

COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF MICROCONTROLLERS IN THE APPLICATION OF DC MOTOR SPEED CONTROL USING NON-SINGULAR TERMINAL SLIDING MODE

Nguyen Tan No, Mai Nhat Thien*

Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 13/11/2024	In the DC motor control field, the selection of the control hardware plays a crucial role in achieving optimal control performance. This paper presented a comparison, analysis, and evaluation of the DC motor speed control results using microcontroller units such as TMS320F28379D launchpad development kit board, STM32F407 discovery kit board, Arduino Mega2560 development board. The studied group based on non-singular terminal sliding mode control theory, which significantly reduced chattering and shortened the response time to compare the classical sliding mode method. The programmed control model designed using MATLAB/Simulink software. The microcontrollers programmed with high-order sliding controller with nonlinear sliding surface used in the experiment at speeds lower than 130 (rad/s) with good response and eliminating oscillation effects. However, the TMS320F28379D board has the best response in terms of fast settling time and smallest settling error at the speed of 260 (rad/s). Besides, at this referenced speed, the STM32F407 board also has good response in terms of fast settling time and small settling error. On the contrary, the Mega 2560 board has poor results in terms of settling time and small settling error at the setting speed of 260 (rad/s).
Revised: 29/11/2024	
Published: 30/11/2024	
KEYWORDS	
Microcontroller	
NSTM	
DC motor	
Matlab/Simulink	
Chattering affect	

SO SÁNH HIỆU QUẢ CÁC BỘ VI ĐIỀU KHIỂN TRONG ỨNG DỤNG ĐIỀU CHỈNH TỐC ĐỘ ĐỘNG CƠ DC SỬ DỤNG GIẢI THUẬT TRƯỢT BẬC CAO VỚI MẶT TRƯỢT PHI TUYẾN

Nguyễn Tấn Nó, Mai Nhật Thiên*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 13/11/2024	Trong lĩnh vực điều khiển động cơ điện một chiều, sự lựa chọn phần cứng điều khiển đóng vai trò quan trọng để đạt được hiệu quả điều khiển tối ưu. Bài báo trình bày nội dung so sánh, phân tích, đánh giá hiệu quả điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều của các bộ vi điều khiển như bo mạch phát triển TMS320F28379D, bo mạch STM32F407, bo mạch phát triển Mega2560. Nhóm nghiên cứu dựa vào lý thuyết điều khiển trượt bậc cao với mặt trượt phi tuyến, nó giúp làm giảm đáng kể hiện tượng dao động và rút ngắn thời gian đáp ứng so với phương pháp điều khiển trượt cổ điển. Điều khiển lập trình mô hình được thiết kế trên phần mềm MATLAB/ Simulink. Các bộ vi điều khiển được lập trình với bộ điều khiển trượt bậc cao với mặt trượt phi tuyến được sử dụng trong thí nghiệm với tốc độ thấp hơn 130 (rad/s) có đáp ứng tốt và loại bỏ ảnh hưởng dao động. Tuy nhiên, bo mạch TMS320F28379D đáp ứng tốt nhất về thời gian xác lập nhanh và sai số xác lập nhỏ nhất tại tốc độ 260 (rad/s). Bên cạnh đó, tại tốc độ này, bo mạch STM32F407 cũng đáp ứng tốt về thời gian xác lập nhanh và sai số xác lập nhỏ. Ngược lại, bo mạch Mega 2560 có kết quả không tốt về thời gian xác lập là sai số xác lập nhỏ tại tốc độ đặt 260 (rad/s).
Ngày hoàn thiện: 29/11/2024	
Ngày đăng: 30/11/2024	
TỪ KHÓA	
Vi điều khiển	
Bộ điều khiển NSTM	
Động cơ điện một chiều	
Matlab/simulink	
Ảnh hưởng dao động	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11547>

* Corresponding author. Email: thienmn@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Động cơ điện một chiều (động cơ DC) được sử dụng rộng rãi trong robot và thiết bị điện. Do đó, việc kiểm soát tốc độ của động cơ DC rất quan trọng và đã được nghiên cứu từ những thập kỷ trước. Nhìn chung, các hệ thống động cơ DC có đặc điểm không chắc chắn và phi tuyến dẫn đến làm giảm hiệu suất của bộ điều khiển [1]. Có nhiều phương pháp điều khiển tốc độ động cơ điện đã được nghiên cứu với các ngoại vi của các bo điều khiển như TMS320F, Mega2560, STM32F4xx, Raspberry pi... Thông qua ứng dụng thuật toán điều khiển PID được sử dụng rộng rãi bởi sự đơn giản, độ tin cậy. Tuy nhiên, quá trình xử lý điều chỉnh là khó khăn cho việc không thể điều chỉnh các thông số quy ước thuật toán PID [2]. Để cải thiện hiệu quả các bộ điều khiển PID, một số phương pháp đề xuất như bộ điều khiển trạng thái mờ (FLC) [3], bộ mạng nơ ron nhân tạo lan truyền ngược (RBF neural network) [4], điều khiển mô hình dự đoán [5]...

Điều khiển trượt (SMC) là phương pháp đã được sử dụng ngày càng nhiều trong các thuật toán ước điều khiển hệ thống bất định [6]. SMC có những ưu điểm nổi bật so với các phương pháp khác, chẳng hạn như độ nhạy thấp đối với các tham số hệ thống và khả năng chống nhiễu mạnh. Tuy nhiên, hiện tượng chattering và điểm kỳ dị hạn chế các ứng dụng thực tế của điều khiển chế độ trượt thông thường [7]. Có nhiều nghiên cứu khắc phục nhược điểm của điều khiển trượt được đề xuất như: thay đổi hàm Sign trong mặt trượt thành hàm Saturation, thay thế mặt trượt tuyến tính thành mặt trượt phi tuyến, kết hợp điều khiển trượt với các lý thuyết điều khiển tối ưu [8]. Trong đó, nổi bật nhất là phương pháp điều khiển trượt với mặt trượt Nonsingular Terminal Sliding Mode (NTSM), ý tưởng thiết kế mặt trượt phi tuyến với hàm mũ của biến trạng thái, làm tránh được điểm kỳ dị, giảm đáng kể hiện tượng chattering và rút ngắn thời gian hội tụ của biến trạng thái [9]. Do sự phức tạp của mặt trượt, đòi hỏi khối lượng tính toán đáng kể trong một chu kỳ thời gian lấy mẫu điều khiển, chọn bộ điều khiển có lý thuyết điều khiển NSTM là một phương pháp tối ưu.

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển khoa học công nghệ, đặc biệt là công nghệ bán dẫn, tốc độ xử lý, tính toán của các bộ điều khiển ngày càng được cải thiện. Vi điều khiển xử lý được những câu lệnh tính toán phức tạp hơn, đồng thời số lượng ngoại vi tích hợp ngày càng phong phú, làm cho khả năng xử lý của các đối tượng ngày càng mang tính thời gian thực [10]. Trong các bộ điều khiển nhúng hiện nay, nổi bật nhất là bộ điều khiển Mega 2560, STM32F4 và TMS320F được lựa chọn nhiều nhất trong các hoạt động nghiên cứu, vì giá thành thấp và khả năng lập trình linh hoạt, tương thích với nhiều ứng dụng điều khiển, dễ dàng thiết kế, tích hợp [11], [12]. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu so sánh mức độ đáp ứng của các bộ vi điều khiển trong lý thuyết điều khiển cấp cao, cần thời gian tính toán lớn trong thời gian ngắn, do đó mặt trượt Nonsingular Terminal Sliding Mode (NSTM) được lựa chọn, mặt trượt NTSM được ứng dụng nhiều trong điều khiển tốc độ động cơ, và các mô hình chuyển động khác, kết quả nghiên cứu là cơ sở để xác minh tính khả dụng của thiết bị điều khiển nhúng trong các lý thuyết điều khiển phức tạp, đòi hỏi thời gian tính toán ngắn.

2. Phương pháp

2.1. Mô hình động cơ điện

Mạch điện của phần ứng và sơ đồ chuyển động quay tự do của động cơ DC được trình bày như Hình 1. Áp dụng định luật Kirchhoff cho phần điện và định luật II Newton cho phần cơ, phương trình tương đương của động cơ DC:

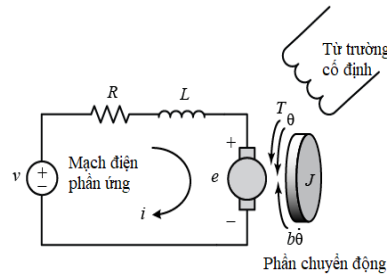
$$\begin{cases} L \dot{i} + Ri + e = v \\ T - b\omega = J\dot{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

K_m : hằng số cơ; K_e : hằng số điện; L : độ tự cảm; R : điện trở stator; v : điện áp cung cấp cho mạch phần ứng (stator); điện áp back-emf $e = K_e \cdot i$; momen điện $T = K_m \cdot i$; b : hệ số ma sát nhớt; J : momen quán tính trục rotor; ω : tốc độ rotor.

Từ hệ phương trình (1), ta xác định được đạo hàm gia tốc góc:

$$\ddot{\omega} = -\frac{(JR+bL)}{JL}\dot{\omega} - \frac{(K_m K_e + bR)}{JL}\omega + \frac{K_m}{JL}v \quad (2)$$



Hình 1. Sơ đồ mạch điện phản ứng và phản quay động cơ DC [2]

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

Sai số giữa giá trị tốc độ tham chiếu và giá trị thực tế được xác định

$$e_1 = \omega_{ref} - \omega \Rightarrow e_2 = \dot{e}_1 = \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega} \quad (3)$$

Phương trình sai số:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \delta_1 & \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_3 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó:

$$\varepsilon = \ddot{\omega}_{ref} - \delta_2 \dot{\omega}_{ref} - \delta_1 \omega_{ref}; \delta_1 = -\frac{(K_m K_e + bR)}{JL}; \delta_2 = -\frac{(JR+bL)}{JL}; \delta_3 = \frac{K_m}{JL}$$

Mặt trượt NTSM được chọn như [9]:

$$s = e_1 + \gamma e_2^{p/q} \quad (5)$$

Trong đó: γ là hằng số để thiết kế bộ điều khiển ($\gamma > 0$), p và q là những số dương lẻ thỏa điều kiện $p > q$ và $1 < p/q < 2$.

Nếu mặt trượt NTSM được chọn như biểu thức (5), tín hiệu điều khiển được tính toán như biểu thức (6) thì sai số tốc độ (3) có thể đạt được $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0$ ở thời gian hữu hạn, và duy trì ở mặt trượt $s = 0$, tín hiệu điều khiển được chọn:

$$v = v_n + v_{eq} \text{ với } v_n = -\frac{1}{\delta_3} \left(\varepsilon + \delta_1 e_1 + \delta_2 e_2 + \frac{q}{p\gamma} e_2^{(2-\frac{p}{q})} \right), v_{eq} = -k \text{sign}(s) \quad (6)$$

Chứng minh:

Xét hàm Lyapunov $V = 0.5S^2$.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \dot{V} &= S\dot{S} = S \left(\dot{e}_1 + \frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} \dot{e}_2 \right) = S \frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} \left(\dot{e}_2 + \frac{q}{p\gamma} e_2^{(2-\frac{p}{q})} \right) \\ \Rightarrow \dot{V} &= S\dot{S} = S \frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} \left(\varepsilon + \delta_1 e_1 + \delta_2 e_2 + \delta_3 (v_n + v_{eq}) + \frac{q}{p\gamma} e_2^{(2-\frac{p}{q})} \right) \\ &= S \frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} (-\delta_3 k \text{sign}(s)) = \frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} \delta_3 (-k \|s\|) \end{aligned}$$

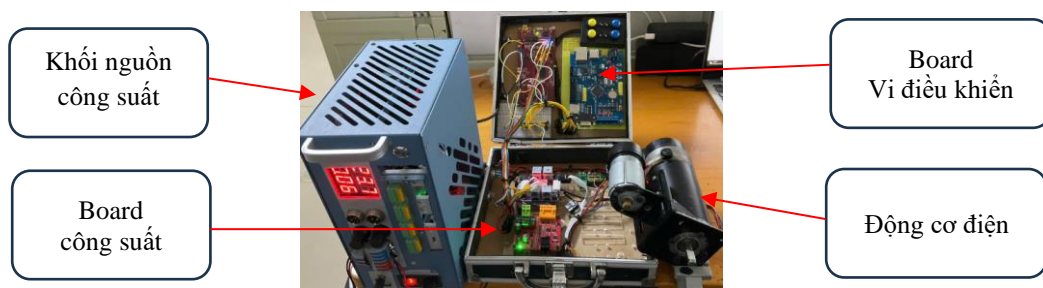
Vì giá trị: $\frac{p\gamma}{q} e_2^{(\frac{p}{q}-1)} \delta_3 > 0$. Khi đó, thông số hiệu chỉnh k được chọn sao cho: $-k \|s\| \leq 0$.

Vì thế ta được: $\dot{V} \leq -k \|s\| < 0$ Khi $\|s\| \neq 0$

Điều này có nghĩa là sai số tốc độ ở phương trình (3) đạt được mặt trượt $s = 0$ ở thời gian hữu hạn, và cả hai biến trạng thái $e_1, e_2 \rightarrow 0$ ở thời gian hữu hạn.

2.3. Xây dựng mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm được xây dựng trên 3 bộ điều khiển khác nhau (Mega2560, STM32F407, TMS320F28379), dùng chung một hệ điều khiển động cơ bao gồm: board công suất IRF3205-36V/30A, nguồn một chiều DC có thể hiệu chỉnh được 30V-15A.

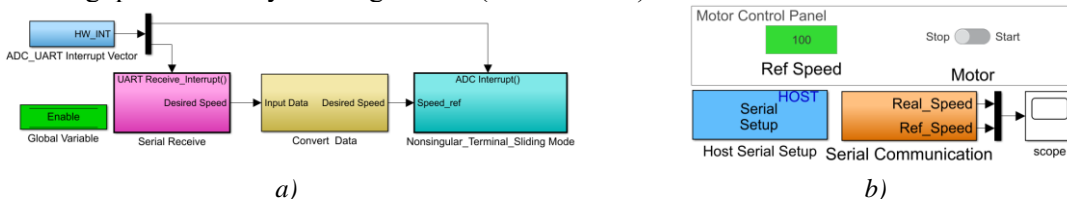


Hình 2. Mô hình thực nghiệm

Chương trình điều khiển được chia làm hai phần:

- **Phần 1 (Hình 3a):** phần biên dịch nạp vào vi điều khiển, trong phần này ngoài các khối cơ bản tính toán số sẵn trong Matlab/Simulink để thiết kế lý thuyết điều khiển trượt dựa trên mặt trượt NTSM, phần này còn bao gồm các khối ngoại vi được tích hợp cài đặt thêm trong môi trường Simulink.

- **Phần 2 (Hình 3b):** phần dùng để điều khiển phần cứng từ máy tính khi sử dụng phần mềm Matlab/Simulink, khối chương trình này làm nhiệm vụ truyền giá trị tốc độ tham chiếu, tín hiệu khởi động hệ thống điều khiển, đồng thời nhận tín hiệu giá trị tốc độ động cơ đo được từ vi điều khiển thông qua chuẩn truyền thông UART (38400 bauds).



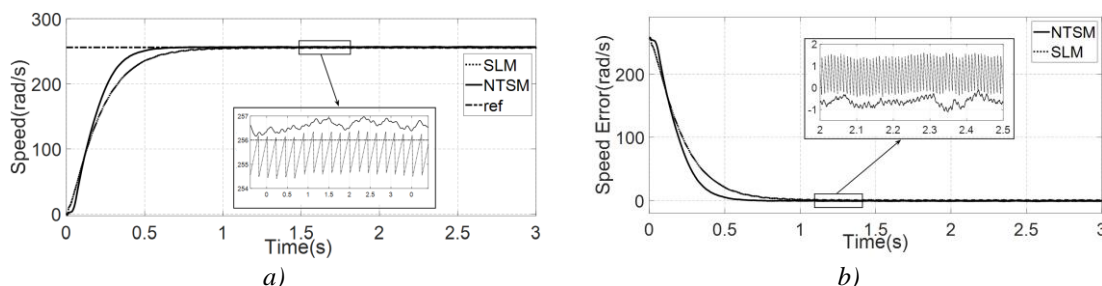
Hình 3. Sơ đồ khối phần chương trình thực nghiệm:
a) Phần biên dịch nhúng vào vi điều khiển, b) Phần điều khiển

3. Kết quả

Kết quả thực nghiệm được thực hiện trên động cơ có thông số như Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của động cơ thực nghiệm

Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị	Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Điện trở động cơ	R	1,6	Ω	Điện áp định mức	U	24	V
Độ tự cảm động cơ	L	5,2	mH	Hệ số back emf	K	0,011	V/rpm
Momen quán tính	J	4,3e-4	Kg.m ²	Encoder		200	Xung/vòng
Tốc độ định mức	ω	3200	rpm	Hệ số giảm chấn	b	0,5e-5	N*m/(rad/s)



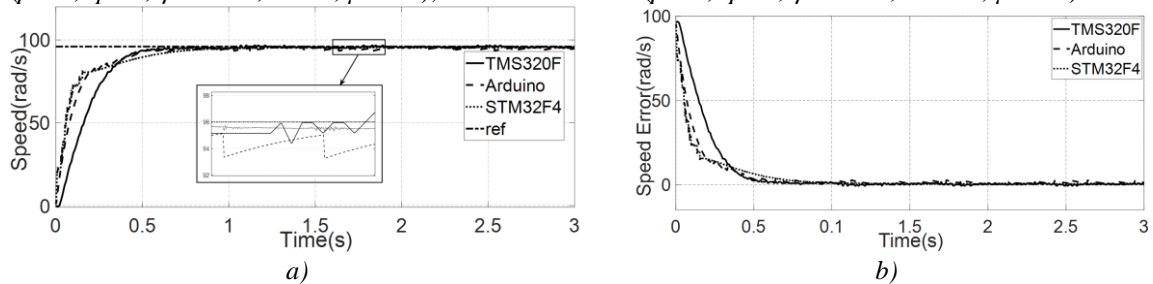
Hình 4. Đáp ứng tốc độ động cơ khi điều khiển với hai mặt trượt khác nhau:
a) Tốc độ động cơ; b) Sai số tốc độ động cơ

Để chứng minh được phương pháp trượt dựa trên mặt trượt NTSM có khả năng loại bỏ chattering so với phương pháp trượt cổ điển. Mô hình thực nghiệm được thực hiện trên bộ điều

kiểm TMS320F28379, tốc độ tham chiếu 260 (rad/s), với thông số bộ điều khiển trượt NTSM: $p = 5; q = 3; \gamma = 0,001, k = 120; \mu = 0,6$; thông số bộ trượt cổ điển $k = 54$.

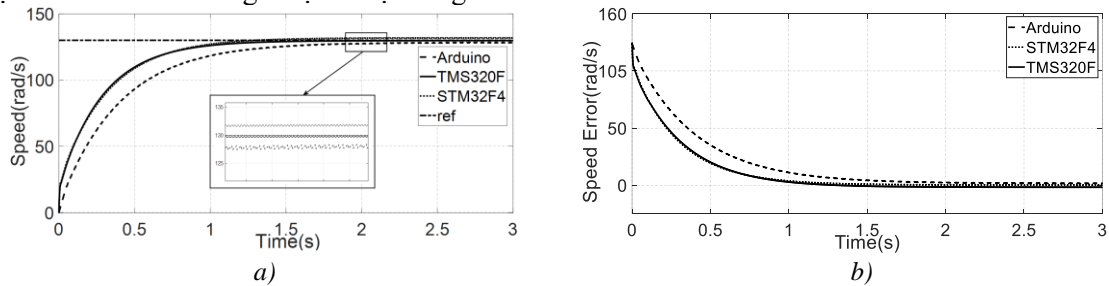
Kết quả thể hiện phương pháp điều khiển trượt sử dụng mặt trượt NTSM như Hình 4 loại bỏ đáng kể hiện tượng chattering của lý thuyết điều khiển trượt cổ điển, đồng thời rút ngắn thời gian đáp ứng (khoảng 0,7s) so với phương pháp trượt cổ điển là 1s.

Để chứng minh được khả năng điều khiển các bộ vi điều khiển, phương pháp thực nghiệm được thực hiện bằng cách cho tốc độ động cơ chạy với ba cấp tốc độ khác nhau với cùng một thông số của bộ điều khiển, trên cùng một board công suất, nguồn cấp và động cơ được trình bày như Hình 5. Với các thông số điều khiển board Mega2560 ($p = 7, q = 5, \gamma = 0.03, k = 530, \mu = 1.4$), STM32F407 ($p = 5, q = 3, \gamma = 0.005, k = 78, \mu = 3.2$), TMS320F28379 ($p = 5, q = 3, \gamma = 0.001, k = 120, \mu = 0.6$).



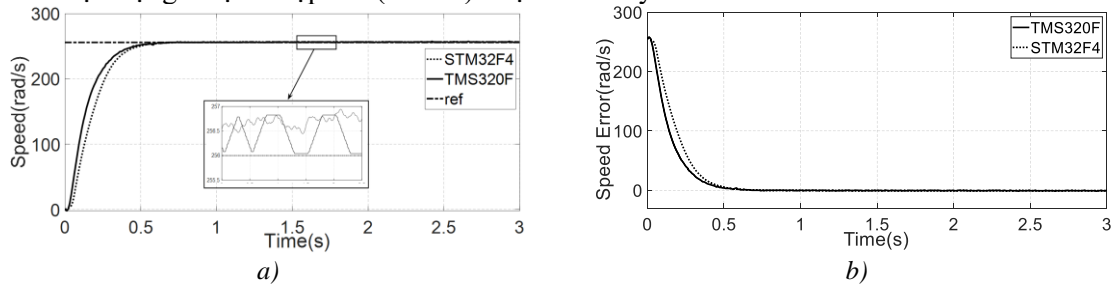
Hình 5. Đáp ứng tốc độ động cơ ở tốc độ thấp (98 rad/s): a) Tốc độ động cơ, b) Sai số tốc độ động cơ

Khi giá trị tốc độ đặt 98 (rad/s) ta thấy cả ba bộ điều khiển đều có kết quả đáp ứng tốt như Hình 6, trong đó bộ điều khiển sử dụng Arduino Mega2560 (đường nét gạch ngang) có sai số xác lập lớn nhất (khoảng 5 rad/s), nhưng đạt được thời gian xác lập tương đối nhanh, bộ điều khiển STM32F407 (đường nét chấm) có sai số xác lập nhỏ hơn và thời gian xác lập giống với bộ điều khiển Arduino, bộ điều khiển TMS320F28379 (đường nét liền) có sai số xác lập nhỏ nhất và giá trị điều khiển bám sát giá trị tốc độ mong muốn.



Hình 6. Đáp ứng tốc độ động cơ ở tốc độ thấp (130 rad/s): a) Tốc độ động cơ, b) Sai số tốc độ động cơ

Khi giá trị tốc độ đặt 130 (rad/s) ta thấy bộ điều khiển STM32F407 (đường nét chấm) và TMS320F28379 (đường nét liền) đều đáp ứng tốt, với thời gian xác lập nhanh và sai số xác lập nhỏ, trong khi bộ điều khiển Arduino (đường nét gạch ngang) có thời gian xác lập tương đối lớn và tồn tại một giá trị xác lập lớn (3 rad/s) được trình bày như Hình 7.



Hình 7. Đáp ứng tốc độ động cơ ở tốc độ thấp (260 rad/s): a) Tốc độ động cơ, b) Sai số tốc độ động cơ

Để điều khiển động cơ DC với giá trị tốc độ đặt 260 (rad/s), bo STM32F407 sử dụng chức năng DMA (Data Memory Access) và bo TMS320F28379 có module Quadencoder cho phép đọc xung tốc độ cao, do đó còn khả năng điều khiển đáp ứng tốt. Kết quả cho thấy cả hai có khả năng điều khiển tốc độ đạt đáp ứng ở thời gian 0.6 (s), đồng thời sai số xác lập rất nhỏ (khoảng 2 rad/s), hiện tượng chattering gần như bị triệt tiêu. Ngoài trừ, bo Mega 2560 không thể điều khiển với đáp ứng giá trị đặt 260 (rad/s).

4. Kết luận

Trong bài báo này trình bày kết quả so sánh của ba bộ điều khiển Mega 2560, STM32F407, TMS320F28379 trong ứng dụng điều khiển tốc độ động cơ điện, sử dụng lý thuyết điều khiển trượt dựa trên mặt trượt phi tuyến NTSM. Kết quả nghiên cứu chứng minh cả ba bộ điều khiển đều đáp ứng tốt với mặt trượt mới, loại bỏ được hiện tượng chattering khi điều khiển động cơ với tốc độ thấp (<130 rad/s). Bên cạnh đó, khi điều khiển ở tốc độ cao thì bo TMS320F28379 tỏ ra vượt trội hơn do tích hợp nhiều ngoại vi chuyên xử lý cho chức năng đặc thù (eQEP). Ngoài ra, việc sử dụng tính năng DMA cũng là giải pháp để tối ưu thời gian xử lý của vi điều khiển. Vì vậy, các ứng dụng điều khiển với các phương pháp điều khiển hiện đại với độ chính xác cao thì chọn bo TMS320F28379D hoặc STM32F407. Bên cạnh đó, các yêu cầu điều khiển hiện đại không cần độ chính xác cao thì sử dụng bo Mega2560 với chi phí thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. A. Ridzuan and H. A. Rahman, "Real Time Comparison between PID and Fuzzy Logic Controller for DC Motor Speed Control," *Evolution in electrical and electronic engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 512-520, 2024.
- [2] H. Sun, "The Design of the DC Servo Motor Controller Based on Fuzzy Immune PID Algorithm," *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, 2017, pp. 4724-4729.
- [3] W. Gubara, M. Elnaim, and S. Babiker, "Comparative study on the speed of DC motor using PID and FLC," *Conference of Basic Sciences and Engineering Studies (SGCAC)*, February 2016, pp. 24-29.
- [4] M. Farrag, C. S. Lai, and M. Darwish, "A Comparison of PI and RBF Brushless DC Motor Speed Control Methods," *58th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Dublin, Ireland, 2023, pp. 1-5.
- [5] H. Wu, L. Zhang, J. Yang, and S. Li, "Model predictive control for DC-DC buck power converter-DC motor system with uncertainties using a GPI observer," *36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, China, 2017, pp. 4906-4911.
- [6] S. Heidarpour, M. Tabatabaei, and H. Khodadadi, "Speed control of a DC motor using a fractional order sliding mode controller," *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Milan, Italy, 2017, pp. 1-4.
- [7] Z. Li, F. Wang, D. Ke, J. Li, and W. Zhang, "Robust Continuous Model Predictive Speed and Current Control for PMSM with Adaptive Integral Sliding-Mode Approach," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 14398-14408, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3086636.
- [8] S. J. Abbasi and M. C. Lee, "Chattering reduction by using Proportional derivative sliding surface in Sliding mode control (PDSMC)," *2018 International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT)*, Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICT-ROBOT.2018.8549911.
- [9] L. Tienan, W. Yanmin, and D. Bao, "Free-chattering non-singular terminal sliding mode control of permanent-magnet synchronous motor with Luenberger observer," *35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, China, 2016, pp. 3457-3462.
- [10] K. J. Suresh and K. V. Amrut, "Low cost high performance microcontroller based semiconductor device tester," *2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad, India, 2013, pp. 1-5.
- [11] A. A. Pop, "Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS," *MDPI Journal of Sensors*, vol. 22, no. 14, pp. 1-14, 2022.
- [12] M. I. Saputra, S. R. Sulistiyanti, S. Purwiyanti, and U. Murdika, "Design of Prototype Measuring Motor Vehicles Velocity Using Hall Effect Sensor Series A-1302 based On Arduino Mega2560," *2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*, Lombok, Indonesia, 2020, pp. 66-69.