

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DÙNG MẠNG NƠN HỆ NÂNG VẬT BẰNG TỪ TRƯỜNG

Nguyễn Chí Ngón¹, Phạm Thanh Tùng² và Dương Hoài Nghĩa³

ABSTRACT

The strong point of the sliding mode control (SMC) is the stability and robustness even under effecting of disturbances and variations of controlled object. However, designing a SMC requires an mathematic model of the object which may not always be obtained, in practically. In order to cope with this problem, this article proposes using an artificial neural network to estimate the object's status for calculating the sliding control signal instead of using mathematic model. The proposed SMC algorithm is applied to control a magnetic levitation system. Simulation results indicate that the controller is stability and robustness in several conditions of noise effecting and object's parameter changing; the system response has a rising time about 0.17 ± 0.02 s, without overshoot, fluctuation and steady-state error.

Keywords: Artificial neural network, Sliding mode control, Magnetic levitation system

Title: Sliding Mode Control using Neural Network for Magnetic Levitation System

TÓM TẮT

Ưu điểm nổi bật của bộ điều khiển trượt là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống có nhiễu hoặc khi thông số của đối tượng thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên để thiết kế được bộ điều khiển trượt, người thiết kế cần biết chính xác mô hình của đối tượng. Trong thực tế, vấn đề này không phải lúc nào cũng thực hiện được. Để giải quyết vấn đề trên, bài báo đề nghị sử dụng mạng nơon để ước lượng các hàm phi tuyến mô tả trạng thái của đối tượng trong luật điều khiển trượt thay vì sử dụng mô hình toán. Giải thuật đề nghị được áp dụng để điều khiển hệ nâng vật bằng từ trường. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển ổn định và bền vững dưới tác động của nhiễu và sự biến thiên thông số của đối tượng, đáp ứng của hệ thống có thời gian tăng 0.17 ± 0.02 giây, không xuất hiện vọt lố, không dao động và sai số xác lập bị triệt tiêu.

Từ khóa: Mạng nơon nhân tạo, điều khiển trượt, hệ nâng vật bằng từ trường

1 GIỚI THIỆU

Phương pháp điều khiển trượt được quan tâm và ứng dụng thành công trên các hệ phi tuyến bởi tính ổn định bền vững đối với nhiễu và sự thay đổi của các thông số của mô hình (Efe, M. O., O. Kaynak and B. M. Wilamowski, 2000; Perruquetti W. and J. P. Barbot, 2002). Tuy nhiên, việc thiết kế hệ thống điều khiển trượt đòi hỏi phải xác định được mô hình của đối tượng điều khiển (Utkin, V.I., 1977). Trên thực tế, việc xác định mô hình toán của đối tượng, đặc biệt là các đối tượng phi tuyến mạnh sẽ gặp nhiều khó khăn và đôi lúc không đạt được kết quả. Trong khi đó, với khả năng xử lý ngày càng mạnh mẽ của máy vi tính, mạng nơon nhân tạo (gọi tắt là mạng nơon) có thể được huấn luyện một cách nhanh chóng để xấp xỉ

¹ Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

² Khoa Kỹ Thuật Công Nghệ, Trường Đại học Cửu Long

³ Khoa Điện - Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa - Đại Học Quốc Gia Tp.HCM

một quan hệ phi tuyến bất kỳ (Demuth H., M. Beale, M. Hagan, 2010). Nói cách khác, mô hình phi tuyến của đối tượng có thể được nhận dạng bằng mạng nơron thay vì phải mô tả toán học bằng các hệ phương trình vi tích phân.

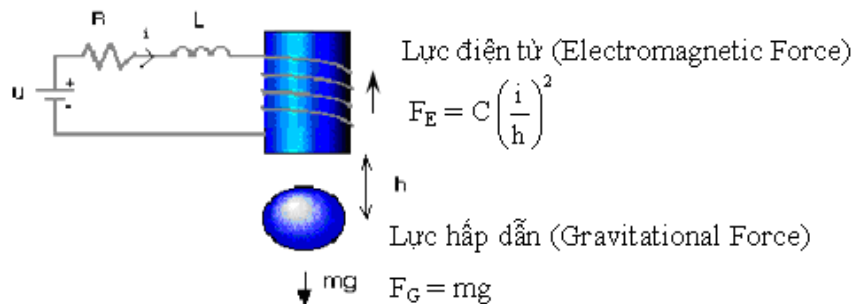
Hệ nâng vật bằng từ trường (magnetic levitation system) là một hệ phi tuyến được ứng dụng nhiều trong kỹ thuật robot, phi thuyền không gian và bộ điều khiển đĩa cứng. Hệ này được một số tác giả nghiên cứu và điều khiển thành công với nhiều phương pháp khác nhau (Mahmoud N. I, 2003; Arreola R. B., 2003; Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004). Trong các nghiên cứu đó, bộ điều khiển trượt đã phát huy tác dụng (Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004), song việc thiết kế bộ điều khiển phụ thuộc vào mô hình toán của đối tượng. Hơn nữa, kỹ thuật mạng nơron chưa được quan tâm áp dụng trong điều khiển hệ nâng vật bằng từ trường.

Nhằm bổ sung và khắc phục những hạn chế đã đề cập, bài báo đề xuất giải pháp kết hợp kỹ thuật điều khiển trượt với việc nhận dạng mô hình phi tuyến của đối tượng bằng mạng nơron để điều khiển hệ nâng vật bằng từ trường.

2 PHƯƠNG PHÁP VÀ PHƯƠNG TIỆN NGHIÊN CỨU

2.1 Mô hình hệ nâng vật bằng từ trường

Mặc dù phương pháp thiết kế bộ điều khiển sẽ được đề cập không đòi hỏi mô hình toán của hệ nâng vật bằng từ trường, song để thuận lợi trong việc kiểm chứng giải thuật điều khiển mà không cần bố trí thiết bị trong phòng thí nghiệm, nghiên cứu này mô phỏng đối tượng dựa theo mô hình được trình bày trên hình 1 (Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004). Trong mô hình hệ nâng vật bằng từ trường (Hình 1), điện áp u chính là ngõ vào của đối tượng, được thay đổi để kiểm soát lực điện từ F_E dùng để nâng hoặc hạ hòn bi một khoảng h so với nam châm điện. Vị trí h giữa hòn bi và nam châm điện chính là ngõ ra của đối tượng điều khiển.



Hình 1: Mô hình hệ nâng vật bằng từ trường

Áp dụng định luật 2 Newton ta có:

$$F = F_G - F_E = mg - C \left(\frac{i}{h}\right)^2$$

Suy ra:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = v \\ u = Ri + \frac{d(L(h)i)}{dt} \\ m \frac{dv}{dt} = mg - C \left(\frac{i}{h} \right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: h là vị trí hòn bi (m); v là vận tốc hòn bi (m/s); i là dòng điện qua cuộn dây (A); u là điện áp cung cấp cho cuộn dây (V); R, L là điện trở và điện cảm cuộn dây (Ω, H); C là hằng số lực từ (Nm^2A^{-2}); m là khối lượng hòn bi (Kg) và g là gia tốc trọng trường (m/s^2).

Điện cảm của cuộn dây là một hàm phi tuyến:

$$L(h) = L_1 + \frac{2C}{h} \quad (2)$$

Chọn biến trạng thái như (3):

$$x_1 = h, x_2 = v, x_3 = i \quad (3)$$

Vector trạng thái của hệ thống:

$$x = (x_1, x_2, x_3)^T$$

Từ (1), (2) và (3) ta được phương trình trạng thái như (4):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 = \frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \end{cases} \quad (4)$$

Gọi $x_d = [x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}]^T$ là vector trạng thái mong muốn.

Mục tiêu điều khiển là ổn định x tại x_d trong điều kiện hệ thống chịu tác động của nhiễu và với sự biến đổi thông số mô hình.

2.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt

Theo (Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004), ta thực hiện phép đổi hệ tọa độ (5) để đưa (4) về dạng chuẩn (5*):

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 \\ z_3 = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (5^*)$$

Lúc này ta cần xác định luật điều khiển u sao cho $z=(z_1, z_2, z_3)^T \rightarrow (0, 0, 0)^T$ khi $t \rightarrow \infty$, để $x \rightarrow x_d$. Kết hợp (4), (5) và một số phép biến đổi ta được (6):

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = 2(g - z_3) \left[\frac{z_2}{z_1 + x_{1d}} \left(1 - \frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \right) + \frac{R}{L} \right] - \frac{2}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{C}{m}(g - z_3)} u \end{cases} \quad (6)$$

Đặt:

$$\begin{cases} g(z) = -\frac{2}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{C}{m}(g - z_3)} \\ f(z) = 2(g - z_3) \left[\frac{z_2}{z_1 + x_{1d}} \left(1 - \frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \right) + \frac{R}{L} \right] \end{cases} \quad (7)$$

Từ (6), (7) ta được mô hình động học của đối tượng trong hệ tọa độ mới như (8):

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = f(z) + g(z)u \end{cases} \quad (8)$$

Ngõ ra của đối tượng trong hệ tọa độ mới là:

$$e = z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (9)$$

Mối quan hệ ngõ vào và ngõ ra:

$$e^{(3)} = f(z) + g(z)u \quad (10)$$

Hai hàm $f(z)$, $g(z)$ tương ứng trong hệ tọa độ ban đầu là $f(x)$, $g(x)$:

$$\begin{cases} f(x) = \frac{2C}{m} \left(\frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} \left(1 - \frac{2C}{Lx_1} \right) + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) \\ g(x) = -\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} \end{cases} \quad (11)$$

Ta viết lại (10) trong hệ tọa độ ban đầu như (12):

$$e^{(3)} = f(x) + g(x)u \quad (12)$$

Chọn mặt trượt như (13):

$$S = \ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_0 e \quad (13)$$

Với các hệ số a_1 và a_0 được chọn sao cho phương trình đặc trưng $p^2 + a_1p + a_0 = 0$ có tất cả các nghiệm với phần thực âm.

Luật điều khiển trượt tổng quát được thiết kế như (14):

$$u = \frac{1}{g(x)} \left[-f(x) - a_1 \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - a_0 x_2 - W \text{sign} \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_0 (x_1 - x_{1d}) \right) \right] \quad (14)$$

Trong đó: W là hằng số dương chọn trước.

2.3 Thiết kế bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron

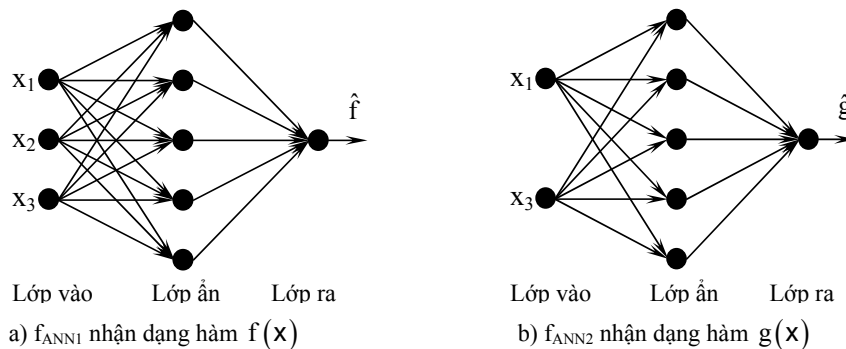
2.3.1 Nhận dạng đối tượng dùng mạng nơron

Để thiết kế luật điều khiển trượt dùng mạng nơron cho hệ nâng vật bằng từ trường, ta tiến hành nhận dạng các hàm $f(x)$ và $g(x)$ trong (11) bằng mạng nơron truyền thẳng 2 lớp, với lớp ẩn phi tuyến (hàm truyền hyperbolic tangent sigmoid) và lớp ra tuyến tính, có cấu trúc và quan hệ vào ra được mô tả trên hình 2. Gọi $\hat{f}(x)$ và $\hat{g}(x)$ là kết quả nhận dạng thì:

$$\begin{aligned} \hat{f}(x) &= f_{ANN1}(\mathbf{W}_1, \mathbf{b}_1, x_1, x_2, x_3) \\ \hat{g}(x) &= f_{ANN2}(\mathbf{W}_2, \mathbf{b}_2, x_1, x_3) \end{aligned} \quad (15)$$

với $(\mathbf{W}_1, \mathbf{b}_1)$ và $(\mathbf{W}_2, \mathbf{b}_2)$ lần lượt là ma trận trọng số kết nối và vector ngưỡng kích hoạt của hai mạng nơron nhận dạng (f_{ANN1}, f_{ANN2}) . Giải thuật truyền ngược Levenberg-Marquardt được áp dụng để điều chỉnh $(\mathbf{W}_i, \mathbf{b}_i)_{i=1,2}$ đạt được (16), với N_1, N_2 là số mẫu dữ liệu tương ứng dùng để huấn luyện có giám sát các mạng nơron; $[f_d(x), g_d(x)]$ là các ngõ ra chuẩn để nhận dạng (15), tính toán được từ (11), sau khi mô phỏng hệ phương trình trạng thái (4) với dữ liệu vào (x_1, x_2, x_3) dạng ngẫu nhiên cho trước.

$$\begin{aligned} \min & \left\{ \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left| \hat{f}(x)_i - f_d(x)_i \right|^2 \right\} \\ \min & \left\{ \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \left| \hat{g}(x)_j - g_d(x)_j \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (16)$$



Hình 2: Cấu trúc mạng nơron nhận dạng đối tượng

2.3.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron

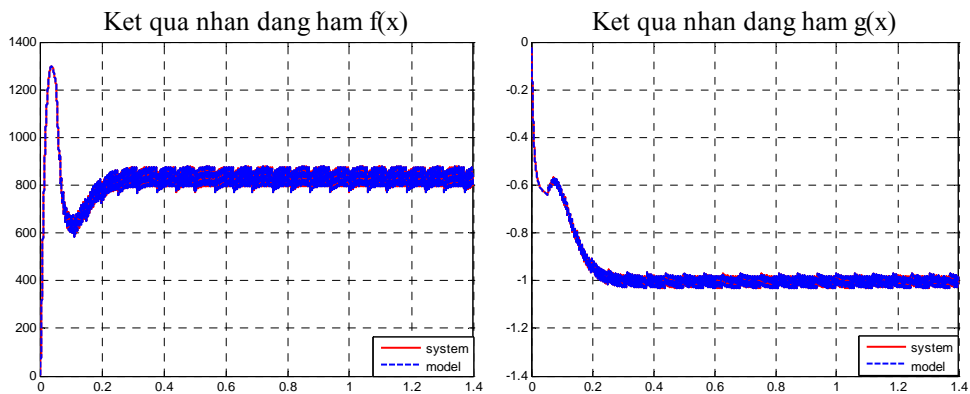
Sau khi sử dụng mạng nơron để nhận dạng các hàm $f(x)$ và $g(x)$ ta được các hàm xấp xỉ $\hat{f}(x)$ và $\hat{g}(x)$. Khi đó, luật điều khiển (14) được thiết lập lại như (17):

$$u = \frac{1}{\hat{g}(x)} \left[-\hat{f}(x) - a_1 \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - a_0 x_2 - W \text{sign} \left(g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_0 (x_1 - x_{1d}) \right) \right] \quad (17)$$

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

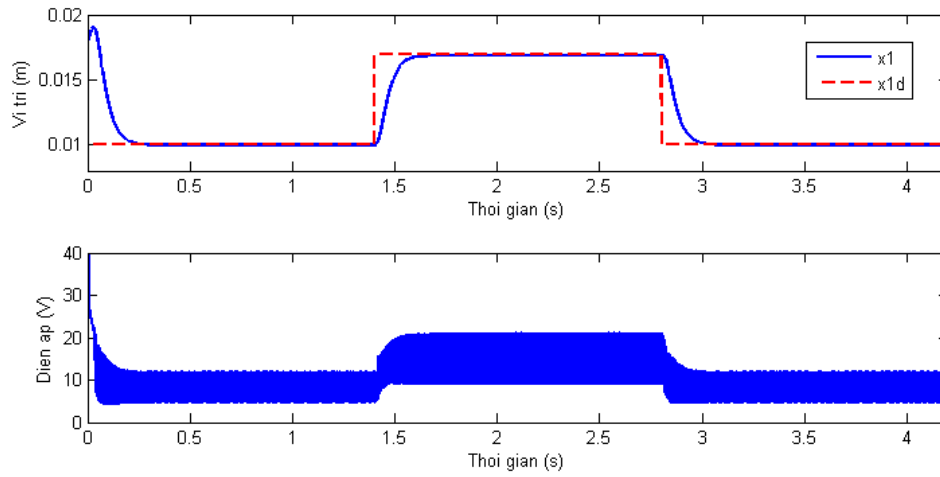
Hệ nâng vật bằng từ trường được mô phỏng trên MATLAB/Simulink với các tham số được xác lập theo (Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004), bao gồm: hòn bi thép khối lượng $m=11.87g$; nam châm điện được hình thành từ các vòng dây quấn quanh lõi thép với điện trở của cuộn dây $R=28.7\Omega$; điện cảm $L_1=0.65H$; hằng số lực từ $C=1.4 \times 10^{-4} Nm^2/A^2$; gia tốc trọng trường $g = 9.81 m/s^2$.

Kết quả mô phỏng cho thấy hàm $f(x)$ và $g(x)$ có thể nhận dạng được bằng mạng nơron đã thiết lập (Hình 3). Bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron với luật điều khiển (17) được thử nghiệm với các tham số $W=350$, $a_0=930$, $a_1=61$ với nhiễu trắng công suất $0.1W$ tại ngõ ra của đối tượng. Kết quả mô phỏng trên hình 4 cho thấy vị trí hòn bi x_1 (đáp ứng ngõ ra của đối tượng điều khiển) bám theo tín hiệu đặt x_{1d} với thời gian tăng phù hợp thực tế; đáp ứng của hệ ổn định và không xuất hiện vọt lố.

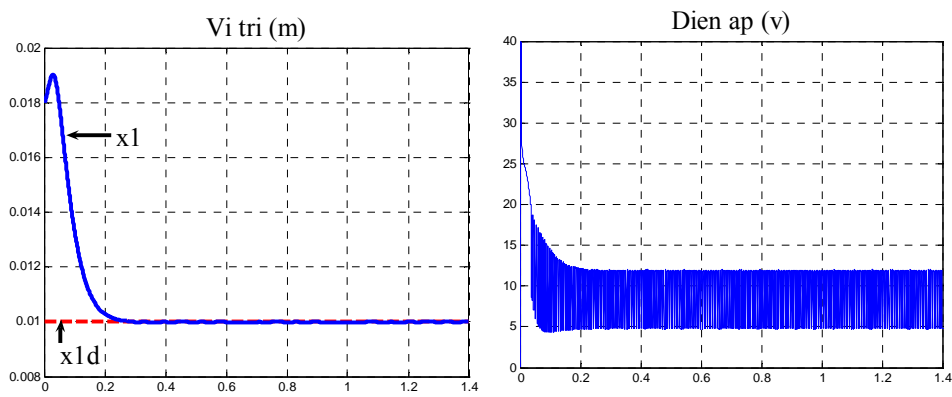


Hình 3: Kết quả nhận dạng hàm $f(x)$ và $g(x)$

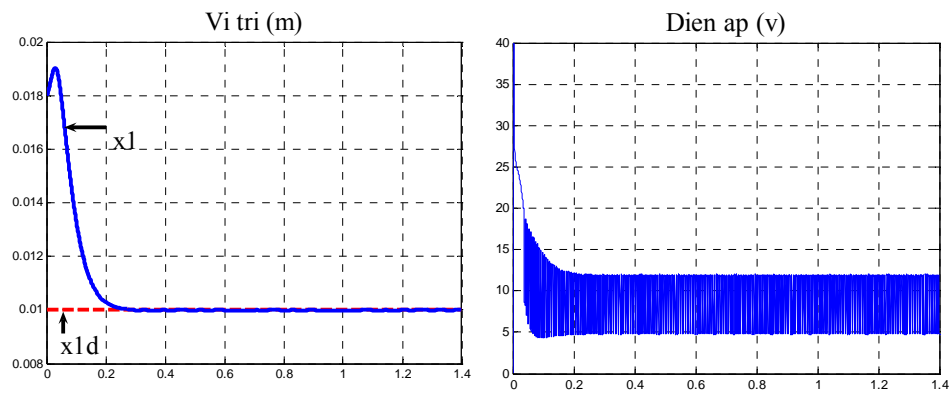
Ngoài ra, để khảo sát tính ổn định và bền vững của bộ điều khiển, hệ thống cũng được thử nghiệm với sự biến thiên 25% khối lượng vật nặng cần nâng trong từ trường (tức khối lượng hòn bi) và nhiễu trắng công suất $0.1W$ để giả lập nhiễu cảm biến vị trí vật nặng. Kết quả mô phỏng được trình bày trên các hình 5, 6 và 7. Các kết quả này cho thấy bộ điều khiển ổn định và bền vững dưới tác động của nhiễu và sự biến thiên thông số của đối tượng điều khiển; đáp ứng của ngõ ra có thời gian tăng 0.17 ± 0.02 giây, không xuất hiện vọt lố, không dao động và sai số xác lập bị triệt tiêu.



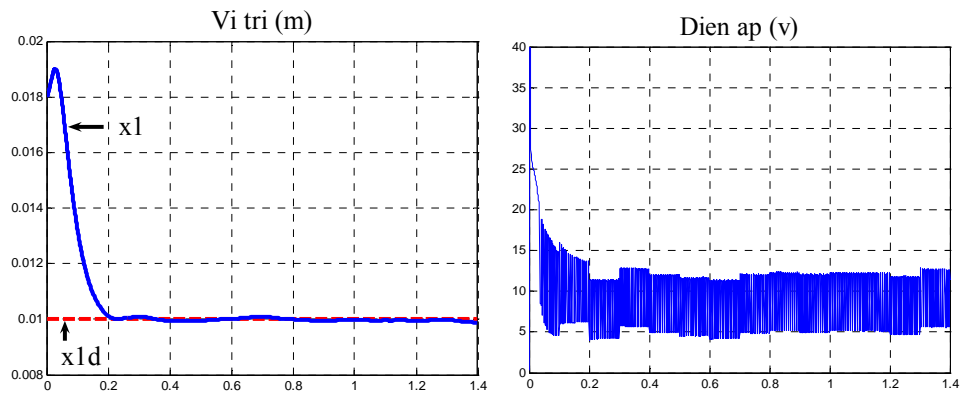
Hình 4: Đáp ứng vị trí và điện áp với bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron



Hình 5: Khảo sát đáp ứng của hệ thống trong trường hợp $m=m+25\%$



Hình 6: Khảo sát đáp ứng của hệ thống trong trường hợp $m=m-25\%$



Hình 7: Khảo sát đáp ứng của hệ thống với nhiễu trắng công suất 0.1W

4 KẾT LUẬN

Phương pháp điều khiển trượt dùng mạng nơron được thiết kế có vai trò đảm bảo vị trí vật nặng trong từ trường bám theo vị trí tham khảo. Ở phương pháp này, mạng nơron truyền thẳng nhiều lớp được dùng để ước lượng các hàm phi tuyến mô tả quan hệ vào ra của đối tượng thay cho việc sử dụng mô hình toán trong thiết kế. Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng của bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron ổn định và bền vững dưới tác động của nhiễu và sự biến thiên thông số của đối tượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al-Muthairi, N. F. and M. Zribi, 2004. Sliding mode control of a Magnetic Levitation System, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2004, Issue 2, Pages 93-107.
- Arreola R. B., 2003. Nonlinear control design for a Magnetic Levitation System, Graduate Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto.
- Demuth H., M. Beale, M. Hagan, 2010. *Neural Network Toolbox™ User's Guide*, The MathWorks, Inc.
- Efe, M. O., O. Kaynak and B. M. Wilamowski, 2000. Creating a Sliding Mode in a Motion Control System by Adopting a Dynamic Defuzzification Strategy in an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Proc 26th Annual Conf. IEEE on Industrial Electronics Society*, vol.2, pp.894-899.
- Mahmoud N. I., 2003. A backstepping design of a control system for a Magnetic Levitation System. *Thesis, Universidad de Linköping*, 2003.
- Peruquetti W. and J. P. Barbot, 2002. Chapter 1: Overview of classical sliding mode control in: *Sliding mode control in engineering*, Marcel Dekker.
- Utkin, V.I., 1977. Variable structure systems with sliding mode, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, pp. 212-222.