R^0)^3} \left(\frac{2Ni_0}{\mu_0A} \right)^2$ là hệ số độ cứng dịch chuyển.

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

là hệ số thể hiện ảnh hưởng dòng xoáy trong ổ từ dọc trục,

$R^0 = \frac{1}{\mu_0A} \left(2x_0 + \frac{l_i}{\mu_r} \right)$ là tổng từ trở tĩnh của mạch từ ổ từ

dọc trục.

Đặt :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{x} = \frac{2K_x}{m}x_1 - \frac{C}{m}x_2 + \frac{2K_i}{m}i + d_1(x_1, x_2, t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{x} = A_1x_1 + B_1x_2 + D_1 + d_1(x_1, x_2, t) \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: $A_1 = \frac{2K_x}{m}$, $B_1 = \frac{-C}{m}$, $D_1 = \frac{2K_i}{m}$,

$$d_1(x_1, x_2, t) = -\frac{Ck}{mR^0} \frac{d^{3/2}x_1}{dt^{3/2}} - \frac{k}{R^0} \frac{d^{5/2}x_1}{dt^{5/2}} - g + \frac{k}{mR^0} \frac{d^{1/2}(f_x)}{dt^{1/2}} + \frac{f_x}{m}$$

là tổng nhiễu phi tuyến của ổ từ một cặp cực từ có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy và nhiễu ngoại vi bất định vào rotor.

3. THIẾT KẾ BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG CHO Ổ TỪ DỌC TRỰC CÓ ẢNH HƯỞNG CỦA DÒNG XOÁY

Từ (2) có thể viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{B}(D_1 + d_1(x_1, x_1, t)) \\ y = \mathbf{Gx} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{G} = [1 \ 0]$,

$|\dot{d}(\cdot)| \leq L$, (L là hằng số dương)

$$d(x_1, x_2, t) = A_1x_1 + B_1x_2 + d_1(x_1, x_2, t)$$

Theo [18, 19], bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \frac{k_1}{\epsilon}(y - \hat{x}_1) \quad (4)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = D_1 + \hat{x}_3 + \frac{k_2}{\epsilon^2}(y - \hat{x}_1) \quad (5)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = \frac{k_3}{\epsilon^3}(y - \hat{x}_1) \tag{6}$$

Mục đích của bộ quan sát là: $\hat{x}_1(t) \rightarrow x_1(t)$, $\hat{x}_2(t) \rightarrow x_2(t)$, $\hat{x}_3(t) \rightarrow d(x_1, x_2, t)$ khi $t \rightarrow \infty$

Trong đó: \hat{x}_1 và \hat{x}_2 là các trạng thái của bộ quan sát, \hat{x}_3 là trạng thái mở rộng của bộ quan sát, trong đó $\epsilon > 0$, k_1, k_2 và k_3 là hằng số dương, sao cho $s^3 + k_1s^2 + k_2s + k_3$ là đa thức Hurwitz.

Theo [19, 20], bộ quan sát sai số được định nghĩa như sau:

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^T \tag{7}$$

Trong đó: $\eta_1 = \frac{x_1 - \hat{x}_1}{\epsilon^2}$, $\eta_2 = \frac{x_2 - \hat{x}_2}{\epsilon}$, $\eta_3 = d - \hat{x}_3$, từ

$$\begin{aligned} \epsilon \dot{\eta}_1 &= \frac{\dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \left(x_2 - \left(\hat{x}_2 + \frac{k_1}{\epsilon}(y - \hat{x}_1) \right) \right) \\ &= -\frac{k_1}{\epsilon^2}(x_1 - \hat{x}_1) + \frac{1}{\epsilon}(x_2 - \hat{x}_2) = -k_1\eta_1 + \eta_2 \end{aligned} \tag{8}$$

Tương tự:

$$\begin{aligned} \epsilon \dot{\eta}_2 &= \epsilon \frac{\dot{x}_2 - \dot{\hat{x}}_2}{\epsilon} \\ &= -\frac{k_2}{\epsilon^2}(x_1 - \hat{x}_1) + (d(t) - \hat{x}_3) = -k_2\eta_1 + \eta_3 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\epsilon \dot{\eta}_3 = \epsilon(d(t) - \dot{\hat{x}}_3) = \epsilon d - \frac{k_3}{\epsilon^2} = -k_3\eta_1 + \epsilon d \tag{10}$$

Từ trên, bộ quan sát sai số của hệ thống có thể viết dưới dạng:

$$\epsilon \dot{\boldsymbol{\eta}} = \bar{\mathbf{A}}\boldsymbol{\eta} + \epsilon \bar{\mathbf{B}}\dot{d} \tag{11}$$

$$\text{Trong đó: } \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 & 0 \\ -k_2 & 0 & 1 \\ -k_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Phương trình đặc tính của ma trận $\bar{\mathbf{A}}$ là:

$$|\lambda \mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}}| = \begin{vmatrix} \lambda + k_1 & -1 & 0 \\ k_2 & \lambda & -1 \\ k_3 & 0 & \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\Leftrightarrow (\lambda + k_1)\lambda^2 + k_2\lambda + k_3 = 0 \Leftrightarrow \lambda^3 + k_1\lambda^2 + k_2\lambda + k_3 = 0$$

Nếu k_i ($i = 1, 2, 3$) được chọn sao cho $\bar{\mathbf{A}}$ là đa thức Hurwitz, thì đối với bất kỳ ma trận đối xứng xác định dương \mathbf{Q} đã cho, tồn tại một ma trận đối xứng xác định dương duy nhất \mathbf{P} thỏa mãn phương trình Lyapunov như sau:

$$\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{Q} = 0 \tag{12}$$

Hàm Lyapunov được định nghĩa như sau:

$$V_o = \epsilon \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \tag{13}$$

Do đó:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o &= \epsilon \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} + \epsilon \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ &= \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} + \epsilon (\bar{\mathbf{B}}\dot{d})^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} \boldsymbol{\eta} + \epsilon \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}} \dot{d} \\ &= \boldsymbol{\eta}^T (\bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}}) \boldsymbol{\eta} + 2\epsilon \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}} \dot{d} \\ &\leq -\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{Q} \boldsymbol{\eta} + 2\epsilon \|\mathbf{P} \bar{\mathbf{B}}\| \cdot \|\boldsymbol{\eta}\| \cdot |\dot{d}| \end{aligned} \tag{14}$$

Từ (14), suy ra (15):

$$\dot{V}_o = -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\boldsymbol{\eta}\|^2 + 2\epsilon L \|\mathbf{P} \bar{\mathbf{B}}\| \|\boldsymbol{\eta}\| \tag{15}$$

Trong đó: $\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ là giá trị riêng tối thiểu của \mathbf{Q} .

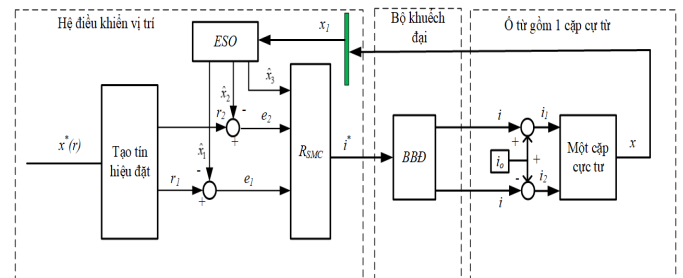
Từ $\dot{V}_o \leq 0$, ta có thể kết luận được bộ quan sát sai số hội tụ khi thỏa mãn biểu thức sau:

$$\|\boldsymbol{\eta}\| \leq \frac{2\epsilon L \|\mathbf{P} \bar{\mathbf{B}}\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} \tag{16}$$

Từ phương trình (16) có thể thấy sự hội tụ của bộ quan sát sai số $\boldsymbol{\eta}$ có liên quan đến ϵ . Nếu ϵ được thiết kế là số dương cực nhỏ thì bộ quan sát sai số $\boldsymbol{\eta}$ sẽ hội tụ và $\|\boldsymbol{\eta}\|$ là hàm của ϵ .

4. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG CHO Ổ TỬ DỤC TRỤC CÓ XÉT ẢNH HƯỞNG CỦA DÒNG XOÁY

Ta có cấu trúc hệ thống điều khiển SMC dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng cho ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy được thể hiện như hình 2.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng cho ổ từ dọc trục

Giá trị đặt theo yêu cầu điều khiển là r và $e_1 = x_1 - r$, $e_2 = x_2 - \dot{r}$ là sai số giữa các tín hiệu điều khiển và các tín hiệu đặt. Do đó sai số hệ thống được viết dưới dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = d_1(t) - \ddot{r} + A_1(e_1 + r) + B_1(e_2 + \dot{r}) + D_1(t) \end{cases} \tag{17}$$

Chọn biến mặt trượt có dạng như sau: $s = e_2 + \alpha e_1$, trong đó: $\alpha > 0$ là một hằng số dương. Do đó bộ quan sát mặt trượt là: $\hat{s} = \hat{e}_2 + \alpha \hat{e}_1$. Trong đó: $\hat{e}_1 = \hat{x}_1 - r$, $\hat{e}_2 = \hat{x}_2 - \dot{r}$. Từ đó ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{s}} &= \dot{\hat{e}}_2 + \alpha \dot{\hat{e}}_1 \\ &= d_1(t) - \ddot{r} + A_1(e_1 + r) + B_1(e_2 + \dot{r}) + D\dot{r}(t) + \alpha e_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Xét hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (19)$$

Từ (18) và (19) suy ra:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(d_1(t) - \ddot{r} + A_1(e_1 + r) + B_1(e_2 + \dot{r}) + D\dot{r}(t) + \alpha e_2) \quad (20)$$

Do đó chọn dòng điều khiển như sau:

$$i(t) = \frac{1}{D}(-\hat{x}_3 + \ddot{r} - A_1(\hat{e}_1 + r) - B_1(\hat{e}_2 + \dot{r}) - \alpha \hat{e}_2 - \text{lsigmoid}(\hat{s})) \quad (21)$$

Chứng minh tính ổn định của hệ thống:

Thế (21) vào (20) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(d_1(t) - \hat{x}_3 - \text{lsigmoid}(\hat{s}) \\ &\quad + A_1(e_1 - \hat{e}_1) + B_1(e_2 - \hat{e}_2) + \alpha e_2 - \alpha \hat{e}_2) \\ &= -(\hat{s} + s - \hat{s})\text{lsigmoid}(\hat{s}) \\ &\quad + (\hat{s} + s - \hat{s})(d_1(t) - \hat{x}_3) + A_1(\hat{s} + s - \hat{s})(e_1 - \hat{e}_1) \\ &\quad + (B_1 + \alpha)(\hat{s} + s - \hat{s})(e_2 - \hat{e}_2) \\ &\leq -\hat{s}\text{lsigmoid}(\hat{s}) + |s - \hat{s}|(|d_1(t) - \hat{x}_3| \\ &\quad + A_1|e_1 - \hat{e}_1| + (B_1 + \alpha)|e_2 - \hat{e}_2|)|\hat{s}| \\ &\quad + (|d_1(t) - \hat{x}_3| + A_1|e_1 - \hat{e}_1| + (B_1 + \alpha)|e_2 - \hat{e}_2|)|s - \hat{s}| \end{aligned} \quad (22)$$

Do sự hội tụ của bộ quan sát mở rộng nên

$$\begin{aligned} &(|d_1(t) - \hat{x}_3| + A_1|e_1 - \hat{e}_1| + (B_1 + \alpha)|e_2 - \hat{e}_2|)|\hat{s}| \\ &+ (|d_1(t) - \hat{x}_3| + A_1|e_1 - \hat{e}_1| + (B_1 + \alpha)|e_2 - \hat{e}_2|)|s - \hat{s}| \end{aligned}$$

bị chặn, đủ nhỏ, khi đó ta có: $\dot{V} < 0$, khi đó hệ thống ổn định.

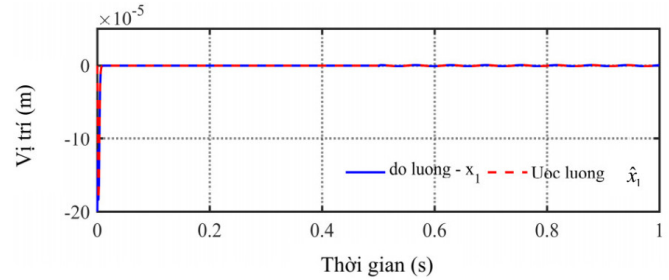
5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Để kiểm chứng được độ hiệu quả của hệ thống điều khiển được thiết kế cho ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy, với các thông số ổ từ dọc trục được lấy như trong [9]. Thí nghiệm được mô phỏng trong phần mềm matlab Simulink với thời gian 1s trong hai thời gian khác nhau như sau:

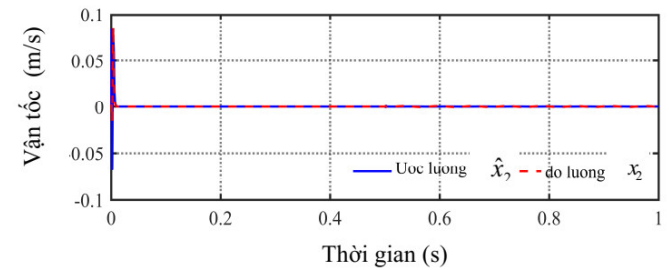
Giai đoạn 1: Trong khoảng thời gian từ $0 \div 0,5s$ với điều kiện lý tưởng, đối tượng chỉ chịu ảnh hưởng của dòng điện xoáy, không chịu ảnh hưởng của các nhiễu nhiễu ngoại vi bất định khác.

Giai đoạn 2: Trong khoảng thời gian $0,5 \div 1s$ và tại thời điểm $t = 0,5s$ đối tượng điều khiển chịu ảnh hưởng

của nhiễu ngoại vi bất định vào rotor $f_x = 120\sin(100t)$ và ảnh hưởng của tham số thay đổi mô hình $\Delta A + \Delta di = (0,15x + 0,5i)$. Mô phỏng phương pháp SMC dựa trên ESO (SMC-ESO) được so sánh với các phương pháp điều khiển như mô hình tiểu não (CMAC) và SMC thông thường. Với thông số mô phỏng: $\epsilon = 0,01$, $k_1 = 1800$, $k_2 = 1080000$ và $k_3 = 216000000$.

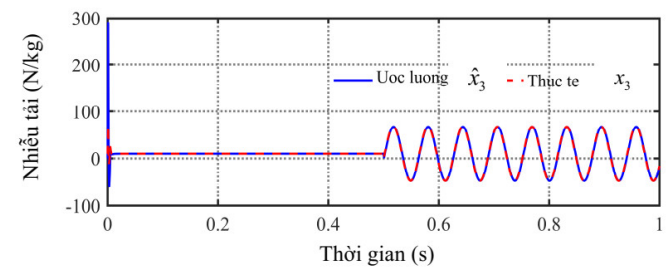


Hình 3. Vị trí đo lường và giá trị ước lượng tương ứng



Hình 4. Vận tốc đo lường và giá trị ước lượng tương ứng

Với kết quả mô phỏng được thể hiện như hình 3 cho thấy giá trị ước lượng của vị trí điều khiển \hat{x}_1 bám rất sát giá trị thực tế x_1 với sai số gần như bằng không và tín hiệu điều khiển x_1 cũng bám tín hiệu đặt ($r = 0$) với sai lệch tính gần như bằng không với thời gian ổn định khoảng $0,01s$ là rất nhỏ. Trên hình 4 cho thấy giá trị ước lượng của vận tốc rotor \hat{x}_2 cũng bám rất sát giá trị thực tế x_2 với sai số gần như bằng không.

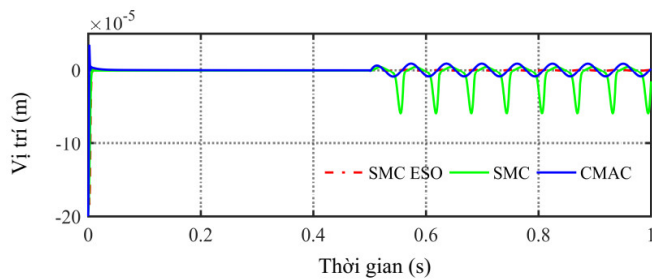


Hình 5. Nhiễu tải thực tế và giá trị ước lượng tương ứng

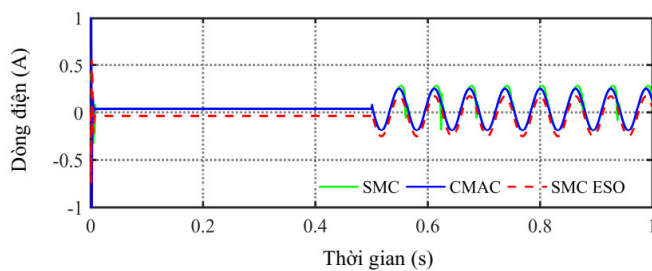
Với kết quả mô phỏng như hình 5 cho thấy giá trị ước lượng của tổng nhiễu phi tuyến bám rất sát giá trị nhiễu thực tế với sai số gần như bằng không.

Đối với trường hợp phương pháp SMC-ESO, SMC thông thường và CMAC được thể hiện như hình 6 cho thấy: Đối với SMC-ESO rotor bám giá trị đặt với thời gian

ổn định 0,01s là rất ngắn, không có hiện tượng dao động quanh vị trí đặt cân bằng, đặc biệt khi có nhiều tải bên ngoài tác động vào rotor thì rotor bám giá trị đặt với sai lệch tĩnh nhỏ hơn SMC thông thường và CMAC rất nhiều, đặc biệt là đối với SMC thông thường có chất lượng kháng nhiễu kém nhất trong ba phương pháp. Như vậy qua kết quả mô phỏng này tác giả có thể khẳng định rằng SMC-ESO loại bỏ sự ảnh hưởng của dòng xoáy, có khả năng kháng nhiễu ngoại vi bất định vào rotor, nhiều do tham số thay đổi mô hình tốt hơn so với SMC thông thường và CMAC.



Hình 6. Đáp ứng vị trí của rotor



Hình 7. Dòng điện điều khiển cho ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng dòng xoáy một cặp cực từ

6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã nghiên cứu thiết kế phương pháp SMC dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng để điều khiển vị trí rotor của ổ từ dọc trục có xét ảnh hưởng của dòng xoáy đạt được mục đích điều khiển là rotor ở vị trí cân bằng. Mô hình toán học của ổ từ dọc trục có xét đến ảnh hưởng của dòng xoáy có thể không cần phải xác định một cách chính xác so với mô hình thực tế. Bộ điều khiển được thiết kế với mục đích loại bỏ được sự ảnh hưởng của thành phần bất định làm giảm chất lượng bộ điều khiển như: Ảnh hưởng của dòng xoáy, ảnh hưởng nhiễu ngoại vi bất định vào rotor và ảnh hưởng của tham số thay đổi mô hình. Kết quả mô phỏng cho thấy SMC-ESO cho kết quả rotor bám vị trí cân bằng với sai lệch tĩnh nhỏ hơn CMAC và SMC thông thường khi có ảnh hưởng của dòng xoáy, ảnh hưởng của nhiễu tải bên ngoài tác động vào rotor, ảnh hưởng của tham số thay đổi mô hình và giảm cảm biến đo tốc độ quay rotor.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Roger L. Fittro, Carl R. Knospe, "Rotor compliance minimization via μ -control of active magnetic bearings," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10, 2, 238-249, 2002. doi: 10.1109/87.987069.
- [2]. H. Hayashiya, D. Iizuka, H. Ohsaki, E. Masada, "A Novel Combined Lift and Propulsion System for a Steel Plate Conveyance by Electromagnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, 34, 4, 2093-2095, 1998. doi: 10.1109/20.706810.
- [3]. D.L. Trumper, Ming-Chih Weng, R.J. Ritter, "Magnetic Suspension and Vibration Control of Beams for Non-contact Processing," in *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*, 1999. doi: 10.1109/CCA.1999.806704.
- [4]. N. Kawada, S. Morii, J. Yamada, "An attempt at development of a magnetic levitation transport system in vacuum using the mechanism of induced repulsive force," *Vacuum*, 44, 5-7, 757-759, 1993. doi: [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(93\)90142-W](https://doi.org/10.1016/0042-207X(93)90142-W).
- [5]. Hector M. Gutierrez, Paul I. Ro, "Sliding-Mode Control of a Nonlinear-Input System: Application to a Magnetically Levitated Fast-Tool Servo," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45 (6), 921-927, 1998. doi: 10.1109/41.735336.
- [6]. Pradeep Subrahmanyam, Mark Williams, David Trumper, "Active vibration isolation design for a photolithographic stepper," in *Proc. 6th Int. Symp. Magn. Bearings*, 1998.
- [7]. Z. W. Whitlow, *Modeling and Control of Non-laminated Active Magnetic Thrust Bearings*. Thesis Master of Science, University of Virginia 2014. doi: <https://doi.org/10.18130/V3NT0G>.
- [8]. J. Zhong, L. Li, "Tuning Fractional-Order PI λ D μ Controllers for a Solid-Core Magnetic Bearing System." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23, 4, 1648 - 1656, 2015. doi: 10.1109/TCST.2014.2382642.
- [9]. Le Ngoc Hoi, Nguyen Quang Dich, Le Duc Thinh, Nguyen Tung Lam, "A sliding mode controller design for nonlaminated magnetic levitation systems," *Journal of Military Science and Technology*, no. FEE, 81-89, 2022. doi:10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.81-89. (in Vietnamese)
- [10]. L. Zhu, C. R. Knospe, E. H. Maslen, "Analytic model for a nonlaminated cylindrical magnetic actuator including eddy currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 4, 1248-1258, 2005. doi: 10.1109/TMAG.2005.844847.
- [11]. Lei Zhu, Carl R. Knospe, Eric H. Maslen, "Frequency Domain Modeling of Non-laminated C-shaped Magnetic Actuators," in *Ninth International Symposium on Magnetic Bearings*, Lexington, Kentucky, USA, August 3-6, 2004.
- [12]. L. Zhu, *Non-laminated Magnetic Actuators: Modeling and Performance Limitations*. Doctor of Philosophy, University of Virginia, 2005.
- [13]. L. Zhu, C. R. Knospe, "Modeling of nonlaminated electromagnetic suspension systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15, 1, 59-69, 2010. doi: 10.1109/TMECH.2009.2016656.

[14]. C. R. Knospe, L. Zhu, "Performance limitations of non-laminated magnetic suspension systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19, 2, 327-336, 2011. doi: 10.1109/TCST.2010.2044179.

[15]. Le Ngoc Hoi, Pham Huu Luan, Nguyen Quang Dich, Nguyen Tung Lam, "Modelling of Non-laminated magnetic bearings," *Measurement, Control, and Automation*, 2, 2, 17-23, 2021. (in Vietnamese)

[16]. V. N. Giap, S. C. Huang, "Effectiveness of fuzzy sliding mode control boundary layer based on uncertainty and disturbance compensator on suspension active magnetic bearing system," *Meas. Control (United Kingdom)*, 53, 5-6, 934-942, 2020. doi: 10.1177/0020294020905044.

[17]. T. J. Su, T. Y. Li, T. Y. Tsou, V. N. Giap, Q. D. Nguyen, "Proportional-integral-derivative/fuzzy sliding mode control for suspension of active magnetic bearing system," *Adv. Mech. Eng.*, 9, 12, 1-8, 2017. doi: 10.1177/1687814017736654.

[18]. Xinhua Wang, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan, "Output tracking based on extended observer for nonlinear uncertain systems," *Kongzhi yu Juece/Control Decis.*, 19, 10, 1113-1116, 2004.

[19]. Jinkun Liu, Xinhua Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems - Design, Analysis and MATLAB Simulation*. in *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-20907-9_6.

[20]. Hassan K. Khali, "Nonlinear systems," *Routledge Libr. Ed. Econom.*, 46-100, 2019. doi: 10.4324/9781351140447-2.

AUTHORS INFORMATION

**Le Ngoc Hoi¹, Ngo Thanh Quyen¹, Phan Minh Than¹,
Pham Trung Kien², Nguyen Tung Lam³, Le Duc Thinh⁴**

¹Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam

²Office of Human Resources and Administration, Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam

³School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

⁴Faculty of Electrical & Electronics Engineering, ThuyLoi University, Vietnam