

JTST - JOURNAL OF TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY

MANUSCRIPT ID: JIST-2022-0006

ĐIỀU KHIỂN HỒI TIẾP BIẾN CẤU TRÚC TRẠNG THÁI CHO HỆ THỐNG ĐỆM TỪ HAI BẬC TỰ DO

Manuscript ID	JIST-2022-0006
Full title	Điều Khiển Hồi Tiếp Biến Cấu Trúc Trạng Thái Cho Hệ Thống Đệm Từ Hai Bậc Tự Do
Summary	<p>Bài báo này đề xuất thiết kế bộ điều khiển biến cấu trúc (VSC) hồi tiếp trạng thái cho hệ thống phi tuyến. Mô hình phi tuyến của vòng bi từ chủ động (AMB) hai bậc tự do (DOF) thu được bằng cách sử dụng phương trình Lagrange. Vì hệ thống phi tuyến rất khó áp dụng các phương pháp điều khiển cho nên nhờ đến phương trình Lagrange nhằm chuyển đổi hệ thống phi tuyến thành tuyến tính. Phương pháp điều khiển biến cấu trúc có một số ưu điểm như sau: Tính ổn định cao cho một loại hệ thống phi tuyến được xem xét; tín hiệu đáp ứng nhanh và hiệu suất tốt ngay cả khi có nhiễu động và hiệu ứng động. Và nhóm nghiên cứu đưa ra một minh họa nhằm chứng minh tính hiệu quả của phương pháp nêu trên.</p>
Research Topic	Điện tử
Keywords	Vòng bi từ (đệm từ); Hai bậc tự do; Điều khiển biến cấu trúc.
Authors	<ul style="list-style-type: none">- Đức Phan Văn, Email: duc.pv@vlu.edu.vn, School: Trường Đại học Văn Lang, Faculty: .- Đồng Đoàn Văn, Email: , School: Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh , Faculty: .- Sỹ Vũ Quang, Email: , School: Trường Đại học Văn Lang, Faculty: .- Hiếu Lê Ngọc , Email: , School: Trường Đại học Văn Lang, Faculty: .- Bình Nguyễn Văn, Email: , School: Trường Đại học Văn Lang, Faculty: .
Corresponding author	Đức Phan Văn, Email: duc.pv@vlu.edu.vn, School: Trường Đại học Văn Lang, Faculty: .
Funding	NO

Điều khiển hồi tiếp biến cấu trúc trạng thái cho hệ thống đệm từ hai bậc tự do

Variable structure control state feedback for two dof active magnetic bearing system

Phan Văn Đức^{1,*}, Đoàn Văn Đông², Vũ Quang Sỹ¹, Lê Ngọc Hiếu¹, Nguyễn Văn Bình¹

¹Trường Đại học Văn Lang

²Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Email liên hệ: duc.pv@vlu.edu.vn

Tóm tắt:

Bài báo này đề xuất thiết kế bộ điều khiển biến cấu trúc (VSC) hồi tiếp trạng thái cho hệ thống phi tuyến. Mô hình phi tuyến của vòng bi từ chủ động (AMB) hai bậc tự do (DOF) thu được bằng cách sử dụng phương trình Lagrange. Vì hệ thống phi tuyến rất khó áp dụng các phương pháp điều khiển cho nên nhờ đến phương trình Lagrange nhằm chuyển đổi hệ thống phi tuyến thành tuyến tính. Phương pháp điều khiển biến cấu trúc có một số ưu điểm như sau: Tính ổn định cao cho một loại hệ thống phi tuyến được xem xét; tín hiệu đáp ứng nhanh và hiệu suất tốt ngay cả khi có nhiễu động và hiệu ứng động. Và nhóm nghiên cứu đưa ra một minh họa nhằm chứng minh tính hiệu quả của phương pháp nêu trên.

Từ khóa: Vòng bi từ (đệm từ); hai bậc tự do; điều khiển biến cấu trúc.

Abstract:

This paper proposes the state feedback Variable Structure Control (VSC) design approach for the nonlinear system. A nonlinear model of two degrees of freedom (DOF) of Active Magnetic Bearing (AMB) obtained using Lagrange's equation is introduced. Since the nonlinear system is difficult to apply the control methods, the Lagrange equation is used to convert the nonlinear system to linear. The VSC approach has some advantages. Firstly, a robust stabilization for a class of nonlinear systems is considered. Secondly, fast response and good performance even when disturbance and dynamic effects. Finally, a numerical example is used to demonstrate the efficacy of this method.

Keywords: Two DOF; active magnetic bearing system; variable structure control state feedback.

1. Giới thiệu

Nói chung, vòng bi từ chủ động hay đệm từ [1]-[3], [5]-[8] được xem xét vì chúng cho phép hoạt động không tiếp xúc và có thể đảm bảo hệ thống hoạt động tốt ở tốc độ cao mà không cần bôi trơn. Tuy nhiên, mô hình hóa và điều khiển AMBs vẫn là những vấn đề khó khăn, vì AMBs có hoạt động không ổn định và là hệ thống cơ điện tử phi tuyến. Hầu hết các phương pháp thiết kế điều khiển cho AMBs đều dựa trên mô hình tuyến tính

hóa về một điểm hoạt động danh nghĩa. Hoạt động của mô hình tuyến tính có thể chấp nhận được khi điểm hoạt động đủ gần với điểm tuyến tính hóa [3], [5]-[8]. Để đảm bảo hiệu suất của hệ thống trong nhiều điều kiện làm việc, mô hình phi tuyến nên được xem xét trong thiết kế bộ điều khiển.

Trong kỹ thuật công nghiệp hiện đại, VSC đã trở thành chiến lược phổ biến nhất để điều khiển các hệ thống vận hành. Hơn nữa, các VSCs có nhiều kỹ thuật điều khiển tiên tiến sử dụng mô

hình động của hệ thống để mang lại sự ổn định, phản hồi nhanh và mạnh [3]-[5], nhưng tất cả chúng đều dựa trên mô hình tuyến tính hóa.

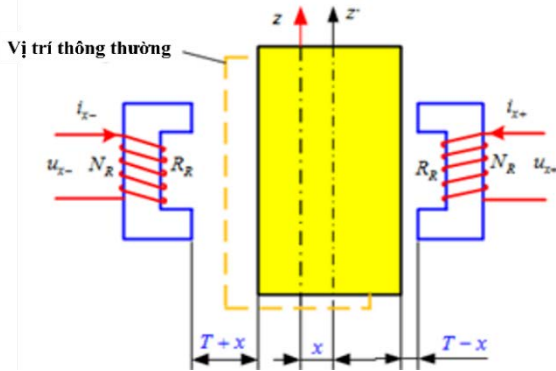
Trong bài báo này, mô hình đệm từ hai bậc tự do (DOF) được giới thiệu. Một mô hình cơ điện phi tuyến của hệ thống này cũng được bắt nguồn từ phương trình Lagrange bằng cách sử dụng phần mềm tính toán như Maple®. Phương pháp tiếp cận VSC được trình bày và một chiến lược điều khiển được áp dụng để điều chỉnh hệ thống phi tuyến.

Cuối cùng, kết quả mô phỏng số được trình bày để chứng minh tính linh động của hệ thống và hiệu suất của phương pháp điều khiển VSC.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình cơ điện

Trong phần này, mô hình AMB với một bậc tự do cơ học (hình 1) được giới thiệu để minh họa cách tiếp cận phương trình Lagrange cho một hệ thống cơ điện tử [9], [10].



Hình 1. AMB một bậc tự do.

Phân bố năng lượng của hệ thống này được thể hiện trong công thức (1)

$$\begin{cases} Ke_M = \frac{1}{2}m\dot{x}^2, \\ Ke_E = \frac{1}{2}L_{x+}\dot{q}_{x+}^2 + \frac{1}{2}L_{x-}\dot{q}_{x-}^2, \\ V_M = 0, \quad V_E = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: Ke_M , V_M là động năng và thế năng của phần cơ học; Ke_E và V_E là động năng và thế năng của phần điện. Điện tích trong mỗi cuộn dây,

q_{x+} , q_{x-} là tọa độ tổng quát của phần điện. x là độ dịch chuyển của rôto và L_{x+} , L_{x-} là độ tự cảm của cuộn dây.

Mối quan hệ của độ tự cảm của cuộn dây với khe hở không khí T và các thông số đặc trưng của cuộn dây được mô tả trong phương trình (2).

$$\begin{cases} L_{x+} = \mu_0 \frac{N^2 A}{2(T-x)} \\ L_{x-} = \mu_0 \frac{N^2 A}{2(T+x)} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: μ_0 , T , A , N , R , K lần lượt là độ từ thẩm của cuộn dây, khe hở không khí danh nghĩa, diện tích tiết diện, số lượng vòng dây, điện trở cuộn dây và độ nhạy của cảm biến.

Sự tiêu tán của tổn hao đồng trong các cuộn dây là:

$$P = \frac{1}{2}R\dot{q}_{x+}^2 + \frac{1}{2}R\dot{q}_{x-}^2 \quad (3)$$

Phương trình động học của mô hình AMB một bậc tự do có thể được suy ra từ phương trình Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} \right) - \frac{\partial L}{\partial s} + \frac{\partial P}{\partial \dot{s}} = Q \quad (4)$$

Trong đó s là vector tọa độ tổng quát.

$$s = [q_{x+}, q_{x-}, q_{y+}, q_{y-}, \dot{x}, x]^T, \quad (5)$$

Q là một vector của ngoại lực tổng quát (điện áp đầu vào điều khiển và lực cơ học)

$$Q = [u_{x+}, u_{x-}, u_{y+}, u_{y-}, F_x, 0]^T, \quad (6)$$

L là hàm Lagrangian

$$L = Ke_M + Ke_E - V_M - V_E \quad (7)$$

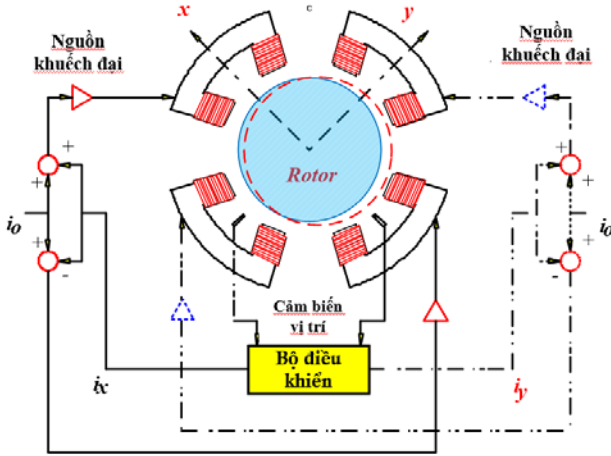
2.2. Hai bậc tự do của AMB

Nhóm áp dụng phương trình (4) và (7), phương trình chuyển động của hệ thống có thể được suy ra dưới dạng chuẩn của phương trình vi phân như sau:

$$K\dot{s} = J \quad (8)$$

Trong đó $s_{state} = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ \dot{x} \ x \ y \ y]^T$, $J = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ F_x \ 0 \ F_y \ 0]^T$ và $K \in \mathbf{R}^{8 \times 8}$ là ma trận quán tính và $J \in \mathbf{R}^{8 \times 1}$ là vector của hàm phi

tuyến. Các phương trình này được giải trong Jacobian bằng phần mềm Maple 17.



Hình 2. Mô hình hai bậc tự do của AMB.

2.3. Tham số của AMB hai bậc tự do

Các thông số của mô hình AMB hai bậc tự do như bảng sau:

Bảng 1. Thông số Rotor.

Parameters	Symbol	Value	Unit
Mass	m	5.13	Kg
Bias current	i_0	0.4	A
Resistor of coils	R	0.252	Ω
Air permeability	μ_0	$4\pi e^{-3}$	H/m
Coil resistance	N	150	m

3. Thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển

3.1. Thiết kế mặt trượt

Mô hình AMB hai bậc tự do được điều khiển thông qua cách tiếp cận VSC. Loại mô hình đang được xem xét là bất biến theo thời gian tuyến tính và rời rạc (LTI), phương trình (8) và dạng không gian trạng thái được cho bởi:

$$\dot{s}_{state} = A s_{state} + B u + D f \quad (9)$$

Trong đó $A \in R^{8 \times 8}$, $B \in R^{8 \times 4}$ là ma trận hệ thống và ma trận nhiễu, $D \in R^{8 \times 4}$ với $f = [\sin 5\pi t + \cos 5 t]$. Với ma trận \tilde{B} cơ bản của

ma trận chuyển vị B^T , ví dụ \tilde{B} là một phần bù trực giao của ma trận B . Xem xét các bất đẳng thức ma trận tuyến tính (LMIs) sau:

$$X > 0, \tilde{B}^T (A X + X A^T) \tilde{B} < 0 \quad (10)$$

Mặt trượt tuyến tính σ được cho bởi công thức sau:

$$\sigma = S s_{state} = B^T X^{-1} s_{state} = 0 \quad (11)$$

Và u điều khiển được chọn như sau:

$$u = -(SB)^{-1} \left(\frac{k_1}{2} + k_2 \|x\| + k_3 h \right) \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \varepsilon} \quad (12)$$

Trong đó ε là đại lượng bất kỳ dương vô hướng và $k_1 > 0$, $k_2 > \|SA\|$, $k_3 > \|SD\|$

Định lý 1. Giả sử rằng LMI (10) có nghiệm và mặt trượt tuyến tính được cho bởi phương trình (11), và xem xét hệ thống (9) với u điều khiển (12). Sau đó, động lực học của hệ thống giảm tới giới hạn ở bề mặt trượt $\sigma = 0$ là tiệm cận ổn định. Và mọi quỹ đạo nghiệm đều hướng về bề mặt trượt tuyến tính và vẫn ở trên bề mặt đó mãi mãi.

Chứng minh. Xác định ma trận biến đổi và vector liên kết v như sau:

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ B^T X^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}^T \\ S \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = M s_{state},$$

Trong đó $v_1 \in R^{2 \times 1}$, $v_2 \in R^{6 \times 1}$ và $v_2 = \sigma$. Ta có thể thấy rằng:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} B (SB)^{-1} \\ \end{bmatrix}.$$

Bằng cách chuyển đổi trên, có được:

$$\dot{v} = \hat{A} v + \hat{B} u \quad (13)$$

Trong đó:

$$\hat{A} = M A M^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} \tilde{B}^T A X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T A B (SB)^{-1} \\ B^T X^{-1} A X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} B^T X^{-1} A B (SB)^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\hat{B} = M B = \begin{bmatrix} 0 \\ B^T X^{-1} B \end{bmatrix}$$

Hệ thống (13) ở chế độ trượt $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ được điều chỉnh bởi hệ động lực sau:

$$\dot{v}_1 = \tilde{B}^T A X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} v_1 \quad (14)$$

Bổ đề sau đây được sử dụng:

Bổ đề 1. Xem xét hệ thống có phương trình như sau [11].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (15)$$

Hệ thống (15) được cho là ổn định bậc hai nếu tồn tại một ma trận đối xứng xác định dương sao cho:

$$AP + PA^T < 0 \quad (16)$$

Theo bổ đề 1, ta có thể thấy rằng phương trình vi phân bậc một (14) là ổn định bậc hai nếu tồn tại một ma trận xác định dương P sao cho:

$$\tilde{B}^T A X \tilde{B} (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} P + P (\tilde{B}^T X \tilde{B})^{-1} \tilde{B}^T X A^T \tilde{B} < 0 \quad (17)$$

Chọn $P = \tilde{B}^T X \tilde{B}$ và thay nó vào bất đẳng thức trên:

$$\tilde{B}^T (AX + XA^T) \tilde{B} < 0 \quad (18)$$

Rõ ràng, bất đẳng thức (18) tương đương với (10). Sử dụng mặt trượt tuyến tính, ta có thể thu được B. Xét hàm Lyapunov có dạng như sau:

$$V = \sigma^T \sigma$$

$$\dot{V} = 2\sigma^T \dot{\sigma}$$

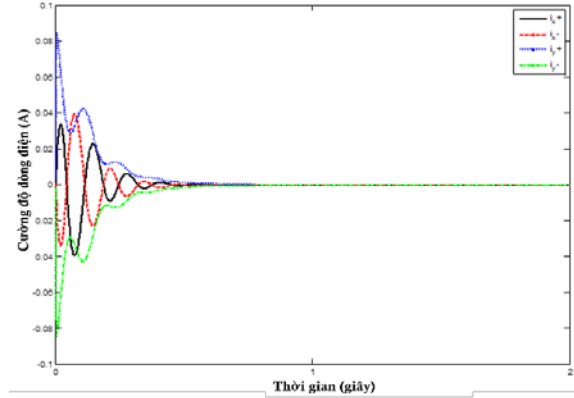
$$\Rightarrow \dot{V} = 2\sigma^T \dot{\sigma} = 2\sigma^T S \dot{x} \\ = 2\sigma^T S (Ax + Bu + Df)$$

$$\begin{aligned} &\leq 2\|\sigma\| \|SA\| \|x\| + 2\sigma^T S (Bu + Df) \\ &\leq 2\|\sigma\| \|SA\| \|x\| + 2\|\sigma\| \|SD\| h + 2\sigma^T S B u \\ &= 2\|\sigma\| \|SA\| \|x\| + 2\|\sigma\| \|SD\| h \\ &\quad - 2\sigma^T S B (S B)^{-1} \left(\frac{k_1}{2} + k_2 \|x\| \right. \\ &\quad \quad \left. + k_3 h \right) \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \varepsilon} \\ &= 2\|\sigma\| \|SA\| \|x\| + 2\|\sigma\| \|SD\| h \\ &\quad - 2\sigma^T \left(\frac{k_1}{2} + k_2 \|x\| + k_3 h \right) \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \varepsilon} \\ &= -k_1 \|\sigma\| < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

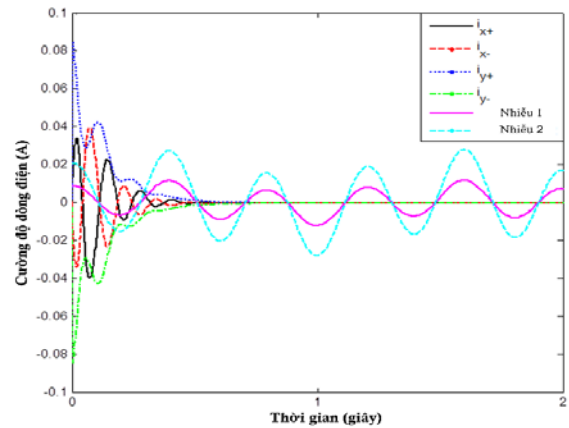
Điều này đã được chứng minh.

3.2. Mô phỏng

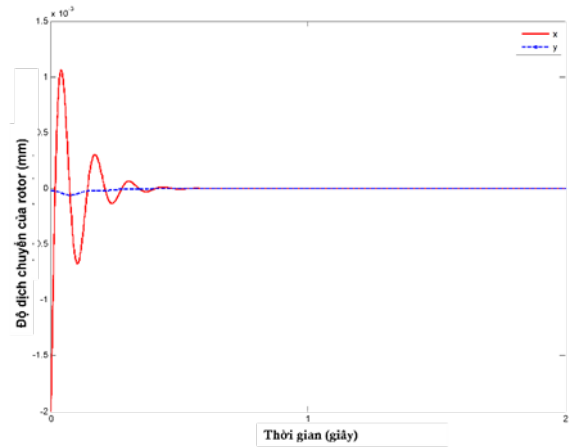
Trong phần này, các biến đổi động năng của hệ thống và hiệu suất điều khiển được thảo luận trong kết quả mô phỏng. Xét hệ thống (9) với mặt trượt (11) và bộ điều khiển u (12).



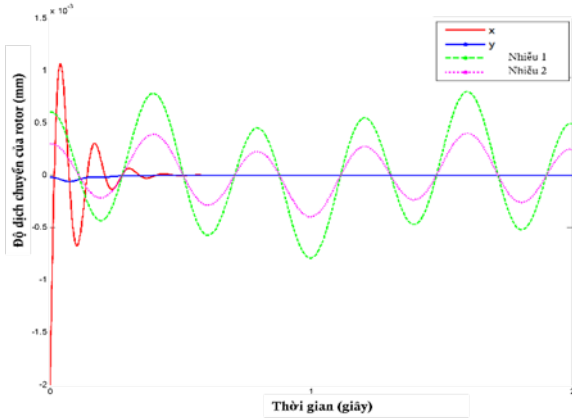
Hình 3. Đáp ứng thời gian của dòng điện trên từng cuộn dây khi chưa có nhiễu tác động.



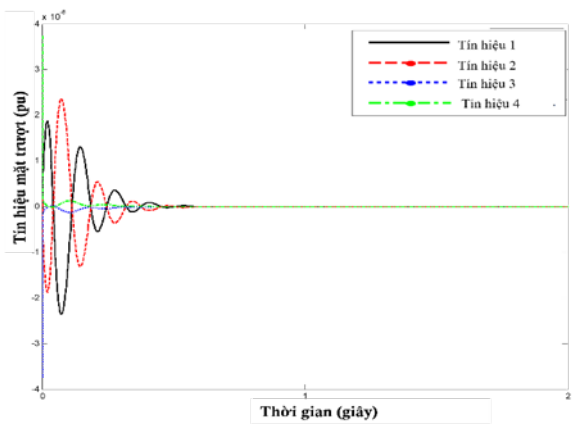
Hình 4. Đáp ứng thời gian của dòng điện trên từng cuộn dây với ảnh hưởng của nhiễu.



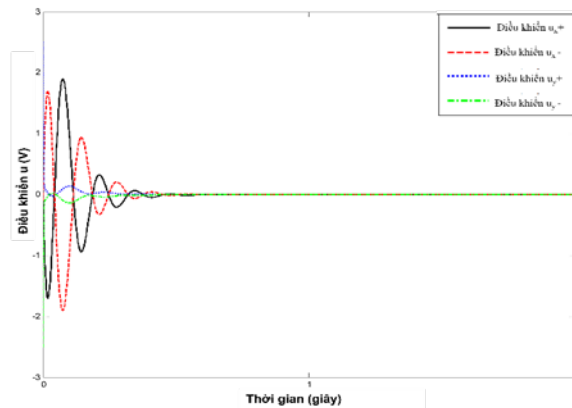
Hình 5. Đáp ứng thời gian với dịch chuyển của rotor khi không có nhiễu.



Hình 6. Đáp ứng thời gian với dịch chuyển của rotor với ảnh hưởng của nhiễu.



Hình 7. Mặt trượt của từng cuộn dây.



Hình 8. Điều khiển u cho từng cuộn dây.

Hình 3 và 4 biểu diễn tín hiệu cường độ dòng điện của 04 cuộn dây trong AMB hai cực tự do có nhiễu và không có nhiễu tác động, đáp ứng tiến về 0. Hình 5 và 6 biểu diễn độ dịch chuyển roto theo phương x và phương y, độ lệch này vẫn tiến về 0 trong cả hai trường hợp có nhiễu và không có nhiễu tác động.

Hình 7 biểu diễn mặt trượt của 04 cuộn dây đáp ứng tiến về 0 và ổn định tới vô cùng. Hình 8 biểu diễn tín hiệu u điều khiển tác động vào 04 cuộn dây cũng tiến về 0 và ổn định đến vô cùng.

Từ hình 3 đến hình 8, có thể dễ dàng nhận thấy rằng bộ điều khiển đề xuất VSC có hiệu suất tốt, đáp ứng nhanh và hiệu quả trong việc xử lý nhiễu.

Trong hình 4 đến hình 6, nhiễu 1 và nhiễu 2 tác động hướng đến các dòng i_{x+} , i_{y-} và các dịch chuyển x, y, nhưng tất cả chúng vẫn ổn định.

Đây là lợi thế của bộ điều khiển VSC, có thể loại bỏ tác động của nhiễu. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đảm bảo hệ thống có thể ổn định trong thời gian vô hạn.

4. Kết luận

Trong bài báo này, mô hình hệ thống phi tuyến và hệ thống đệm từ hai bậc tự do đã được giới thiệu. Hệ thống có cấu trúc của một vòng bi từ (đệm từ) hai bậc tự do nhận được bằng phương trình Lagrange. Trong mô hình, dòng điện trong mỗi cuộn dây được coi như một biến trạng thái và đầu vào điều khiển là điện áp đặt vào mỗi cuộn dây, cách tiếp cận này mang lại nhiều ưu điểm hơn so với cách tiếp cận điều khiển là dòng điện. Điều khiển bằng điện áp là thực tế hơn và cũng cho phép ta tổng hợp các bộ điều khiển VSC với đầu vào là điện áp. Biến đổi động năng của hệ thống đệm từ hai bậc tự do và hiệu suất của bộ điều khiển đã cho thấy rằng bộ điều khiển VSC có thể đảm bảo độ cứng vững không bị lệch trục ngay cả khi có tác động của nhiễu.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. K. Chih, C. T. Dung; “Nonlinear Modeling and Control of Active Magnetic Bearings for A Flywheel Energy Storage System”. IEEE International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2014; 1(6):284-287.
- [2] Y.W. Tsai, P. V. Duc, V. A. Duong, N. C. Trang, and C. T. Dung; “Model Predictive Control Nonlinear System of Active Magnetic Bearings

- for a Flywheel Energy Storage System”. In AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences; vol.371. Switzerland: Springer International Publishing. 2016; pp.541-551. DOI: 10.1007/978-3-319-27247-4_46.
- [3] F. -J. Lin, S. -Y. Chen, M. -S. Huang; “Intelligent double integral sliding-mode control for five-degree-of-freedom active magnetic bearing system”. IET Control Theory and Applications. 2011; 5(11):1287 – 1303. DOI: 10.1049/iet-cta.2010.0237.
- [4] D. Kairous, R. Wamkeue, B. Belmadani; “Sliding . Mode Control of DFIG based Variable Speed WECS with Flywheel Energy Storage”. In Proc. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010; 6-8 September, 2010; Rome, Italy. USA: IEEE; 2010. pp.1-6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607933
- [5] S. K. Min; “Variable Structure Control with disturbance observer for an active magnetic bearing system”. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. 2004; 55(6):408-414.
- [6] P. V. S. Sobhan, G. V. N. Kumar, J. Amarnath, M. Subbarao; “Stabilization of Active Magnetic Bearing System Using Single Neuron PID Controller”. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014; 9(7):1149-1155.
- [7] P. V. S. Sobhan, G. V. N. Kumar, J. Amarnath, M. Subbarao; “Rotor levitation and Autocentering by Active Magnetic Bearings using Fuzzylogic Controller”. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2011; 32(2):123-127.
- [8] G. Yang, J. M. Zhang; “PD Control Strategy Design and Simulation of Magnetic Bearing with Single Freedom of Degree”. In Proc. The 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013); 22-23 March, 2013; Hangzhou, China. Atlantis Press. 2013; 34:2922-2925. DOI: 10.2991/iccsee.2013.729
- [9] S. Gerhard, G. H. M. Eric; “Magnetic Bearings-Theory, Design and Application to Rotating Machinery”. Berlin: Springer; 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-00497-1.
- [10] L. Xie, M. Fu, C. E. de Souza; “ H_{∞} control and quadratic stabilization of systems with parameter uncertainty via output feedback”. IEEE Transactions on Automatic Control. 1992; 37(8):1253–1256.
- [11] G. Genta; “Dynamics of Rotating Systems”. NY, USA: Springer; 2005. DOI: 10.1007/0-387-28687-X.

Ngày nhận bài: 07/09/2021
Ngày chuyển phản biện: 10/09/2021
Ngày hoàn thành sửa bài: 01/10/2021
Ngày chấp nhận đăng: 08/10/2021