

Điều khiển phi tuyến trượt bậc phân số sử dụng bộ quan sát High-Gain cho hệ thống ổ từ đỡ chặn

Nguyễn Danh Giang, Tạ Thế Tài, Lê Đức Thịnh,
Nguyễn Tùng Lâm, Nguyễn Danh Huy*

Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội.

*Email: huy.nguyendanh@hust.edu.vn

Nhận bài: 12/9/2023; Hoàn thiện: 10/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.35-41>

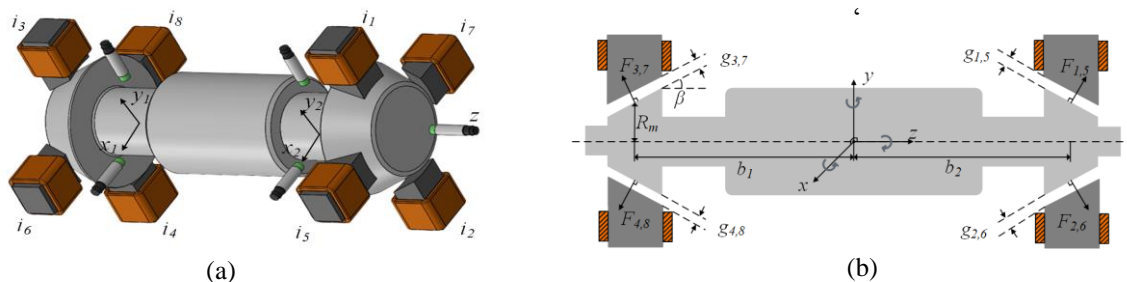
TÓM TẮT

Ổ từ đỡ chặn (CAMB) là một dạng ổ đỡ tiềm năng với cấu trúc hình côn độc đáo giúp làm giảm số lượng nam châm điện và tổn thất năng lượng trong hệ thống. Tuy nhiên, đây là một đối tượng rất phức tạp do tính chất phi tuyến vốn có và tác động xen kẽ giữa các chuyển động, vì vậy cần phải đưa ra một mô hình toán học phù hợp cũng như cấu trúc điều khiển có độ chính xác cao. Bài báo này đề xuất sử dụng bộ quan sát High-Gain (HGO) để ước lượng các trạng thái của hệ thống CAMB. Dựa trên kết quả của bộ quan sát, bộ điều khiển trượt đạo hàm cấp phân số (FOSMC) được thiết kế giúp hệ thống đáp ứng nhanh hơn cũng như khả năng loại bỏ nhiễu tốt hơn. Chất lượng của bộ điều khiển FOSMC-HGO được kiểm chứng qua các kịch bản mô phỏng với phần mềm MATLAB/SIMULINK.

Từ khoá: Ổ từ đỡ chặn; Quan sát trạng thái hệ số khếch đại lớn; Điều khiển trượt.

1. MỞ ĐẦU

So với các dạng hệ thống nâng không tiếp xúc bằng từ trường cơ bản, hệ thống ổ từ đỡ chặn cho phép điều khiển chuyển động ngang và dọc trục với số lượng cực từ là tối thiểu. Trong công nghiệp, CAMB được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng yêu cầu tốc độ nhanh cũng như giảm thiểu tổn hao tối đa, đặc biệt trong các hệ thống truyền động [1], bánh đà lưu trữ năng lượng [2], bơm tuabin [3],... Trong hình 1(a), chúng ta có thể thấy ngay lợi thế rõ ràng của CAMB, các nam châm điện có thể cung cấp hai lực hướng kính và dọc trục, điều đó giúp hệ thống giảm cơ cấu chấp hành cũng như giảm tổn thất năng lượng trong hệ thống [4]. Tuy nhiên, hệ thống lại phải đối mặt với các ảnh hưởng xen kẽ giữa các trục, điều này chính là một thách thức không hề nhỏ khi xây dựng một bộ điều khiển đáng tin cậy và đạt được chất lượng mong muốn [5, 6]. Việc đảm bảo chất lượng đầu ra của hệ thống cơ bản xoay quanh việc xử lý hiệu quả hai vấn đề quan trọng của CAMB đó là dòng điện bão hòa cuộn dây và nhiễu gộp hệ thống. Vì vậy, chúng ta cần tìm ra một bộ điều khiển có khả năng xử lý được hai vấn đề này. Bộ điều khiển trượt (SMC) được biết tới là bộ điều khiển phi tuyến với nhiều ưu điểm nổi bật. Đáng chú ý, nghiên cứu được đưa ra trong [7-9] đã chứng minh được hiệu quả của bộ điều khiển trượt đối với đối tượng ổ đỡ từ truyền thống. Đó chính là cơ sở để nhóm tác giả đề xuất bộ điều khiển SMC cho đối tượng CAMB.



Hình 1. Mô hình và mặt cắt ngang của hệ thống ổ từ đỡ chặn.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một bộ điều khiển được gọi là FOSMC-HGO (điều khiển trượt đạo hàm cấp phân số dựa trên bộ quan sát hệ số khuếch đại lớn), lợi thế của bộ điều khiển này chính là sự kết hợp ưu điểm của bộ quan sát HGO cũng như bộ điều khiển trượt đạo hàm cấp phân số. Điều này giúp hệ thống khử được sai lệch mô hình, loại bỏ được nhiễu đồng thời giúp hệ thống ổn định nhanh hơn. Trong hệ thống CAMB, bộ quan sát HGO đảm bảo được việc ước lượng trạng thái hệ thống và cung cấp thông tin cho việc tính toán lượng đặt vị trí và dòng điện. Ngoài ra, bài báo sẽ so sánh đáp ứng của hệ thống khi sử dụng hai bộ điều khiển ADRC và FOSMC-HGO để chứng minh chất lượng điều khiển được cải thiện.

Đóng góp chính của bài báo: i) Kết hợp bộ quan sát trạng thái HGO và bộ điều khiển trượt đạo hàm cấp phân số để đảm bảo cho CAMB ổn định tại vị trí cân bằng chống lại sự tác động của ngoại lực và các tham số bất định. ii) Bộ quan sát HGO đảm bảo việc ước lượng các trạng thái hệ thống và cung cấp thông tin cho việc tính toán vị trí cũng như giảm số lượng cảm biến cần sử dụng.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Mô hình CAMB bao gồm 4 cặp nam châm điện được đặt ở các vị trí như hình 1(a), chuyển động của rotor được điều khiển đồng thời theo hướng dọc trục và hướng kính bởi các nam châm hình côn ở các đầu trục. Trong hình 1(b) là mô hình cơ giản lược của CAMB, các phương trình động lực học của rotor được biểu diễn bằng cách sử dụng phương pháp Newton-Euler như sau:

$$\begin{aligned} m\ddot{z} &= (F_1 + F_2 + F_5 + F_6) \sin \beta - (F_3 + F_4 + F_7 + F_8) \sin \beta + F_z \\ m\ddot{x} &= (F_5 - F_6 + F_7 - F_8) \cos \beta + F_x \\ m\ddot{y} &= (F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \cos \beta - mg + F_y \\ J_d \ddot{\theta}_x + J_p \dot{\theta}_y \omega &= [(F_1 - F_2) b_2 + (F_4 - F_3) b_1] \cos \beta + (F_2 - F_1 + F_3 - F_4) R_m \sin \beta + M_x \\ J_d \ddot{\theta}_y - J_p \dot{\theta}_x \omega &= [(F_6 - F_5) b_2 + (F_7 - F_8) b_1] \cos \beta + (F_5 - F_6 + F_8 - F_7) R_m \sin \beta + M_y \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: z , y và x thể hiện cho chuyển động tịnh tiến còn θ_x và θ_y thể hiện cho chuyển động quay; m , J_d , J_p , ω lần lượt là khối lượng, momen quán tính theo trục quay, momen quán tính đầu cực và tốc độ quay của rotor. F_j ($j = 1, \dots, 8$) là các lực từ; F_z , F_x , F_y , M_x , M_y lần lượt là các lực và momen nhiễu trên các trục; b_1 và b_2 là khoảng cách từ hai đầu trục đến khối tâm; R_m và β lần lượt là bán kính và góc nghiêng. Giá trị của các thông số trên được trình bày chi tiết ở [10]. Sự hiện diện của thành phần lực hồi chuyển tạo nên ngẫu lực tác dụng lên các trục quay, khi tốc độ rotor quay càng nhanh, thì sự ảnh hưởng của các chuyển động này càng rõ rệt. Điều này tạo nên một thách thức làm thế nào để hệ thống ổn định khi làm việc với tốc độ cao.

2.1. Tuyến tính hóa lực từ

Ta có lực từ của các nam châm như sau:

$$F_j = \frac{\mu_0 N^2 A_p}{4} \frac{i_j^2}{g_j^2}, j = 1, \dots, 8 \quad (2)$$

trong đó, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) là độ từ thẩm không khí. Phương trình (2) cho thấy lực từ tác dụng lên rotor tỷ lệ bình phương với dòng điện và tỷ lệ nghịch với khoảng cách khe hở không khí. Mỗi quan hệ này là một trong những nguyên nhân chính gây ra tính chất phi tuyến trong mô hình CAMB. Nếu đặt tọa độ trọng tâm COG như hình 1(b), thì các khe hở không khí được thể hiện bởi các phương trình như sau:

$$\begin{aligned} g_{1,2} &= g_o - z \sin \beta \mp (y + b_2 \theta_x) \cos \beta & g_{5,6} &= g_o - z \sin \beta \mp (x - b_2 \theta_y) \cos \beta \\ g_{3,4} &= g_o + z \sin \beta \mp (y - b_1 \theta_x) \cos \beta & g_{7,8} &= g_o + z \sin \beta \mp (x + b_1 \theta_y) \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

Dòng điều khiển của hệ thống được tính toán dựa trên chiến lược điều khiển sử dụng chế độ dòng vi sai. Tổng của dòng điều khiển và dòng bias sẽ được cấp cho 1 nam châm, trong khi đó, nam châm còn lại sẽ được cấp 1 dòng điện bằng hiệu dòng điều khiển và dòng bias. Áp dụng chiến lược này, hệ thống chỉ cần 5 dòng điện điều khiển thay vì 8 dòng điện. Các dòng điện điều khiển theo thứ tự các cuộn dây được thể hiện ở biểu thức sau:

$$\mathbf{i} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{H}\mathbf{i}_r \quad (4)$$

Trong đó: \mathbf{I}_0 là ma trận dòng bias; \mathbf{H} là ma trận dòng điều khiển [10]. Áp dụng (4) và (3) cho (2) và (1) và sử dụng khai triển Taylor, ta được lực từ đã được tuyến tính hóa như sau:

$$\mathbf{F}_{mag} = -\mathbf{K}_d\mathbf{q} + \mathbf{K}_i\mathbf{i} \quad (5)$$

trong đó, \mathbf{K}_d là ma trận độ cứng khoảng cách và \mathbf{K}_i là ma trận độ cứng dòng điện [10].

2.2. Mô hình rút gọn

Sử dụng công thức (5) ta có thể viết lại phương trình 1 dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_d\mathbf{q} = \mathbf{K}_i\mathbf{H}\mathbf{i}_r + \mathbf{L} \quad (6)$$

Trong đó: \mathbf{L} là ma trận các lực và momen nhiễu tác động lên hệ thống; \mathbf{M} , \mathbf{G} lần lượt là ma trận khối lượng và ma trận lực hồi chuyển. Các thành phần xen kênh được loại bỏ nhờ sử dụng cấu trúc sau:

$$\mathbf{i}_r = (\mathbf{K}_i\mathbf{H})^{-1}(\mathbf{u} + \mathbf{K}_d\mathbf{q}) \quad (7)$$

Viết lại phương trình (6) ta được:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} + \mathbf{L} \quad (8)$$

với \mathbf{u} là tín hiệu điều khiển.

Giả thiết: Các thành phần nhiễu \mathbf{L} và đạo hàm của chúng bị chặn, $|\mathbf{L}| \leq \mathbf{a}_1, |\dot{\mathbf{L}}| \leq \mathbf{a}_2$ với $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ là các ma trận hằng số dương.

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Xây dựng bộ quan sát HGO

Nhiệm vụ của HGO là để ước tính các trạng thái của hệ ở từ đỡ chặn. Xét mô hình bậc hai trong phương trình (8), trong đó, $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}; \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$ lần lượt là tín hiệu đo vị trí và đạo hàm của nó, phương trình có thể được viết lại dưới dạng trạng thái với $\mathbf{b} = \mathbf{M}^{-1}$ như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{b}\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L} \end{cases} \quad (9)$$

Từ phương trình trạng thái, bộ quan sát High-Gain được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2 + \beta_1(\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = \beta_2(\mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó: $\hat{\mathbf{x}}_1; \hat{\mathbf{x}}_2$ là các trạng thái quan sát; $\beta_1 = \text{diag}(2\omega_0), \beta_2 = \text{diag}(\omega_0^2)$ là các hệ số khuếch đại của bộ quan sát được chọn để $s^2 + \beta_1s + \beta_2 = 0$ là đa thức Hurwitz.

3.2. Xây dựng bộ điều khiển FOSMC

Phép tính phân số là dạng tổng quát của phép tính số nguyên truyền thống thành các bậc không nguyên. Đạo hàm cấp phân số được định nghĩa bằng công thức Riemann-Liouville:

$${}_{t_0}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt} \right)^n \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-(n-\alpha)}} d(\tau) \quad (11)$$

trong đó, $\Gamma(x)$ là hàm Euler và n là số nguyên thỏa mãn $n-1 \leq \alpha \leq n$. Biến đổi Laplace của công thức Riemann-Liouville được định nghĩa như sau:

$$L\{ {}_{t_0}D_t^\alpha f(t) \} = s^\alpha F(s) \quad (12)$$

Định nghĩa các tín hiệu sai số là $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{r}, \mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{r}}$, trong đó \mathbf{r} là tín hiệu vị trí tham chiếu. Từ đó, ta có:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_2 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{b}\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L} - \ddot{\mathbf{r}} \end{cases} \quad (13)$$

Mặt trượt phân số được thiết kế với c_1, c_2 là các hằng số dương và $\alpha \in (0,1]$ là bậc phân số:

$$\mathbf{s} = \mathbf{e}_2 + \mathbf{c}_1\mathbf{e}_1 + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}\mathbf{e}_1 \quad (14)$$

Thêm vào đó, xác định mặt trượt với các trạng thái quan sát được là $\hat{\mathbf{s}} = \hat{\mathbf{e}}_2 + \mathbf{c}_1\hat{\mathbf{e}}_1 + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}\hat{\mathbf{e}}_1$ với $\hat{\mathbf{e}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{r}, \hat{\mathbf{e}}_2 = \hat{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{r}}$. Do đó, ta có:

$$\dot{\hat{\mathbf{s}}} = \dot{\hat{\mathbf{e}}}_2 + \mathbf{c}_1\dot{\hat{\mathbf{e}}}_1 + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}\dot{\hat{\mathbf{e}}}_1 = \mathbf{b}\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L} - \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{c}_1\mathbf{e}_2 + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}\mathbf{e}_2 \quad (15)$$

Lựa chọn tín hiệu điều khiển với $\eta > 0$

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{r}} - \mathbf{c}_1\hat{\mathbf{e}}_2 - \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}\hat{\mathbf{e}}_2 - \eta \text{sgn}(\hat{\mathbf{s}})) \quad (16)$$

Để chứng minh tính ổn định của phương pháp đề xuất, lựa chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{s}^T\mathbf{s} \quad (17)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T(-\eta \text{sgn}(\hat{\mathbf{s}}) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L} + \mathbf{c}_1(\mathbf{e}_2 - \hat{\mathbf{e}}_2) + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}(\mathbf{e}_2 - \hat{\mathbf{e}}_2)) \\ &\leq -\eta|\hat{\mathbf{s}}| + \eta|\mathbf{s}^T - \hat{\mathbf{s}}| + (|\hat{\mathbf{s}}| + |\mathbf{s}^T - \hat{\mathbf{s}}|)(\mathbf{c}_1|\mathbf{e}_2 - \hat{\mathbf{e}}_2| + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}|\mathbf{e}_2 - \hat{\mathbf{e}}_2| + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L}) \\ &\leq -\eta|\hat{\mathbf{s}}| + \eta|\mathbf{s}^T - \hat{\mathbf{s}}| + (|\hat{\mathbf{s}}| + |\mathbf{s}^T - \hat{\mathbf{s}}|)(\mathbf{c}_1|\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2| + \mathbf{c}_2D^{1-\alpha}|\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2| + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{a}_1) \end{aligned} \quad (18)$$

Bởi vì sự hội tụ của bộ quan sát nên các thành phần $|\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2|, |\mathbf{s}^T - \hat{\mathbf{s}}|$ bị chặn và đủ nhỏ, do đó, ta có $\dot{V} < 0$. Do đó, hệ thống ổn định theo lý thuyết Lyapunov.

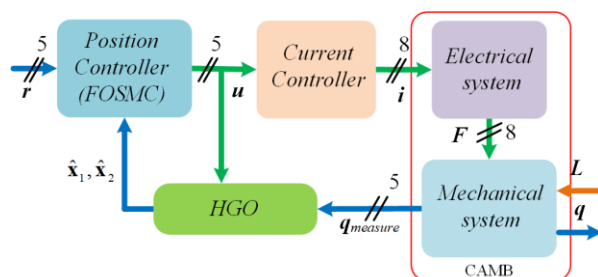
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Phương pháp, công cụ mô phỏng

Để kiểm tra tính đúng đắn cũng như hiệu quả và chất lượng của bộ điều khiển đề xuất, hệ thống CAMB được xây dựng trên môi trường MATLAB/Simulink. Kịch bản mô phỏng hiển thị và so sánh phản hồi của hệ thống với bộ điều khiển ADRC. Trong phần này, bằng cách thay đổi tốc độ quay cũng như bổ sung thêm nhiễu loạn tải rotor và ngoại lực, chất lượng của hai bộ điều khiển được so sánh và đánh giá. Các hệ số được lựa chọn của FOSMC-HGO bao gồm bậc phân số $\alpha = 0.6$, hệ số HGO $\omega_0 = 600$, thông số điều khiển $c_1 = 500, c_2 = 10$ và thông số hàm switching $\eta = 100$.

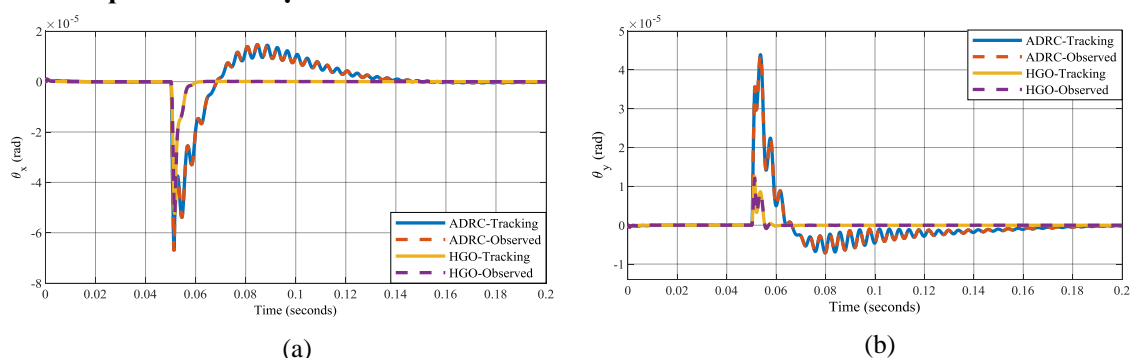
Chiến lược điều khiển được trình bày trong hình 2. Từ dữ liệu vị trí được đo bằng cảm biến và đầu vào điều khiển, HGO ước tính biến trạng thái của hệ thống và gửi chúng đến bộ điều

khởi vị trí. Bộ điều khiển dòng điện điều chỉnh dòng điện từ tín hiệu điều khiển để thay đổi lực từ nhằm ổn định vị trí của rotor.

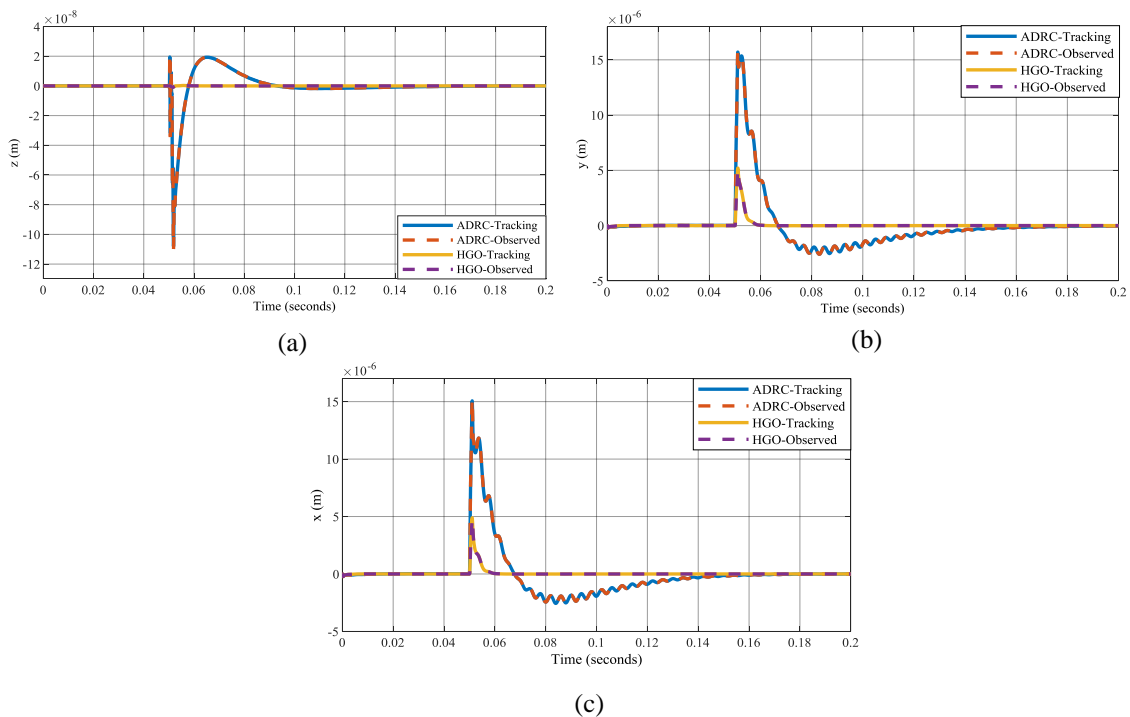


Hình 2. Cấu trúc điều khiển chi tiết của CAMB.

4.2. Kết quả và bình luận



Hình 3. Các đáp ứng vị trí góc của CAMB khi sử dụng ADRC và FOSMC-HGO.



Hình 4. Các đáp ứng vị trí của CAMB khi sử dụng ADRC và HGO-FOSMC.

Ở trạng thái ban đầu rotor được đặt ở vị trí cân bằng. Hình 3 và 4 mô tả đáp ứng của hai bộ điều khiển dưới tác động của nhiễu bên ngoài lên các trục tại thời điểm 0,05s. Độ lệch của trục z so với vị trí cân bằng là không đáng kể với bộ điều khiển FOSMC-HGO, nhưng trục z và trục y có độ lệch so với vị trí cân bằng là 5.10^{-6} (m) và trở lại vị trí cân bằng sau 0,01s. Với bộ điều khiển ADRC, rotor có độ lệch đáng kể so với vị trí cân bằng dọc theo trục z, y và x, do 10.10^{-8} (m), 15.10^{-6} (m) và 15.10^{-6} (m) và tương ứng, trước khi trở về vị trí cân bằng trong vòng 0,1 giây. Theo cách tương tự với trục theta y và theta z, thời gian quay lại của bộ điều khiển FOSMC là 0,01 giây, trong khi thời gian quay lại của bộ điều khiển ADRC là 0,1 giây.

Kết quả này nêu bật những ưu điểm vượt trội của bộ điều khiển FOSMC kết hợp HGO so với bộ điều khiển ADRC trong việc hạn chế chuyển vị của rotor, đặc biệt khi vận hành tốc độ cao và khi có nhiễu tải và ngoại lực.

5. KẾT LUẬN

Ổ từ đỡ chặn là một đối tượng đặc trưng bởi tính phi tuyến mạnh cũng như xen kẽ giữa các trục chuyển động. Trong bài báo này, chiến lược điều khiển FOSMC-HGO được sử dụng để xử lý các nhiễu và tham số bất định của mô hình CAMB. Việc kết hợp đạo hàm cấp phân số với điều khiển trượt đảm bảo độ chính xác của điều khiển và khả năng bám vị trí mạnh mẽ mà không gây nhiễu hoặc làm giảm tốc độ phản hồi động của hệ thống CAMB. Theo kết quả mô phỏng, bộ điều khiển FOSMC-HGO mang lại hiệu suất phản hồi vượt trội của hệ thống CAMB dưới ảnh hưởng của nhiễu và ngoại lực so với bộ điều khiển ADRC về sai số vị trí, độ quá điều chỉnh và thời gian xử lý. Nghiên cứu tiếp theo có thể bao gồm thử nghiệm thời gian thực của hệ thống CAMB trong ứng dụng bánh đà để xác nhận tính ổn định và hiệu quả của bộ điều khiển.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-PC-029.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Bonfitto et al., “Rotor on Cone-Shaped Active Magnetic Bearings with Three-Phases Power Drivers System Architecture and Modeling,” *Ismb13*, no. March 2016, (2012).
- [2]. J. Fang, C. Wang, and J. Tang, “Modeling and analysis of a novel conical magnetic bearing for vernier-gimballing magnetically suspended flywheel,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 13, pp. 2416–2425, (2014), doi: 10.1177/0954406213517488.
- [3]. A. BONFITTO, N. AMATI, L. D. SUAREZ, and A. TONOLI, “Turbomolecular pumps on conical active magnetic bearings,” *Mech. Eng. J.*, vol. 4, no. 5, pp. 16-00569-16–00569, (2017), doi: 10.1299/mej.16-00569.
- [4]. A. Katyayn and P. K. Agarwal, “Comparative analysis of conical and conventional active magnetic bearings for complete support of a 5-dof rotor system,” 2017 Int. Conf. Adv. Mech. Ind. Autom. Manag. Syst. AMIAMS 2017 - Proc., pp. 53–58, (2017), doi: 10.1109/AMIAMS.2017.8069188.
- [5]. A. M. Mohamed and Fawzi P. Emad, “Conical Magnetic Bearings with Radial and Thrust Control,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, no. 12, (1992), doi: 10.1109/9.182473.
- [6]. D. H. Nguyen, M. Le Vu, H. Do Trong, D. G. Nguyen, and T. L. Nguyen, “Active disturbance rejection control-based anti-coupling method for conical magnetic bearings,” *Acta Polytech.*, vol. 62, no. 4, pp. 479–487, (2022), doi: 10.14311/ap.2022.62.0479.
- [7]. F. J. Lin, S. Y. Chen, and M. S. Huang, “Intelligent double integral sliding-mode control for five-degree-of-freedom active magnetic bearing system,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 5, no. 11, pp. 1287–1303, (2011), doi: 10.1049/iet-cta.2010.0237.
- [8]. S. Saha, S. M. Amrr, A. S. Saidi, A. Banerjee, and M. Nabi, “Finite-time adaptive higher-order smc for the nonlinear five dof active magnetic bearing system,” *Electron.*, vol. 10, no. 11, pp. 1–20, (2021), doi: 10.3390/electronics10111333.
- [9]. S. Saha, S. M. Amrr, and M. Nabi, “Adaptive second order sliding mode control for the regulation of active magnetic bearing,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6, (2020).

- [10]. D. H. Nguyen et al., "Fractional Order Active Disturbance Rejection Control for Canned Motor Conical Active Magnetic Bearing-Supported Pumps," *Inventions*, vol. 8, no. 1, p. 15, (2023), doi: 10.3390/inventions8010015.

ABSTRACT

High-Gain observer based fractional order sliding mode control for conical active magnetic bearing

The Conical Active Magnetic Bearing (CAMB) presents inherent complexity owing to its nonlinear characteristics, which requires us to develop an accurate mathematical model as well as an appropriate controller. This paper proposes a control system using an observer called the High-Gain Observer (HGO) to estimate the states of the CAMB system. Based on the HGO observer, a fractional-order sliding mode controller is designed, referred to as FOSMC-HGO (Fractional-Order Sliding Mode Control based on High-Gain Observer). The advantage of this controller lies in the combination of the benefits of the HGO observer and the fractional-order sliding mode control. Finally, MATLAB/SIMULINK simulation results demonstrate the effectiveness of the FOSMC-HGO controller, enhancing the system's faster response time and improved noise rejection capability. Additionally, the simulation results showcase the controller's ability to stabilize the system within a very short time.

Keywords: Conical active magnetic bearing; High gain observer; Fractional order sliding mode control.