

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY CỦA ROBOT HÀN MẠCH IN

RESEARCH AND DESIGN CONTROL ALGORITHM FOR MANIPULATOR OF PRINTED CIRCUIT BOARD SOLDERING ROBOT

Kiểu Xuân Thực¹,
Nguyễn Văn Tùng¹, Quách Đức Cường^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.007>

TÓM TẮT

Robot hàn mạch in tự động hiện được sử dụng phổ biến trong các dây chuyền lắp ráp mạch in. Một trong những yêu cầu khắt khe của điều khiển vị trí mô hàn của robot là: điều khiển chính xác với độ sai số thấp, tốc độ di chuyển đầu hàn nhanh để giảm thời gian gia công. Trong bài báo này, chúng tôi phát triển phương pháp điều khiển cánh tay Robot hàn 4 bậc tự do sử dụng các động cơ bước với công nghệ điều khiển vi bước kiểu tựa hướng từ trường kết hợp với tối ưu truyền động giữa các khớp nhằm nâng cao độ chính xác và hiệu suất gia công hàn mạch in. Hiệu quả của giải pháp điều khiển được minh chứng thông qua kết quả mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab&Simulink.

Từ khoá: Robot hàn, động cơ bước, mạch in.

ABSTRACT

Printed Circuit Board soldering robots are now commonly used in PCB assembly lines. One of the strict requirements of robot torch position control is: precise control with low error, fast welding head movement speed to reduce machining time. In this paper, we develop a method to control the welding robot arm using stepper motors with magnetic field-oriented microstepping control technology combined with optimal transmission between joints to improve accuracy and efficiency of printed circuit welding. The effectiveness of the control solution is demonstrated through the results of system simulation on Matlab&Simulink software.

Keywords: soldering robot, step motor, PCB.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: cuongqd@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 19/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/12/2022

Ngày chấp nhận đăng: 24/02/2023

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
I	W/m ²	Cường độ âm thanh
L _i	dB	Cường độ âm thanh
p	Pa	Áp suất không khí cục bộ

CHỮ VIẾT TẮT

PCBW Robot	Robot hàn mạch in
PCB	Mạch in
DAF	Bộ điều khiển thích nghi trực tiếp

1. GIỚI THIỆU

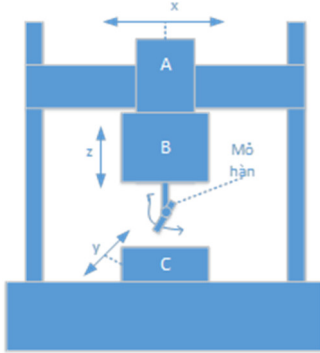
Robot hàn mạch in ngày càng được sử dụng phổ biến trong hệ thống dây chuyền lắp ráp mạch PCB. Cấu trúc truyền động của robot này thường tổ chức thành hệ 3 hoặc 4 bậc tự do trên nền tảng sử dụng động cơ bước. Khó khăn chính đối với quá trình điều khiển là: 1) đảm bảo dịch chuyển chính xác với sai số cỡ 0,02mm; 2) phối hợp chuyển động giữa các trục một cách tối ưu để gia tăng tốc độ gia công; 3) tuyệt đối an toàn, không xảy ra hiện tượng trôi bước mất điều khiển. Phần lớn các hệ truyền động sử dụng động cơ bước đều là điều khiển vòng hở với kỹ thuật điều khiển toàn bước hoặc nửa bước. Ưu điểm của giải pháp trên là đơn giản, tuy nhiên những vấn đề kỹ thuật có thể nảy sinh trong hệ thống trên bao gồm: sai lệch cao, có khả năng mất kiểm soát do trôi bước điều khiển. Để giải quyết vấn đề trên, trong hệ bài toán điều khiển truyền động cho Robot hàn mạch in này, chúng tôi sử dụng giải pháp điều khiển vòng kín kết hợp với tối ưu hóa phối hợp chuyển động giữa 3 bậc tự do trong hệ. Cấu trúc điều khiển bao gồm 2 mạch vòng xử lý. Mạch vòng dòng điện sử dụng công nghệ điều khiển vi bước dựa trên phương pháp điều khiển tựa hướng từ trường. Mạch vòng vị trí sử dụng giải pháp điều khiển mờ thích nghi trực tiếp. Kết quả mô phỏng cho thấy, hệ thống hoạt động ổn định, sai số tính nhỏ, đáp ứng chuyển động nhanh đảm bảo các yêu cầu cơ bản của một hệ truyền động Robot hàn mạch in.

Nội dung chính bao gồm các vấn đề như: 1) giới thiệu cấu trúc hệ thống; 2) thiết kế giải thuật điều khiển; 3) kết quả mô phỏng; 4) đánh giá và kết luận.

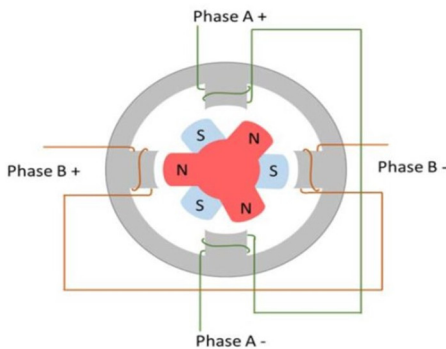
2. CẤU TRÚC TRUYỀN ĐỘNG CỦA HỆ ROBOT HÀN MẠCH IN

Cấu trúc của hệ thống truyền động Robot hàn PCB mô tả trên hình 1. Hệ thống bao gồm 4 trục tự do được điều

khuyến bằng 4 động cơ bước. 3 động cơ bước thực hiện điều khiển 3 trục (x, y, z) trong không gian hoạt động. Trục tự do thứ 4 dùng để điều khiển xoay đầu mỏ hàn. Trên thực tế việc điều khiển chính xác vị trí mỏ hàn chỉ phụ thuộc vào việc điều khiển 2 trục tự do (x, y), trục z và trục thứ 4 không đóng vai trò chính yếu trong điều khiển vị trí hàn.



Khối hình Robot



Động cơ bước 2 pha

Hình 1. Khối hình PCBW Robot và động cơ bước 2 pha

Mỗi một bậc tự do sử dụng động cơ bước và cấu trúc truyền động vít me-thanh trượt. Cấu trúc này có ưu điểm

Mô hình động cơ bước hai pha:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{K_t}{L}\omega \sin(p\phi) + \frac{v_a}{L} \\ \frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}i_b - \frac{K_t}{L}\omega \cos(p\phi) + \frac{v_b}{L} \\ T_e = K_t[-i_a \sin(p\phi) + i_b \cos(p\phi)] \end{cases} \quad (1)$$

Phương trình cân bằng động lực học:

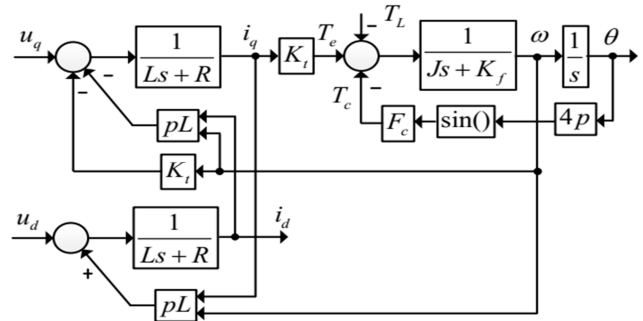
$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - K_f \omega - F_c \sin(4p\phi) - T_L \quad (2)$$

Trong đó: L là điện cảm cuộn dây, R là điện trở cuộn dây, i_a, i_b, v_a, v_b là dòng điện - điện áp chạy của cuộn A và B; ω là tốc độ góc trục động cơ, ϕ là góc trục động cơ, K_t là hằng số momen, K_f là hệ số ma sát, p là số cực của động cơ.

Sử dụng phép chuyển đổi hệ trục tọa độ cố định sang hệ trục tọa độ quay (d,q) với tốc độ quay $\phi_e = p\phi$ và phương trình chuyển đổi giữa hệ tọa độ cố định và hệ tọa độ quay như sau:

$$\begin{cases} a = d \cos(\phi_e) - q \sin(\phi_e) \\ b = d \sin(\phi_e) + q \cos(\phi_e) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó a, b là các biến trong hệ tọa độ cố định và d, q là các biến tương ứng trong hệ tọa độ quay (d, q). Theo [1, 2] thì sơ đồ cấu trúc hệ của động cơ bước trên hệ trục tọa độ quay (d, q) được mô tả như trên hình 2.



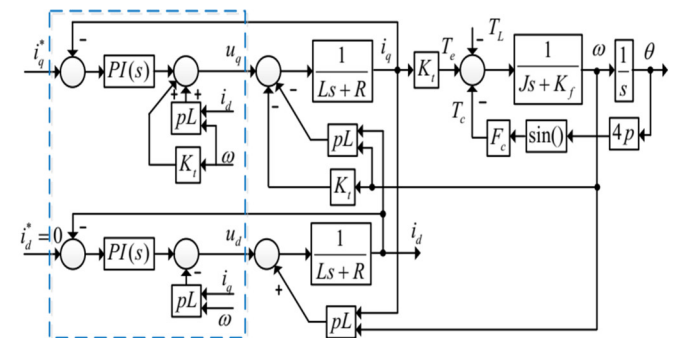
Hình 2. Mô hình động cơ bước trên hệ trục tọa độ quay (d, q)

3. GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN

3.1. Giải thuật điều khiển vòng kín

Cấu trúc điều khiển động cơ bước theo kiểu vi bước với công nghệ tựa hướng từ trường bao gồm 3 mạch vòng điều khiển: mạch vòng dòng điện, mạch vòng tốc độ, mạch vòng vị trí được mô tả như trên hình.

Đối với vòng điều khiển dòng điện, sử dụng cấu trúc điều khiển decoupling kết hợp với bộ điều khiển PI (hình 3).



Hình 3. Vòng điều khiển dòng điện

Tham số bộ điều khiển dòng điện tính theo (3). Trong đó t_s^i là thời gian xác lập của mạch vòng dòng điện.

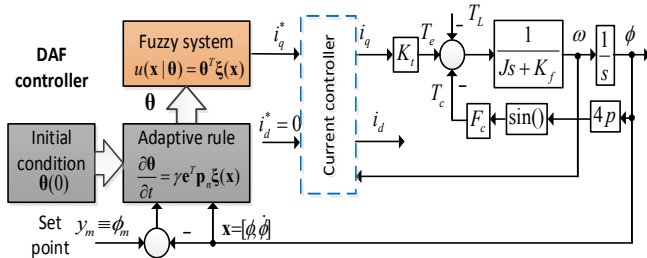
$$PI(s) = \frac{3L}{t_s^i} + \frac{3R}{t_s^i} \times \frac{1}{s} \quad (4)$$

Từ đó, giá trị điều khiển u_d và u_q được xác định theo (4)

$$\begin{cases} u_q(t) = \frac{3R}{t_s^i} \int_0^t (i_q^*(\tau) - i_q(\tau)) d\tau \\ + \frac{3R}{t_s^i} (i_q^*(t) - i_q(t)) + pL\omega(t)i_d(t) + K_t\omega(t) \\ u_d(t) = -\frac{3R}{t_s^i} \int_0^t i_q(\tau) d\tau \\ - \frac{3R}{t_s^i} i_q(t) - pL\omega(t)i_q(t) \end{cases} \quad (5)$$

Thiết kế vòng điều khiển vị trí: Nếu chọn thời gian xác lập của mạch vòng dòng điện rất nhỏ so với thời gian xác lập của mạch vòng tốc độ/mạch vòng vị trí. Điều đó có nghĩa có thể bỏ qua tính quán tính của mạch vòng dòng

điện, khi đó mạch vòng dòng điện được xem như là một khâu khuếch đại. Lúc này, mô hình đối tượng điều khiển sẽ là khâu bậc hai. Các thông số momen lực cân T_L và T_c được coi là nhiễu. Theo [4, 5] thì có thể áp dụng giải thuật điều khiển mờ thích nghi trực tiếp (DAF) cho đối tượng động cơ bước. Việc áp dụng luật điều khiển DAF vào trường hợp này có lợi thế là vẫn có thể điều khiển tốt đối tượng khi tham số J và K_f chưa được xác định rõ ràng.



Hình 4. Vòng điều khiển vị trí sử dụng bộ điều khiển thích nghi trực tiếp DAF

Bộ điều khiển DAF được thiết kế cho đối tượng động cơ bước tổng quát nên các thông số như K_f, J, \dots Theo [4, 5] có thể sử dụng một hệ thống mờ Takagi-Sugeno (T-S fuzzy system) để ước lượng tín hiệu $u(x|\theta)$ xấp xỉ với luật điều khiển tối ưu u^* (chú ý: $x = [x_1, x_2] = []$ là vector trạng thái và θ là vector tập giá trị các luật mờ). Khi đó hệ thống mờ T-S được mô tả bởi luật điều khiển như sau.

Nếu ϕ là SPI và $\dot{\phi}$ là SVJ thì $u_{ij} = \theta_{ij}$

Trong đó SPI ($1 \leq i \leq m$) và SVJ ($1 \leq j \leq n$) lần lượt là các tập mờ của biến $\phi, \dot{\phi}$ và được mờ hóa bởi các hàm thuộc μ_i^ϕ và $\mu_j^{\dot{\phi}}$. Sử dụng luật hợp thành tích, mờ hóa singleton, giải mờ theo phương pháp trung bình trọng số, ta có giá trị đầu ra của hệ mờ theo (6).

$$u(x|\theta) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \theta_{ij} \mu_i^\phi \mu_j^{\dot{\phi}}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \mu_i^\phi \mu_j^{\dot{\phi}}} \quad (6)$$

Định nghĩa: $\theta = [\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_{m \times n}^*]^T$ và $\xi(x) = [\xi_1^*, \xi_2^*, \dots, \xi_{m \times n}^*]^T$

Trong đó:

$$\theta_{(i+m(j-1))}^* = \theta_{ij}; \xi_{(i+m(j-1))}^* = \frac{\mu_i^\phi \mu_j^{\dot{\phi}}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \mu_i^\phi \mu_j^{\dot{\phi}}} \quad (7)$$

Do đó (6) viết gọn lại dưới dạng.

$$u(x|\theta) = \theta^T \xi(x) \quad (8)$$

Với θ là vector thông số của bộ điều khiển mờ và $\xi(x)$ là vector cập nhật thông số. Theo [5] để $u(x|\theta)$ xấp xỉ u^* và hệ thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, thì vector θ được cập nhật theo phương trình (9).

$$\theta(t) = \int_0^t \gamma e^{\gamma(t-\tau)} p_2 \xi(x(\tau)) d\tau + \theta(0) \quad (9)$$

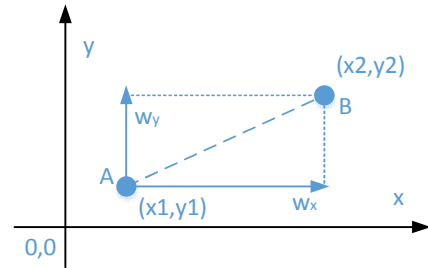
Trong đó γ là hằng số cập nhật dương, p_2 là cột cuối của ma trận $P_{2 \times 2}$ với P thỏa mãn phương trình Lyapunov (10).

$$A^T P + P A = -Q \quad (10)$$

Q là ma trận đối xứng xác định dương.

3.2. Phối hợp chuyển động giữa các bậc tự do

Mỗi một trục dịch chuyển được gắn với truyền động của một động cơ bước. Vì vậy, quỹ đạo chuyển động trong không gian của đầu hàn được hình thành dựa trên sự chuyển động của 3 trục tự do x, y, z . Phương án điều khiển chuyển động là phối hợp chuyển động song song đồng thời hai trục x, y . Trục z của hệ được điều khiển sau khi kết thúc dịch chuyển của hai trục x, y . Thời gian hàn (thời gian tiếp xúc của đầu hàn và điểm hàn) sẽ phụ thuộc vào kiểu dáng mối hàn (diện tích và thể tích mối hàn, kiểu mối hàn...).



Hình 5. Phương, chiều vận tốc của trục x, y

Việc dịch chuyển đầu hàn từ điểm $A(x_1, y_1)$ sang điểm $B(x_2, y_2)$ phải đảm bảo yếu tố hai trục x, y phải dịch chuyển song song đồng thời để rút ngắn thời gian. Phương trình quãng đường trên mặt x, y trong khoảng thời gian Δt như sau:

$$\begin{cases} x = x_2 - x_1 = \int_0^{\Delta t} \omega_x(t) dt \\ y = y_2 - y_1 = \int_0^{\Delta t} \omega_y(t) dt \end{cases}$$

Vận tốc dài của đầu hàn:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_{xy} &= \bar{\omega}_x + \bar{\omega}_y \\ \omega_{xy} &= \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \end{aligned}$$

Trong quá trình thiết kế vận hành thử nghiệm hệ thống Robot hàn sẽ linh hoạt hóa việc lựa chọn phương án phối hợp chuyển động đầu hàn một cách hợp lý để giảm thời gian gia công của máy đồng thời vẫn đảm bảo độ chính xác của quá trình dịch chuyển đầu hàn.

4. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

4.1. Mô tả thiết lập hệ thống

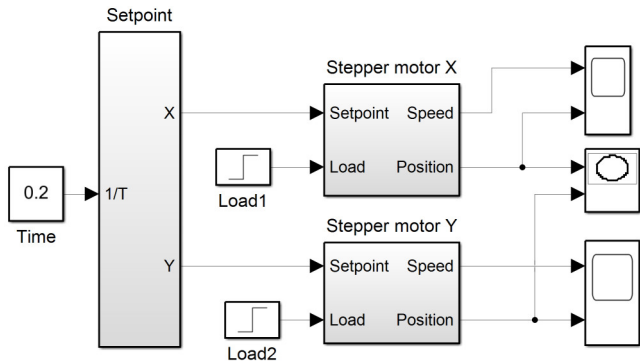
Trong phần mô phỏng hệ thống thực hiện điều khiển phối hợp 2 trục x, y trên mặt phẳng. Tham số mô phỏng hệ thống như sau:

Tham số của động cơ và hệ thống cơ khí: $J = 0,08 \text{kg.m}^2$, $K_f = 3 \text{kg/s.m}$, $R = 3 \Omega$, $L = 0,3 \text{H}$, $K_t = 3 \text{Nm/A}$, $F_c = 6 \text{Nm}$. Hệ thống sử dụng cơ cấu dịch chuyển puli và dây đai, tỷ số chuyển đổi giữa chuyển động quay và chuyển động tịnh tiến là $K = 6 \text{cm}/2\pi$.

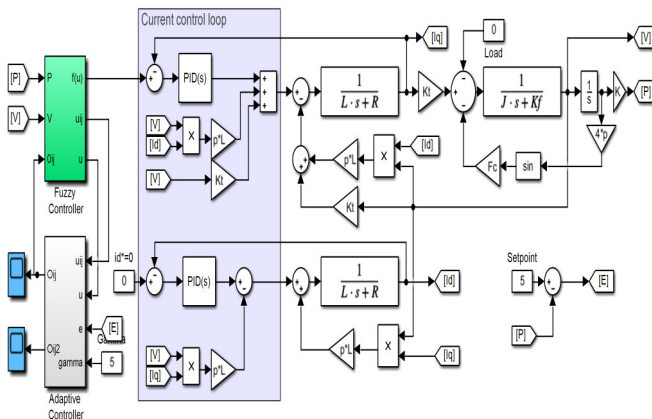
Tham số bộ điều khiển mạch vòng dòng điện: Lựa chọn thời gian xác lập của mạch vòng dòng điện là $t_s^i = 0,1 \text{s}$. Từ (3) có thể tính được tham số bộ điều khiển PI(s) như sau: $K_p = 3L/t_s^i = 9$, $K_i = 3R/t_s^i = 90$.

Tham số bộ điều khiển mạch vòng vị trí: Mạch vòng vị trí sử dụng bộ điều khiển mờ thích nghi trực tiếp. Hai biến đầu vào là giá trị vị trí và đạo hàm vị trí (vận tốc) được mờ hóa bởi 5 tập mờ tam giác đều. Dải giá trị vị trí [0, 400]mm, dải giá trị vận tốc [-800, 800]mm/s. Biến đầu ra sử dụng kiểu tập mờ singleton. Tổng cộng có 25 luật mờ, sử dụng luật hợp thành mờ Max-PRO, giải mờ theo phương pháp trung bình trọng số. Giá trị cài đặt ban đầu cho các luật mờ là $\theta_{ij}(0) = 0, \forall i, j \in [1, 5]$.

Mô hình mô phỏng hệ thống thực hiện trên Matlab&Simulink được thể hiện trên hình 6 và 7.



Hình 6. Sơ đồ mô phỏng hệ thống điều khiển 2 trục X, Y trên Matlab&Simulink



Hình 7. Sơ đồ điều khiển vi bước kiểu tựa hướng từ trường cho stepper motor

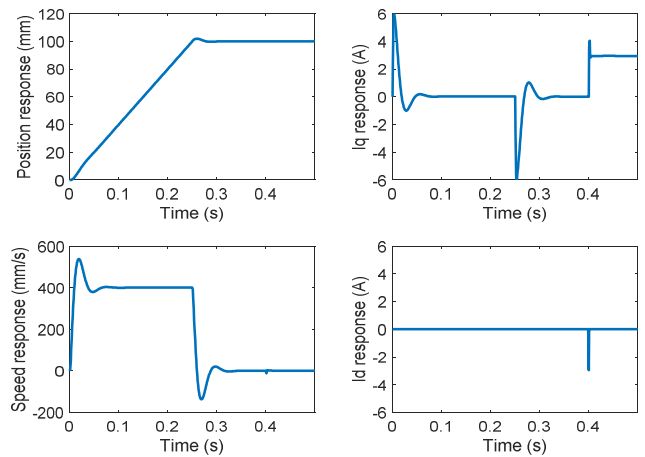
4.2. Kết quả mô phỏng

a) Trường hợp 1: Khảo sát đáp ứng quá độ/sai số tĩnh của stepper motor. Tín hiệu đặt 100mm, hệ thống chịu nhiễu tải 0,2Nm tại thời điểm 0,4s. Kết quả điều khiển cho thấy:

- Hệ làm việc ổn định. Lượng quá điều chỉnh về vị trí $POT = 1,5\%$. Thời gian quá độ $t_s = 0,3s$, như vậy khoảng cách đầu hàn di chuyển trên 1 trục trong 1 giây có thể lên đến 300mm. Sai số tĩnh $e_s = 0,002mm$. Sai số tĩnh khá nhỏ, tuy nhiên đây mới là kết quả mô phỏng lý thuyết, trên thực tế khi triển khai trên một hệ thống thực thì sai số này có thể lớn hơn.

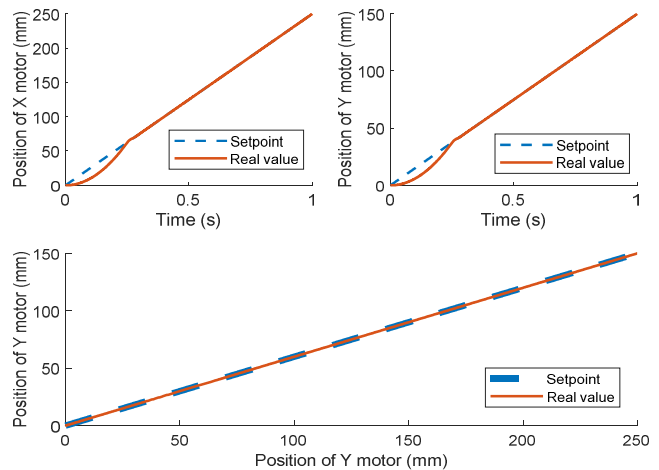
- Tại thời điểm $t = 0,4s$ cho hệ chịu một tác động tải nhiễu 0,2Nm thì phản ứng của dòng điện i_q nhanh làm cho hệ có khả năng chống lại nhiễu tải tốt. Kết quả là đáp ứng vị trí của trục động cơ được giữ nguyên.

- Khả năng điều khiển cặp dòng điện i_q, i_d của bộ điều khiển decoupling tốt. Thời gian xác lập của dòng điện cỡ 0,03s.



Hình 8. Kết quả mô phỏng lý thuyết cho 1 trục tự do của Robot

b) Trường hợp 2: Khảo sát đáp ứng quá độ/sai số tĩnh của hệ thống dịch chuyển đầu mỏ hàn trên mặt phẳng x, y. Mô phỏng trường hợp đầu hàn di chuyển từ điểm gốc tọa độ (0,0) đến điểm (100, 250)mm với điều kiện hai trục x,y di chuyển song song đồng thời. Thời gian cài đặt cho di chuyển mỏ hàn trên phương x, y là 1s. Mức độ nhiễu tải tác động lên trục x là 0,5 Nm tại thời điểm 0,3s và tác động lên trục y là 0,4Nm tại thời điểm 0,6s. Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 9.



Hình 9. Kết quả mô phỏng lý thuyết cho 1 trục tự do của Robot

Kết quả mô phỏng cho thấy đầu hàn di chuyển trên mặt phẳng (x, y) có độ chính xác cao về vị trí và thời gian dịch chuyển. Hướng dịch chuyển của đầu hàn là một đường thẳng. Khả năng khử nhiễu trên hai trục x, y tốt.

5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo này mô tả thực hiện thiết kế hệ thống điều khiển vị trí trên mặt phẳng x,y cho Robot hàn mạch in. Hệ thống sử dụng kỹ thuật điều khiển vi bước theo phương pháp tựa hướng từ trường (FOC) trong vòng dòng điện, sử dụng kỹ thuật điều khiển mờ thích nghi cho mạch vòng vị

trí. Kết quả mô phỏng trong điều kiện một số tham số của đối tượng chưa xác định rõ ràng, vị trí góc của trục động cơ bước vẫn bám theo góc tín hiệu yêu cầu. Việc phối hợp chuyển động song song, đồng thời của hai trục (x, y) tốt. Sai số tính nhỏ. Hướng dịch chuyển là một đường thẳng. Bước tiếp theo của nghiên cứu này là phát triển hệ thống điều khiển vị trí có tốc độ phản ứng dòng nhanh và khảo sát ảnh hưởng của các thông số trong bộ điều khiển DAF như: hệ số cập nhật γ , vector $k...$ lên chất lượng hệ thống. Đồng thời cũng thực hiện triển khai kết quả nghiên cứu này trên một hệ thống thực.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo là sản phẩm của đề tài cấp Bộ mã số 124.2021.ĐT.BO/HĐKHCN. Nhóm tác giả cảm ơn Bộ Công Thương, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ trong quá trình nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ahmet Mehmet Karadeniz, Malek Alkayyali, Peter Tamas Szemes, 2018. *Modelling and Simulation of Stepper Motor for Position Control Using LabVIEW*. Recent Innovations in Mechatronics.
- [2]. K. M. Le, H. Van Hoang, J. W. Jeon, 2017. *An Advanced ClosedLoop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motor*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 9, pp.7244-7255.
- [3]. Chiu-Keng Lai, Jhang-Shan Ciou, Chia-Che Tsai, 2018. *The Modelling, Simulation and FPGA-Based Implementation for Stepper Motor Wide Range Speed Closed-Loop Drive System Design*. MPDI Journal.
- [4]. Ougli A.E., Lagrat I., Boumhidi I, 2008. *Direct Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems*. ICGST-ACSE Journal, Volume 8, Issue II, ISSN 1687-4811.
- [5]. Duc Cuong Quach, Shuang Huang, Quan Yin, Chunjie Zhou, 2013. *An improved direct adaptive fuzzy controller for an uncertain DC Motor Speed Control System*. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering.

AUTHORS INFORMATION

Kieu Xuan Thuc, Nguyen Van Tung, Quach Duc Cuong

Hanoi University of Industry