

# Điều khiển ổ đỡ từ chủ động bằng phương pháp backstepping silding mode control

Control Active Magnetic Bearing with Backstepping Silding Mode Control

Giang Hồng Quân\*, Nguyễn Danh Huy, Nguyễn Tùng Lâm, Giang Hồng Bắc

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 01-6-2017; chấp nhận đăng: 25-01-2018

## Tóm tắt

Như đã biết, đối với ổ đỡ từ chủ động thì lực từ tỉ lệ với bình phương dòng điện và tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách khe hở giữa stator và rotor. Để thiết kế được các thuật toán điều khiển, thì ta phải tuyến tính hóa mối quan hệ trên tại điểm làm việc. Điều này nảy sinh vấn đề là khi đó thuật toán điều khiển chỉ đảm bảo chất lượng tốt, đúng như thiết kế chỉ tại điểm làm việc đó. Bài báo đề xuất một giải pháp giúp thực hiện thiết kế bộ điều khiển mà không cần phải thực hiện tuyến tính hóa tại điểm làm việc sử dụng thuật toán backstepping kết hợp với bộ điều khiển trượt. Các kết quả đạt được đã được kiểm nghiệm bằng mô phỏng Matlab/Simulink.

Từ khóa: Ổ đỡ từ chủ động, điều khiển cuộn chiếu, điều khiển trượt, bộ quan sát

## Abstract

In active magnetic bearing systems, the magnetic force is proportional to the square of the current and inversely proportional to the square of the distance gap between the stator and rotor. In order to design the control algorithm, we must linearize this relationship. Control algorithms ensure good quality, exactly as designed only at the point of operation. This paper proposes a solution designed to help implement the controller without linearization. The proposed algorithm is combined of backstepping and sliding mode control. In addition, an observer is integrated to estimate load variation. The obtained result was verified with simulation Matlab/Simulink. Simulation results prove the effectiveness of the control structure.

Keywords: Magnetic bearing, Backstepping control, Sliding mode control, Observer

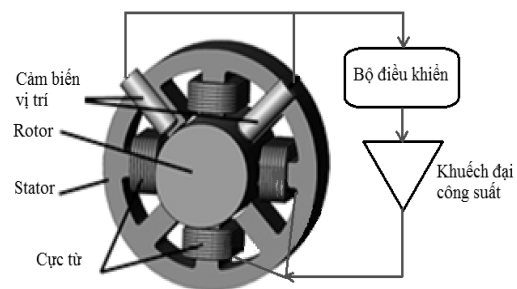
## Ký hiệu Đơn vị Ý nghĩa

$F, F_1, F_2$		Lực từ
$F_d$		Nhiều lực
$i, i_1, i_2$	A	Dòng điện trên các cuộn dây
$x, x_1, x_2$		Vị trí của rotor
$L_s$	H	Điện cảm của cuộn dây Stator
$R$	Om	Điện trở cuộn dây stator
$m$	Kg	Khối lượng rotor
$\Phi_1, \Phi_2$	Wb	Từ thông do các cuộn dây sinh ra
$\mu_r, \mu_0$		Độ từ thẩm của sắt từ, không khí
$n$		Số vòng dây của cuộn dây stator
$A$		Diện tích mạch từ
$g$		Khoảng cách khe hở mạch từ

## 1. Giới thiệu

Cấu trúc cơ bản của một ổ đỡ từ tích cực bao gồm : Nam châm điện (cực từ), Rotor, cảm biến đo khoảng cách, khuếch đại công suất và bộ điều khiển[1]. Để

giảm tổn hao do dòng xoáy, rotor và stator thường được làm bằng các lá thép kỹ thuật điện ghép lại [2]. Cảm biến vị trí có chức năng đo độ dịch chuyển của rotor trong lòng stator. Phải sử dụng 2 cảm biến để có thể có thông tin đầy đủ theo cả trục x và trục y. Bộ điều khiển nhận thông tin vị trí của rotor từ các cảm biến vị trí từ đó điều chỉnh điện áp cấp cho các cuộn dây thông qua đó thay đổi lực từ và đưa rotor đến vị trí mong muốn.



Hình 1. Hình dạng cơ bản của ổ đỡ từ chủ động

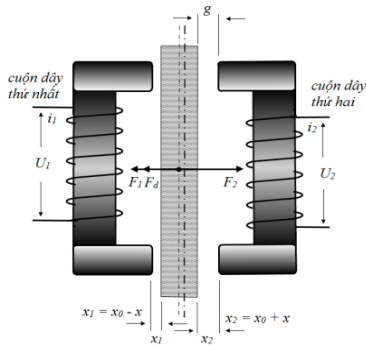
\* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 947.520.151

Email: quan.gianghong@hust.edu.vn

Để thiết kế được bộ điều khiển, cần có mô hình mô tả toán học ở đỡ từ chủ động. Các dạng mô hình toán học được sử dụng để điều khiển ở đỡ từ chủ động đó là: Dạng phương trình vi tích phân, dạng hàm truyền đạt và dạng mô hình trạng thái[3]. Dạng phương trình vi tích phân là dạng đầy đủ nhất, tuy nhiên việc thiết kế bộ điều khiển trực tiếp từ dạng này khó khăn vì mối quan hệ phi tuyến giữa các đại lượng trong mô hình toán học. Để có 2 dạng mô hình trạng thái và hàm truyền đạt, ta phải tuyến tính hóa tại điểm làm việc từ các phương trình vi tích phân và đại lượng được tuyến tính hóa rõ ràng nhất đấy là lực từ. Về cơ bản lực từ là đại lượng tỉ lệ thuận với bình phương dòng điện và tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách khe hở sau khi tuyến tính hóa tại điểm làm việc từ tỉ lệ thuận với dòng điện. Điều này đã nảy sinh vấn đề là khi thiết kế các bộ điều khiển mà dựa trên mô hình tuyến tính hóa thì hệ chỉ hoạt động chính xác tại điểm làm việc.

**2. Mô hình toán học ở đỡ từ chủ động**

Các dạng mô hình toán học được sử dụng để điều khiển ở đỡ từ chủ động thường thấy đó là: Dạng phương trình vi tích phân, dạng hàm truyền đạt và dạng mô hình trạng thái. Tuy nhiên ở đây sẽ xem xét mô hình ở đỡ từ dưới dạng phương trình vi tích phân, vì đây là dạng thể hiện đầy đủ nhất mối quan hệ phi tuyến giữa lực từ và khoảng cách khe hở. Xét ở đỡ bốn cực có dạng nguyên lý đơn giản như hình 2.



**Hình 2.** Phân tích lực cho một cặp cực từ Stator

Khi mật độ từ thông trong lõi sắt từ và trong mật độ không khí là như nhau, độ từ thẩm của sắt từ là rất lớn  $\mu_r \gg 1$  khi ấy lực từ do một cuộn dây sinh ra sẽ được tính theo công thức sau [1][6]:

$$F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 A} = \frac{1}{\mu_0 A} \left( \mu_0 N A \frac{i}{2g} \right)^2 = \frac{K}{4} \left( \frac{i}{g} \right)^2 \quad (1)$$

Lực từ tỉ lệ thuận với bình phương dòng điện và tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách khe hở không khí.

Mô tả các phương trình toán học mô tả ở đỡ từ chủ động được xây dựng từ định luật Newton  $m\ddot{x} = F_1 - F_2 + F_d$  kết hợp với phương trình điện từ của

cuộn dây:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{K}{4m} \left( \frac{i_1}{x_1} \right)^2 - \frac{K}{4m} \left( \frac{i_2}{x_2} \right)^2 + \frac{1}{m} F_d \\ u_1 = Ri_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + \frac{K}{2} \frac{d}{dt} \left( \frac{i_1}{x_1} \right) \\ u_2 = Ri_2 + L_s \frac{di_2}{dt} + \frac{K}{2} \frac{d}{dt} \left( \frac{i_2}{x_2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó  $x_1, i_1$  và  $u_1$  lần lượt là vị trí, dòng điện và điện áp của cuộn dây thứ nhất (nằm phía dưới) của hệ thống AMB, tương ứng  $x_2, i_2$  và  $u_2$  là vị trí, dòng điện và điện áp của cuộn dây thứ hai (nằm phía trên).

Như vậy với một cặp cực từ sẽ có tất cả là 3 phương trình mô tả mô hình toán học. Nếu xét tới mô hình ở đỡ có 2 cặp cực từ sẽ có tất cả là 6 phương trình mô tả toán học cho ở đỡ. Đây là các phương trình vi tích phân - dạng đầy đủ nhất.

Giả thiết  $(x_0, i_0, u_0)$  đại diện cho các trạng thái danh định của hệ thống, khi đó:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 - x & x_2 &= x_0 + x \\ i_1 &= i_0 - i & i_2 &= i_0 + i \\ u_1 &= u_0 - u & u_2 &= u_0 + u \end{aligned}$$

Mô hình toán học của ở đỡ tích cực sẽ được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = \frac{K}{4m} \left( \frac{i_1}{x_0 - x} \right)^2 - \frac{K}{4m} \left( \frac{i_2}{x_0 + x} \right)^2 + \frac{F_d}{m} \\ \dot{i}_1 = \frac{2(x_0 - x)}{2L_s(x_0 - x) + K} \left[ -Ri_1 - \frac{Kvi_1}{2(x_0 - x)^2} + u_1 \right] \\ \dot{i}_2 = \frac{2(x_0 + x)}{2L_s(x_0 + x) + K} \left[ -Ri_2 + \frac{Kvi_2}{2(x_0 + x)^2} + u_2 \right] \end{cases} \quad (3)$$

**3. Điều khiển backteping sliding mode control**

Phương pháp pháp tổng hợp điều khiển hệ phi tuyến trên cơ sở lý thuyết điều khiển hệ thống có cấu trúc thay đổi, đặc biệt là điều khiển trong chế độ trượt được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm và đặc biệt có ưu điểm ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu và các thành phần không xác định.

Hệ phi tuyến có tính kết tầng có thể ứng dụng phương pháp tổng hợp Backstepping. Khi kết hợp Backstepping với điều khiển trong chế độ trượt cho phép dễ dàng tổng hợp cấu trúc mặt trượt.

Xét hệ phi tuyến dạng của hệ truyền ngược

chặt[5]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = F_1(x_1) + G_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = F_2(x_1, x_2) + G_2(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + G_n(x_1, x_2, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó  $x_1, x_2, \dots, x_n$  biểu diễn các trạng thái của hệ thống và  $F_i(\underline{x}), G_i(\underline{x})$  với  $i = 1, 2, \dots, n-1$  là các hàm tuyến tính,  $F_n(\underline{x}) \& G_n(\underline{x})$  là các hàm phi tuyến.

Mục tiêu của bộ điều khiển là điều khiển  $x_1$  bám theo  $x_{1d}, x_2$  bám theo  $x_{2d}, \dots, x_n$  bám theo  $x_{nd}$ . Các bước để thiết kế bộ điều khiển trượt backstepping như sau[7][8]:

*Bước 1: Điều khiển để  $x_1$  bám theo  $x_{1d}$ :*

Định nghĩa sai lệch :  $e_1 = x_1 - x_{1d}$ . Đạo hàm của  $e_1$  được xác định bởi:

$$\dot{e}_1 = F_1(x_1) + G_1(x_1)x_2 - \dot{x}_{1d} \quad (5)$$

Để nhận thấy nếu điều khiển được  $x_2$  bám theo  $x_{2d}$ :

$$x_{2d} = G_1^{-1}(-F_1 + \dot{x}_{1d} - K_1 e_1) \quad (K_1 > 0) \quad (6)$$

Thì khi đó ta thu được  $\dot{e}_1 = -K_1 e_1$ , hay  $e_1$  tiến tới 0 (vì  $e_1$  và đạo hàm của nó  $\dot{e}_1$  luôn trái dấu).

*Bước 2: Điều khiển để  $x_2$  bám theo  $x_{2d}$ :*

Định nghĩa sai lệch  $e_2 = x_2 - x_{2d}$  Đạo hàm của  $e_2$  được xác định bởi:

$$\dot{e}_2 = F_2(x_2) + G_2(x_2)x_3 - \dot{x}_{2d} \quad (7)$$

Để nhận thấy nếu điều khiển được  $x_3$  bám theo  $x_{3d}$ :

$$x_{3d} = G_2^{-1}(-F_2 + \dot{x}_{2d} - K_2 e_2) \quad (8)$$

Thì khi đó ta thu được  $\dot{e}_2 = -K_2 e_2$ , hay  $e_2$  tiến tới 0.

*Bước ...*

*Bước n-1: Điều khiển để  $x_{n-1}$  bám theo  $x_{(n-1)d}$ :*

Tương tự như vậy nếu  $x_{n-1}$  bám được theo

$$x_{nd} = G_{n-1}^{-1}(-F_{n-1} + \dot{x}_{(n-1)d} - K_{n-1} e_{n-1}) \quad (9)$$

Thì khi ấy  $e_{n-1}$  tiến tới 0

*Bước n: Điều khiển để  $x_n$  bám theo  $x_{nd}$ :*

Tại bước này ta sử dụng phương pháp SMC để đưa  $x_n$  bám theo  $x_{nd}$  trong khoảng thời gian hữu hạn. Chọn mặt trượt  $s = x_n - x_{nd}$  Đạo hàm của  $s$  được mô tả bởi:

$$\dot{s} = F_n + G_n u - \dot{x}_{nd} \quad (10)$$

Chọn tín hiệu điều khiển dạng  $u = u_e + u_{sw}$

Với:

$$\begin{cases} u_e = G_n^{-1}(-F_n + \dot{x}_{nd} - k_n s) \\ u_{sw} = -k \cdot \text{sign}(s) \end{cases} \quad (11)$$

Khi đó với  $k > 0$  ta có  $\frac{ds}{dt} \cdot s < 0$

Vậy  $x_n$  sẽ tiến tới  $x_{nd}$ . Khi đó tất cả sai lệch  $e_1, e_2, \dots, e_{n-1}$  tiến về 0 khi  $t \rightarrow \infty$  đồng thời các tín hiệu  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$  đều sẽ tiến về tín hiệu đặt. Hệ thống sẽ đạt được trạng thái ổn định.

#### 4. Điều khiển tầng dựa trên vòng điều khiển trong là điều khiển từ thông

Dựa trên lý thuyết về điều khiển backteping sliding mode control, ta sẽ áp dụng lần lượt các bước để xây dựng bộ điều khiển backteping sliding mode control cho ổ từ tích cực có mô hình (3):

*Bước 1:* Đặt  $e_1 = x - x_d$

Chọn  $v_d = \dot{x}_d - k_1 e_1$  ( $k_1 > 0$ )

Khi đó  $\dot{e}_1 = -k_1 e_1$  thỏa mãn  $e_1 \rightarrow 0$

*Bước 2:* Đặt  $e_2 = v - v_d$

Rõ ràng, việc xác định hàm  $v$  qua hai biến chưa biết  $i_1$  và  $i_2$  theo (3) là khó khăn, do đó cần thực hiện một bước chuyển đổi.

Xét thấy, lực điều khiển cuối cùng tác động lên trục rotor bởi hai cuộn dây đối nhau được biểu diễn như sau:  $F_r = F_1 - F_2 + F_d$

Trong trường hợp, nếu để tồn tại song song cùng lúc hai lực  $F_1, F_2$  tương ứng với tồn tại hai dòng điện  $i_1, i_2$  trong hai cuộn dây, thì hệ thống vừa tổn điện năng không cần thiết, lại gây khó khăn trong việc tìm hàm  $i_1, i_2$  điều khiển hàm  $v$  theo hàm  $v_d$ . Như vậy, để kinh tế trong quá trình vận hành, chiến lược điều khiển được áp dụng là điều khiển luân phiên hai dòng điện theo kiểu đóng ngắt.

*TH1:* Trục lệch về phía cuộn dây số 2 tức  $x < 0$ , lúc này ngắt  $i_2$  ( $i_2 = 0$ ) ta có:

$$\dot{e}_2 = \frac{Ai_1^2}{(x_0 - x)^2} + \frac{F_d}{m} - \dot{v}_d \quad (12)$$

Chọn

$$i_{1d} = \sqrt{\frac{-k_2 e_2 - \frac{F_d}{m} + \dot{v}_d}{A}} = (x - x_0) \sqrt{\frac{-k_2 e_2 - \frac{F_d}{m} + \dot{v}_d}{A}} \quad (13)$$

Khi đó  $\dot{e}_2 = -k_2 e_2$  hay  $e_2 \rightarrow 0$

TH2. Trục lệch về phía cuộn dây số 1,  $x \geq 0$   
 $\Rightarrow$  cắt  $i_1, i_1 = 0$ . Tương tự trường hợp trên ta cũng có tín hiệu điều khiển:

$$i_{2d} = (x_0 + x) \sqrt{\frac{k_5 e_2 + \frac{F_d}{m} - \dot{v}_d}{A}} \quad (14)$$

**Bước 3:**

TH1. Chọn mặt trượt:  $s = i_1 - i_{1d}$  ta sẽ có:

$$\dot{s} = \frac{2(x_0 - x)}{2L_s(x_0 - x) + K} \left[ -Ri_1 - \frac{Kvi_1}{2(x_0 - x)^2} + u_1 \right] - \dot{i}_{1d}$$

Tín hiệu điều khiển theo (11) sẽ là  $u_1 = u_{1e} + u_{1s}$  với:

$$\begin{cases} u_{1e} = (\dot{i}_{1d} - k_3 s) \frac{2L_s(x_0 - x) + K}{2(x_0 - x)} + Ri_1 + \frac{Kvi_1}{2(x_0 - x)^2} \\ u_{1s} = -k_4 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (15)$$

Khi đó  $\dot{s} = -k_3 s$  hay  $\frac{ds}{dt} \cdot s < 0$  nên  $s \rightarrow 0$

Vậy ta đã tìm được bộ điều khiển để đưa  $i_1 \rightarrow i_{1d}$

$\Rightarrow v \rightarrow v_d \Rightarrow x \rightarrow x_d$

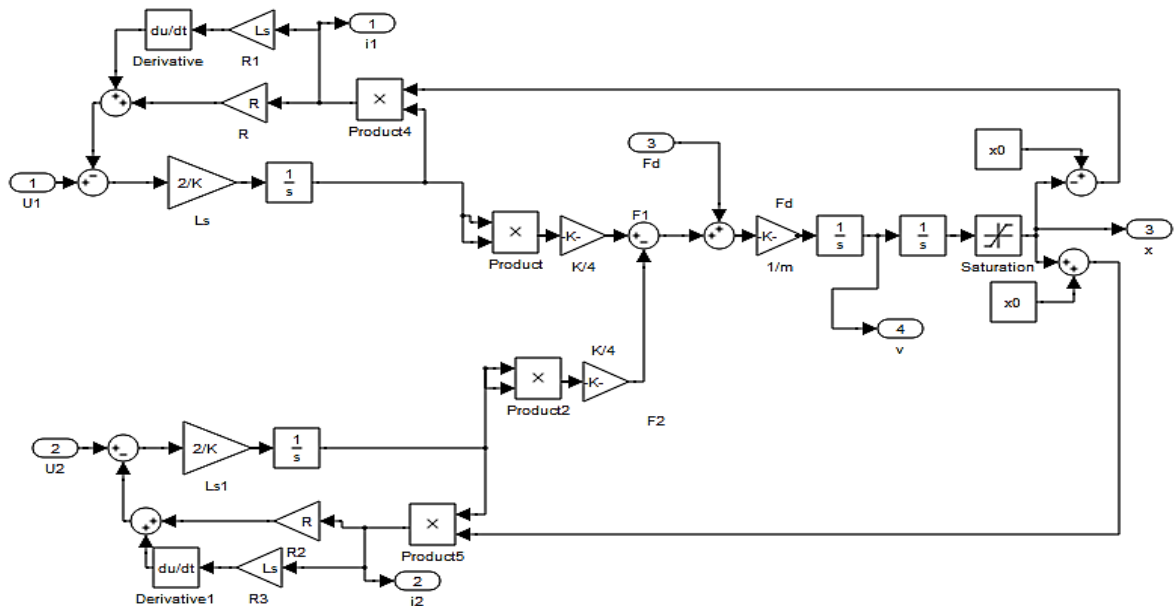
TH2. Tương tự trường hợp trên ta cũng có tín hiệu điều khiển:

$$\begin{cases} u_{2e} = \frac{-k_6 s + \dot{i}_{2d}}{2L_s(x_0 + x) + K} + Ri_2 + \frac{Kvi_2}{2(x_0 + x)^2} \\ u_{2s} = -k_7 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (16)$$

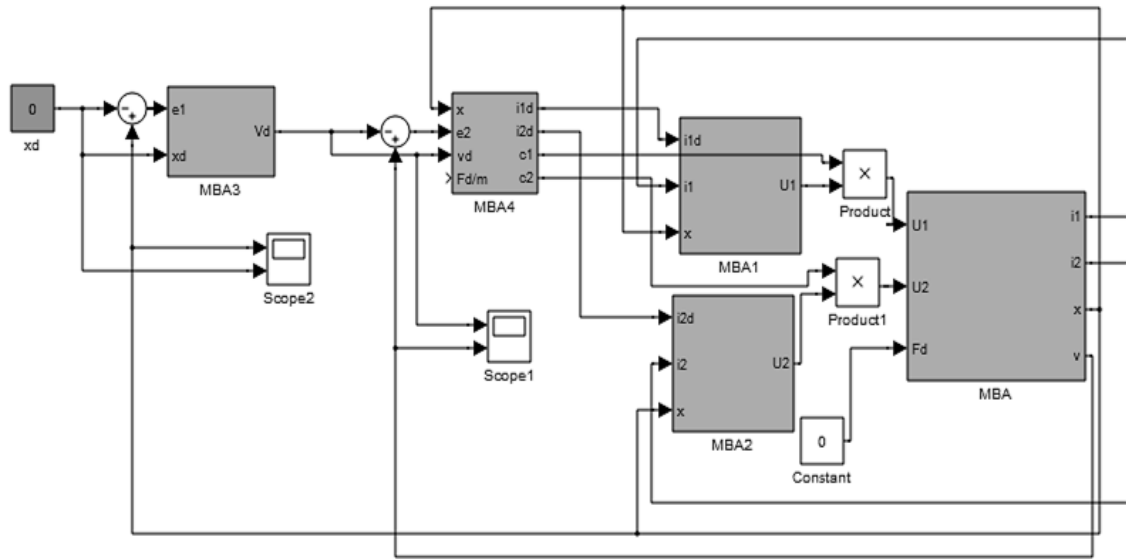
Vậy ta đã tìm được bộ điều khiển để đưa  $i_2 \rightarrow i_{2d}$

$\Rightarrow v \rightarrow v_d \Rightarrow x \rightarrow x_d$

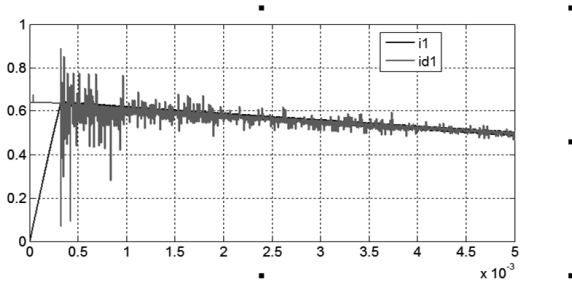
Thông số	Đơn vị
Khe hở không khí danh định (g)	0.001m
Số vòng dây trong mỗi cuộn (n)	400
Điện trở cuộn dây (R)	2Ohms
Diện tích mặt cắt ngang khe hở không khí (A)	0.000625m <sup>2</sup>
Khối lượng rotor (m)	11 kg
Vị trí ban đầu của rotor (x)	-0.0011 m
Độ từ thẩm khe hở không khí ( $\mu_0$ )	1.256*10 <sup>-6</sup>
Nhiều (N)	110 N



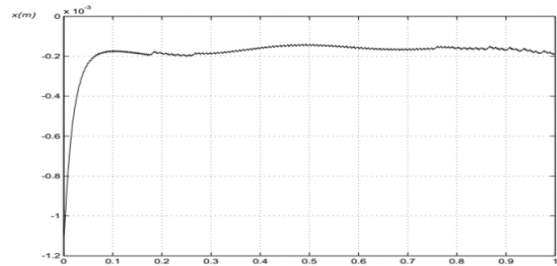
Hình 3. Sơ đồ simulink mô phỏng ổ đỡ từ chủ động



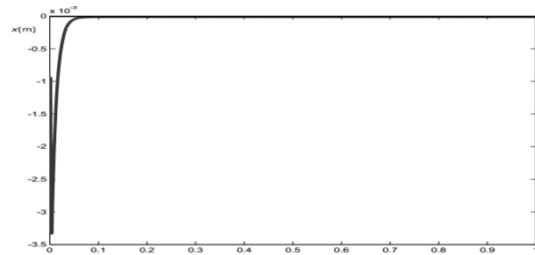
**Hình 4.** Sơ đồ simulink mô phỏng ổ đỡ từ chủ động với bộ điều khiển là backteping sliding mode control



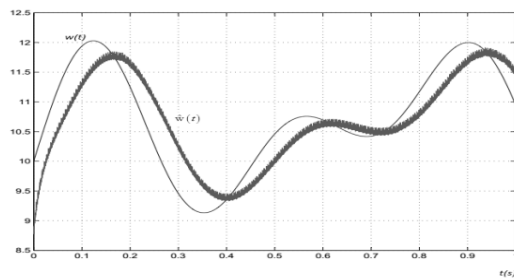
**Hình 5.** Quá trình bám theo mặt trượt của dòng điện Id1.



**Hình 8.** Kết quả mô phỏng với trường hợp nhiễu không xác định



**Hình 6.** Kết quả mô phỏng với trường hợp nhiễu xác định



**Hình 7.** Nhiễu quan sát được

Kết quả cho thấy hệ có khả năng thực hiện của thuật toán trong các trường hợp có nhiễu là hằng số, nhiễu không xác định.

### Kết luận

Bài báo đã đề xuất một giải pháp giúp thực hiện thiết kế bộ điều khiển mà không cần phải thực hiện tuyến tính hóa tại điểm làm việc. Khi đó bộ điều khiển đảm bảo hoạt động bền vững, đồng thời mở ra khả năng thiết kế các thuật toán tự nâng đơn giản có thể tích hợp cùng các thuật toán điều khiển chính để điều khiển ổ đỡ từ chủ động. Kết quả được mô phỏng trên simulink với giúp khẳng định khả năng thực hiện của thuật toán.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2016-PC-182.

Nhóm thực hiện đề tài xin chân thành cảm ơn Viện Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa và Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội đã tạo điều kiện giúp đỡ nhóm tác giả trong quá trình nghiên cứu.

**Tài liệu tham khảo**

- [1]. Gerhard Schweitzer · Eric H. Maslen: Magnetic Bearings Theory, Design, and Application to Rotating Machinery ISBN 978-3-642-00496-4 Springer – 2009.
- [2]. René Larsonneur: Design and control of active magnetic bearing systems for high speed rotation Offsetdruckerei AG Zurich 1990.
- [3]. Richard A. Rarick: Control of an active magnetic bearing with and without position sensing. Submitted in partial fulfillment of requirements for the degree Master of science in electrical engineering at the Cleveland State University August, 2007.
- [4]. B.Polaj zer J.Ritonja G. Stumberger: Decentralized PI/PD position control for active magnetic bearings, Electrical Engineering DOI 10.1007/s00202-005 - 0315-1 (2005).
- [5]. Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, Hán Thành Trung, Lý thuyết điều khiển phi tuyến, Nhà Xuất Bản Khoa Học Và Kỹ Thuật Hà Nội, 2006.
- [6]. Nguyen Thi Thanh Binh, “Cải thiện chất lượng điều khiển các ổ đỡ từ”, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên, 2013.
- [7]. Nitesh Meena, and Bharat Bhushan Sharma, Backstepping Algorithm with Sliding Mode Control for Input-Affine Nonlinear Systems, 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET'2014), May 30-31, 2014 London (UK).
- [8]. K.D. Do, J. Pan, Nonlinear control of an active heave compensation system, School of Mechanical Engineering, The University of Western Australia-13 November 2007.