

Điều khiển vị trí tủ lưu trữ di động trong hệ thống lưu trữ thông minh Designing a position control of moving shelf in the smart storage system

Phạm Quang Đăng¹, Trần Việt Thắng¹, Nguyễn Trọng Hoàng¹, Nguyễn Quang Địch^{1*}

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

*E-mail: dich.nguyenquang@hust.edu.vn

Abstract

This paper introduces the research results on a method of designing a control of moving shelf in the smart storage system using a brushless DC motor (BLDC) to ensure that the shelf's movement is smooth, collision-free and not overturned. After an overview of the mathematical model and control method for the BLDC motor based on the Hall sensors, the paper focused on presenting the design of the speed and the position control in cascade control system, in which the influence of maximum and minimum speed and acceleration is considered. To be able to evaluating of the introduced control method, an experimental model of a shelf drive system using a BLDC was built, in which the STM32 microcontroller was used to program the controllers, calculate the traveled distance and send the control signal to the motor drives. Experiments have been carried out without acceleration limiter and with acceleration limiter when different gain coefficients are applied. Experimental results show that the selection of the reasonable position controller parameter in the case of acceleration limiter will give the best results.

Keywords: BLDC, PID, Mobile Storage System, STM32.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
R	Ω	Điện trở cuộn dây Stator
L	H	Điện cảm cuộn dây Stator
M	H	Hỗ cảm
V	V	Điện áp
i	A	Dòng điện
e	V	Sức phản điện động
ω_m	rad/s	Tốc độ góc của trục động cơ
J	Kg. m ²	Mô-men quán tính
T_L	Nm	Mô-men tải
T_{em}	Nm	Mô-men điện từ
B	Nm. s	Hệ số ma sát
K_e		Hệ số sức phản điện động
$G(s)$		Hàm truyền của động cơ
K_p		Hệ số khuếch đại
T_I		Thời gian tích phân
T_D		Thời gian vi phân

Chữ viết tắt

BLDC	Brushless Direct Current Motor (Động cơ một chiều không chổi than)
PID	Bộ điều khiển PID
VDC	Điện áp một chiều
VAC	Điện áp xoay chiều

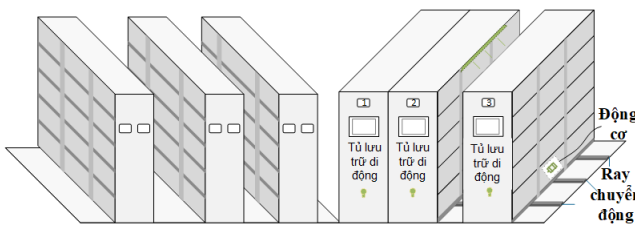
Tóm tắt

Bài báo này giới thiệu kết quả nghiên cứu về một phương pháp thiết kế hệ điều khiển di chuyển giá chứa tài liệu trong hệ thống lưu trữ thông minh sử dụng động cơ một chiều không chổi than (BLDC) nhằm đảm bảo các giá chứa tài liệu chuyển động êm, không va chạm và không bị lật. Sau phần giới thiệu tổng quan về mô hình toán học và phương án điều khiển cho động cơ BLDC dựa trên thông tin từ cảm biến Hall, bài báo đã tập trung vào trình bày thiết kế bộ điều khiển tốc độ và điều khiển vị trí trong hệ truyền động di chuyển của giá chứa tài liệu sử dụng cấu trúc hai mạch vòng, trong đó có tính đến ảnh hưởng của tốc độ và gia tốc làm việc. Để có thể đánh giá được chất lượng của phương án điều khiển nêu trên, mô hình thực nghiệm hệ truyền động giá chứa tài liệu sử dụng động cơ BLDC được xây dựng, trong đó vi điều khiển STM32 được sử dụng để lập trình các bộ điều khiển, tính toán quỹ đạo di chuyển và đưa tín hiệu điều khiển đến điều khiển động cơ. Thực nghiệm đã được triển khai với các trường hợp khi không có khâu hạn chế gia tốc và có khâu hạn chế gia tốc với các hệ số khuếch đại khác nhau. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc lựa chọn tham số bộ điều khiển vị trí trong trường hợp cần khống chế gia tốc hợp lý sẽ cho kết quả tốt nhất.

1. Giới thiệu chung

Ngày nay, công nghệ số phát triển rất nhanh và dữ liệu số đã và đang thay thế các đối tượng thực mang thông tin như tài liệu, sổ sách, giấy tờ,... Tuy nhiên, một số tài liệu đặc biệt như tài liệu lịch sử, tài liệu quan trọng của doanh nghiệp hoặc quốc

gia,... không chỉ được chuyển đổi sang dữ liệu số mà bản gốc của nó còn cần được bảo quản cẩn thận trong các phòng lưu trữ. Khi số lượng tài liệu cần lưu trữ ngày càng nhiều, các hệ thống lưu trữ tĩnh trở nên kém hiệu quả hơn vì nó chiếm nhiều diện tích trong các phòng lưu trữ. Vì lý do này, hệ thống lưu trữ di động đã được nghiên cứu và phát triển từ những năm 60 của thế kỷ 20. Hệ thống lưu trữ di động có thể tiết kiệm đến 50 - 75% không gian lưu trữ, vì thiết kế đặc biệt của nó. Hệ thống lưu trữ di động là một hệ thống lưu trữ mật độ cao đặt các giá đỡ có thể di chuyển, giá đỡ được xây dựng trên các bánh xe sau đó được đặt trên các đường ray gắn trên sàn. Các tủ lưu trữ di động di chuyển dọc theo đường ray, di chuyển sát nhau giúp tiết kiệm diện tích. Khi điều khiển bằng điện hoặc bằng tay quay trên giá di động, tủ lưu trữ di động sẽ di chuyển tạo thành một lối đi đủ rộng để tạo không gian làm việc [1]. Hình 1 chỉ ra hệ thống lưu trữ tĩnh và hệ thống lưu trữ thông minh.



Hình 1: Hệ thống lưu trữ tĩnh (trái) và hệ thống lưu trữ thông minh (phải)

Cấu trúc đầu tiên của hệ thống lưu trữ được giới thiệu có dạng cấu trúc thuần cơ khí [2]. Thông qua cấu trúc này thì hệ thống lưu trữ đã trở nên gọn gàng hơn và giảm được khoảng không trống giữa hai giá. Tuy nhiên với một số lượng lớn giá trên cùng dãy thì việc di chuyển đến giá chứa tài liệu đang tìm thực sự và điều khá vất vả cho người vận hành.

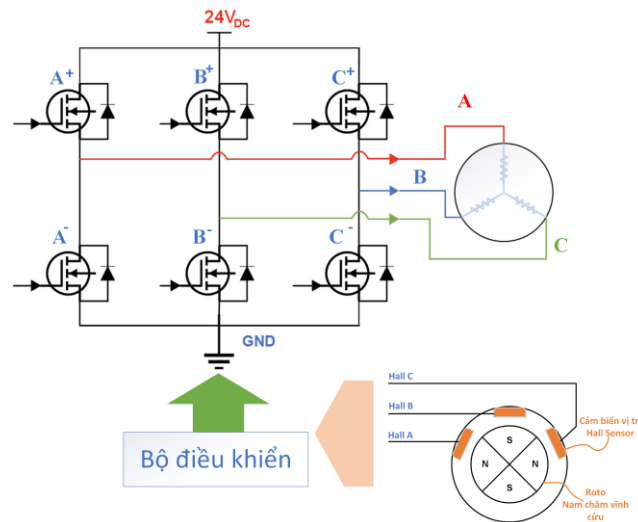
Để khắc phục nhược điểm này, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc ứng dụng động cơ điện cho việc di chuyển các giá. Một số công trình điển hình mô tả cung cấp điện điều khiển được thể hiện như trong [3]-[5]. Tuy nhiên, phần điện của những hệ thống này có cấu trúc khá đơn giản. Trên mỗi tủ được trang bị hai cảm biến tiệm cận được gắn ở bên trái và phải giúp xác định hành trình của mỗi tủ. Hệ thống được cấp điện thông qua các tiếp điểm. Các công tắc hai chiều dùng để điều khiển động cơ dẫn động các tủ di chuyển sang bên phải và bên trái.

Ngày nay, các bộ biến đổi điện tử công suất ngày càng phát triển và đặc biệt khi các dòng chip vi điều khiển cấu hình mạnh ra đời đã thúc đẩy cuộc cách mạng tự động hóa phát triển vượt bậc cho hệ thống lưu trữ thông minh. Bài báo sẽ trình bày thiết kế và thực hiện bộ điều khiển tốc độ kiểu PID cho điều khiển tốc độ vòng kín của động cơ một chiều không chổi than đồng bộ [6]-[8] thời tính toán và điều khiển quãng đường di chuyển của tủ lưu trữ di động trên hệ thống tủ lưu trữ thông minh bằng cách sử dụng tín hiệu từ cảm biến Hall kết hợp với bộ điều khiển tỷ lệ. Ngoài ra, vi điều khiển STM32 được chọn để lập trình bộ điều khiển PID và tính toán quãng đường di chuyển và đưa tín hiệu điều khiển đến trình điều khiển động cơ. Thực nghiệm đã được kiểm chứng bởi một số trường hợp. Kết quả thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển vị trí và bộ điều khiển tốc độ tương ứng hoạt động tốt trong việc theo dõi điều khiển tốc độ và tủ di chuyển đúng với quãng đường đề ra.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Mô hình toán học động cơ BLDC

Nguyên lý hoạt động của động cơ BLDC dựa trên lực tương tác của từ trường do stator tạo ra và nam châm vĩnh cửu trên rotor. Khi dòng điện chạy qua một trong ba cuộn dây stator sẽ tạo ra cực từ hút những nam châm vĩnh cửu gần nhất có cực từ trái dấu. Rotor sẽ tiếp tục chuyển động nếu dòng điện dịch chuyển sang một cuộn dây liền kề. Cấp điện tuần tự cho mỗi cuộn dây sẽ làm cho rotor quay theo từ trường quay. Hình 2 chỉ ra nguyên lý mạch lực của điều khiển động cơ BLDC.



Hình 2: Nguyên lý mạch lực hệ điều khiển động cơ BLDC

Động cơ được điều khiển quay thuận/ngược dựa trên các cảm biến Hall, được gắn trên stato động cơ. Các tín hiệu cảm biến Hall được quét và gửi đến bộ điều khiển để đưa ra các tín hiệu chuyển mạch cho các van MOSFET trên mạch cầu 3 pha.

Động cơ BLDC thực nghiệm được trang bị 3 cảm biến Hall để xác định vị trí của Rotor. Dựa trên vị trí phân bố của các cảm biến Hall trên mô hình thực tế, động cơ có các cảm biến Hall “A”, “B”, “C”, được gắn ở trên vỏ động cơ tương ứng lệch nhau 60°. Dây quấn Stator của động cơ được nối theo dạng hình sao. Dây quấn Stator của động cơ được nối theo dạng hình sao. Ứng với mỗi góc quay 60° của Rotor thì một cảm biến Hall trong hệ thay đổi trạng thái và cần 6 lần chuyển mạch để kết thúc một chu kỳ tín hiệu [10]. Bảng 1 chỉ ra thứ tự chuyển mạch các van bán dẫn dựa trên nguyên lý điều khiển bằng cách sử dụng cảm biến hall xác định vị trí rotor trong động cơ BLDC 3 pha quay chuyển động theo chiều ngược chiều kim đồng hồ.

Bảng 1: Giải mã thứ tự chuyển mạch cho động cơ BLDC thực nghiệm

Thứ tự	Cảm biến Hall			Pha dẫn					
	A	B	C	A ⁺	A ⁻	B ⁺	B ⁻	C ⁺	C ⁻
1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0	1	0	0	1
3	0	1	0	0	1	1	0	0	0
4	0	1	1	0	1	0	0	1	0
5	0	0	1	0	0	0	1	1	0
6	1	0	1	1	0	0	1	0	0

Giả sử pha A và B đang dẫn. Các phương trình dòng điện [9] của pha A và B có thể biểu diễn:

$$\begin{aligned} i_a &= -i_b = i \\ \frac{di_a}{dt} &= -\frac{di_b}{dt} = \frac{di}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

Do đó, điện áp giữa 2 pha A, B được viết như sau:

$$v_{AB} = 2 \cdot R \cdot i + 2 \cdot (L - M) \cdot \frac{di}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2)$$

Mỗi khi pha A và B dẫn, giá trị của chúng là bằng nhau, nhưng ngược dấu. Vì vậy, phương trình (2) được viết lại:

$$v_{AB} = 2 \cdot R \cdot i + 2 \cdot (L - M) \cdot \frac{di}{dt} + 2 \cdot e \quad (3)$$

Nói chung, khi động cơ BLDC hoạt động, có hai trong ba pha luôn dẫn. Vì vậy, phương trình tổng quát có thể được biểu thị như sau:

$$V_d = r_a \cdot i + L_a \cdot \frac{di}{dt} + K_e \cdot \omega \quad (4)$$

Với

V_d : Điện áp một chiều DC.

r_a : điện trở dây quấn, $r = 2 \cdot R$

L_a : điện cảm dây dẫn tương đương, $L_a = 2 \cdot (L - M)$

K_e : hệ số phản điện động, $K_e = 2 \cdot p \cdot \psi_m$

Phương trình Momen của động cơ:

$$\begin{aligned} T_e - T_l &= J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \\ T_e &= K_T \cdot i \end{aligned} \quad (5)$$

Ở chế độ không tải, dòng điện phản ứng được tính là,

$$i = \frac{J}{K_T} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{B \cdot \omega}{K_T} \quad (6)$$

Từ phương trình (4) và (5),

$$\begin{aligned} V_d &= r_a \cdot \left(\frac{J}{K_T} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{B \cdot \omega}{K_T} \right) \\ &+ L_a \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{K_T} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{B \cdot \omega}{K_T} \right) + K_e \cdot \omega \end{aligned} \quad (7)$$

Do đó:

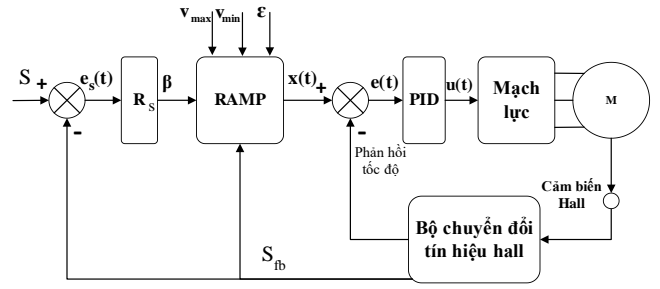
$$\begin{aligned} V_d &= \frac{L_a \cdot J}{K_T} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{r_a \cdot J + L_a \cdot B}{K_T} \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ &+ \frac{r_a \cdot B + K_e \cdot K_T}{K_T} \cdot \omega \end{aligned} \quad (8)$$

Hàm truyền của động cơ BLDC là mối quan hệ giữa điện áp DC và vận tốc góc. Sử dụng Biến đổi Laplace (8) để có được hàm truyền của động cơ BLDC [10]

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\omega(s)}{V_d(s)} \\ &= \frac{K_T}{L_a \cdot J \cdot s^2 + (r_a \cdot J + L_a \cdot B) \cdot s + (r_a \cdot B + K_e \cdot K_T)} \end{aligned} \quad (9)$$

2.2. Thiết kế điều khiển tốc độ và vị trí

Hình 3 chỉ ra cấu trúc hệ thống điều khiển động cơ BLDC được ứng dụng trong hệ thống lưu trữ thông minh. Mô hình hệ thống gồm các thông số sau: S là tín hiệu đặt quãng đường di chuyển của tủ di động; S_{fb} là quãng đường di chuyển thực tế; $e_s(t)$ là sai lệch giữa quãng đường đặt và đã di chuyển; β là tín hiệu ra của bộ điều khiển vị trí; v_{max} là tốc độ tối đa của tủ di động, v_{min} là tốc độ nhỏ nhất mà tủ có thể di chuyển ổn định (di chuyển thắng lực cản do ma sát); ε là gia tốc; $x(t)$ là tín hiệu đặt mang giá trị tốc độ mong muốn; $e(t)$ là sai lệch giữa tốc độ đặt và tốc độ đo được; $u(t)$ là tín hiệu điều khiển.



Hình 3: Mô hình hệ thống điều khiển động cơ BLDC

2.2.1. Thiết kế bộ điều khiển tốc độ

Bộ điều khiển tốc độ được chọn là bộ điều khiển PID do bộ điều khiển PID là thuật toán truyền thống, đơn giản trong các hệ thống truyền động. Trong hầu hết các trường hợp, vòng kín được sử dụng để sửa (các) lỗi giữa tín hiệu tham chiếu và tín hiệu đo được. Phương trình tổng quát bộ điều khiển PID có dạng:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e_{\square}(\tau) d\tau + T_D \frac{de_{\square}(t)}{dt} \right] \\ &= K_p e_{\square}(t) + K_I \int_0^t e_{\square}(\tau) d\tau + K_D \frac{de_{\square}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (10)$$

Với K_p, K_I, K_D : Thông số của bộ PID.

Kết hợp với phương pháp Ziegler-Nichols [12-13] để tính toán tham số bộ PID. Các thông số PID thu được và được thể hiện trong Bảng 2 sau đây:

Bảng 2: Thông số PID

Thông số	Giá trị
K_p	0.4
T_I	0.16 s
K_D	0

Để có thể thực hiện trên vi điều khiển, bộ điều khiển PID phải rời rạc hóa. Theo đó, khi bước thời gian T_0 đủ nhỏ, khâu tích phân của luật điều khiển PID tại có thể xấp xỉ bằng:

$$\frac{1}{T_I} \int_0^t e_{\square}(\tau) d\tau \approx \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^k e_{\square}(i-1) \quad (11)$$

Ngoài ra, đạo hàm có thể được xấp xỉ trong luật điều khiển bằng cách sử dụng các sai phân hữu hạn:

$$T_D \frac{de_{\square}(t)}{dt} = \frac{T_D}{T_0} [e_{\square}(k) - e_{\square}(k-1)] \quad (12)$$

Từ các phương trình (22)-(24), phương trình của bộ điều khiển PID rời rạc có thể được suy ra [4] như sau:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p [e_{\square}(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=0}^k e_{\square}(i-1) \\ &+ \frac{T_D}{T_0} [e_{\square}(k) - e_{\square}(k-1)]] \end{aligned} \quad (13)$$

2.2.2. Thiết kế bộ điều khiển vị trí

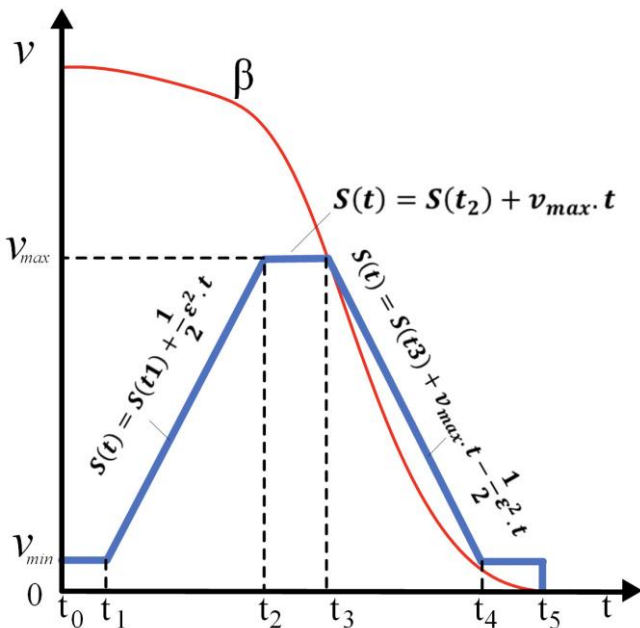
Điều khiển vị trí sử dụng điều khiển phản hồi với bộ điều khiển vị trí R , tuyến tính [11]. Tiến trình tổng hợp tham số bộ điều chỉnh vị trí R , cũng tương tự như các mạch vòng khác. Với cấu trúc trên Hình 3 bộ điều chỉnh vị trí sẽ sử dụng bộ điều khiển tỷ lệ.

Để đảm bảo tủ đi động hoạt động trong các giới hạn an toàn về tốc độ và gia tốc. Khối RAMP được sử dụng để kiểm soát quá trình tăng tốc và giảm tốc của tủ giá đi động.

Theo [11] hệ thống sẽ hoạt động tối ưu về thời gian khi nó hoạt động với tốc độ hoặc gia tốc tối đa. Từ phương trình chuyển động ta tính được quãng đường còn lại khi hệ thống bắt đầu giảm tốc và từ đó xác định được tham số K_p để tủ giá không đi quá giá trị đặt như sau:

$$K_p \leq \frac{\varepsilon}{v_{max}} \quad (14)$$

Nếu chọn K_p lớn hơn, thời điểm bắt đầu giảm tốc sẽ muộn hơn và tốc độ vẫn còn lớn khi hệ thống đã đi hết quãng đường đặt dẫn tới tủ giá đi quá quãng đường đặt. Còn khi chọn K_p càng nhỏ, thời điểm bắt đầu giảm tốc sẽ sớm hơn và thời gian để hệ đi chuyển hết quãng đường yêu cầu sẽ càng lớn.



Hình 4: Biểu đồ tốc độ khi sử dụng khối RAMP

Trong điều kiện chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố bất định như tải trọng, ma sát, khoảng điều chỉnh ổn định thực tế của tốc độ động cơ khác lý thuyết,... để dùng chính xác người ta thường thiết lập tốc độ tối thiểu và lúc này giá trị lựa chọn cho K_p thường thấp hơn giá trị tối ưu một chút. Với hoạt động thực tế K_p được hiệu chỉnh sao cho đầu ra của bộ điều khiển vị trí và đầu ra của khối RAMP bằng nhau ở tốc độ tối thiểu như trên Hình 4.

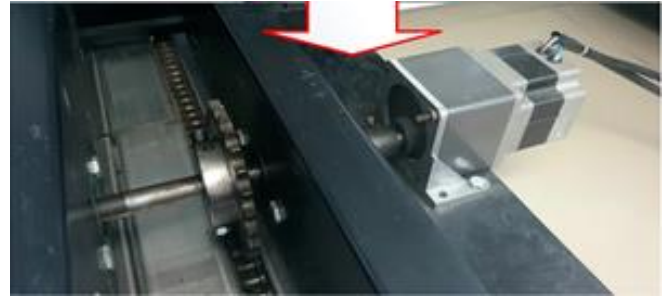
3. Thực nghiệm và đánh giá kết quả

3.1. Giới thiệu về mô hình thực nghiệm

Thực nghiệm được thực hiện trên động cơ di chuyển giá chứa tài liệu có tổng trọng lượng cả tài liệu là 4500 kg. Giá chứa tài liệu đi động có kích thước tổng thể 4325x2595x780 (mm) chuyển động với 4 bánh xe lăn trên ray kim loại. Lực kéo được tạo bởi hệ răng xích như trên Hình 5. Độ dài dịch chuyển tối đa là 1000 mm.

Mỗi giá chứa tài liệu trong hệ thống lưu trữ thông minh được trang bị một động cơ BLDC giúp giá di chuyển được nhằm tiết kiệm không gian lưu trữ. Động cơ BLDC di chuyển giá đỡ có mã hiệu LINIX 90ZWN24-120-A với các thông số cơ bản là điện áp đầu vào 24VDC, công suất 120W, tốc độ trục

quay 30 vòng/phút, hộp số có tỷ lệ 50:1, tức là động cơ quay 1500 vòng/phút thì tỷ lệ chuyển đổi qua hộp số dẫn động đến trục ngoài có tốc độ là 30 vòng/phút. Do vậy mô-men trên trục đầu ra của hộp số sẽ gấp 50 lần mô-men trên trục động cơ, do đó sẽ tăng lực kéo cho tủ lưu trữ đi động từ đó giúp tủ có thể mang được tải trọng lớn. Tiếp đến trục đầu ra của hộp số sẽ được gắn vào bánh răng xích, bánh răng xích sẽ quay trượt trên máng xích đặt dọc trong không gian lưu trữ để giúp tủ chuyển động. Từ chu vi của bánh răng xích, ta có thể tính được quãng đường chuyển động của tủ lưu trữ.

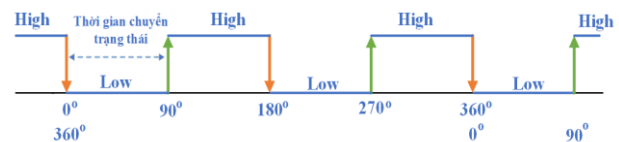


Hình 5: Kết nối động cơ di chuyển giá chứa tài liệu

Trong hệ thống lưu trữ thông minh có bán kính $R_{bánh\ răng} = 6,8\text{ cm}$, ta có chu vi bánh răng:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot R_{bánh\ răng} = 2 \cdot \pi \cdot 6,8 \approx 42,7\text{ (cm)} \quad (15)$$

Vậy tủ lưu trữ đi động di chuyển được quãng đường 42,7 cm thì trục hộp số quay được 1 vòng, trục động cơ quay được 50 vòng. Dựa vào cấu tạo hoạt động của động cơ, khi động cơ quay 1 vòng thì cảm biến Hall sẽ thay đổi trạng thái 4 lần (do Rotor có 2 cặp cực). Hình 6 chỉ ra sự thay đổi mức logic của cảm biến Hall pha A trong vòng quay 360° trong động cơ thực nghiệm.

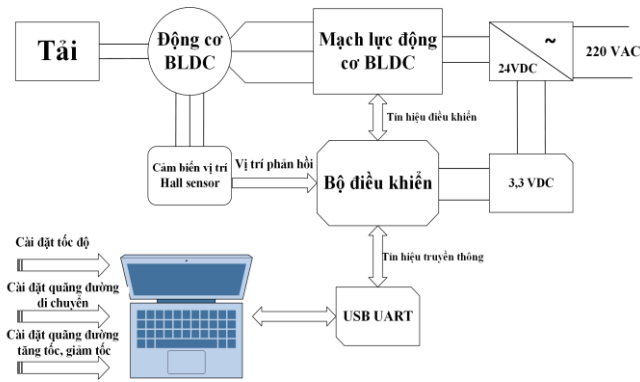


Hình 6: Tín hiệu cảm biến Hall pha A

Do đó ta có thể xác định được số vòng quay động cơ BLDC bằng cảm biến Hall [14-15]. Ví dụ đặt quãng đường di chuyển là 100 cm, khi đó trục hộp số sẽ quay $100/42,7 \approx 2,34$ vòng, suy ra động cơ sẽ quay $2,34 \cdot 50 = 117$ vòng, dẫn đến cảm biến Hall sẽ thay đổi trạng thái $117 \cdot 4 = 468$ lần.

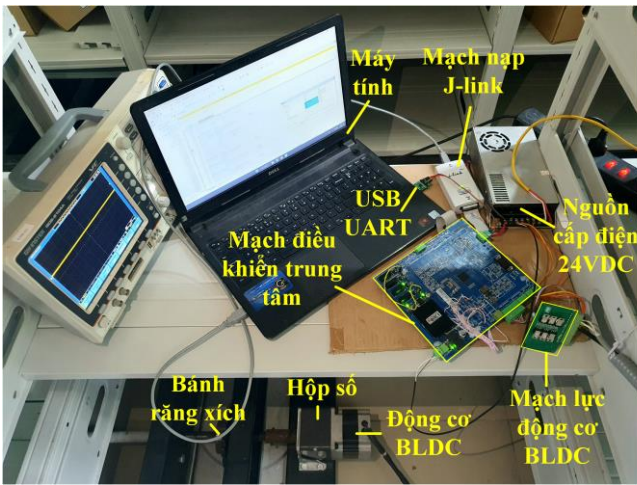
Còn với tốc độ của động cơ, ta tiến hành đo bằng cách xác định khoảng thời gian chuyển trạng thái của cảm biến Hall, khoảng thời gian ứng với 4 lần chuyển trạng thái là 1 vòng quay của động cơ. Từ đó ta sẽ quy đổi ra được tốc độ tính theo vòng/phút.

Tốc độ tối đa của tủ giá đi động là 854 cm/phút (tốc độ động cơ là 1000 v/ph), gia tốc 0,5 cm/s² (tương đương gia tốc góc động cơ là 3,67 (rad/s²)). Từ (14) ta tính được $K_p = 2,1$ là giá trị tối ưu.



Hình 7: Cấu trúc phần cứng

Cấu trúc phần cứng của hệ thống thực nghiệm được chỉ ra trong Hình 7. Hệ thống được cung cấp bởi nguồn điện xoay chiều 220 VAC, sau đó qua bộ chuyển đổi thành nguồn điện một chiều 24VDC cung cấp cho mạch lực động cơ BLDC hoạt động. Bộ điều khiển sử dụng vi điều khiển STM32F407VGT6 sử dụng điện áp một chiều 3,3VDC, vì vậy cần một bộ chuyển đổi 24VDC xuống 3,3V cung cấp cho bộ điều khiển hoạt động. Vị trí Rotor sẽ được cảm biến Hall gửi về bộ điều khiển là cơ sở để điều khiển động cơ. Bộ điều khiển sẽ giao tiếp với máy tính qua USB UART giúp nhận các giá trị cần điều khiển. Máy tính sẽ hiển thị kết quả như tốc độ đặt, tốc độ phản hồi, quãng đường di chuyển theo thời gian thực. Hình ảnh trực quan về mô hình thực nghiệm được trình bày tổng thể trên Hình 8.



Hình 8: Mô hình thực nghiệm

3.2. Kết quả thực nghiệm

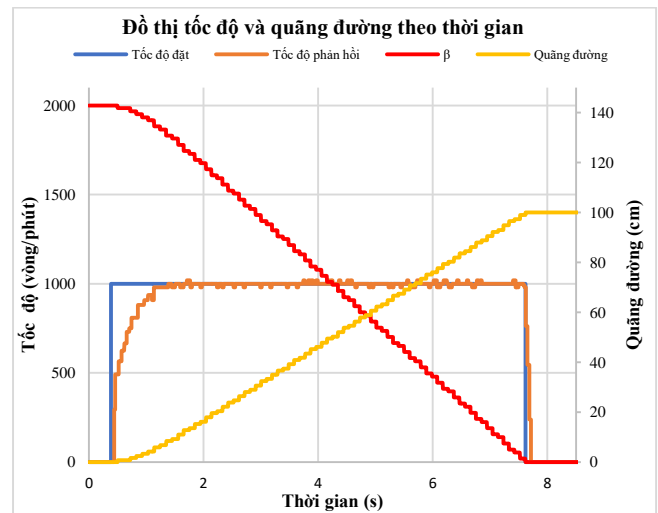
Để kiểm chứng bộ điều khiển và phương pháp đề xuất, thực nghiệm đã được kiểm tra và đánh giá theo dõi tốc độ và vị trí theo thay đổi gia tốc. Các tham số cài đặt: tốc độ tối đa $v_{max} = 1000$ vòng/phút; tốc độ nhỏ nhất $v_{min} = 100$ vòng/phút; quãng đường di chuyển là $S = 100$ (cm); Tốc độ thực tế, tốc độ đặt và quãng đường di chuyển trong trường hợp điều khiển với tốc độ cố định được chỉ ra trong các trường hợp: bộ điều khiển vị trí kiểu tỷ lệ (K_p) khi có và không kiểm soát gia tốc.

3.2.1. Kết quả thực nghiệm với bộ điều khiển vị trí và không kiểm soát gia tốc

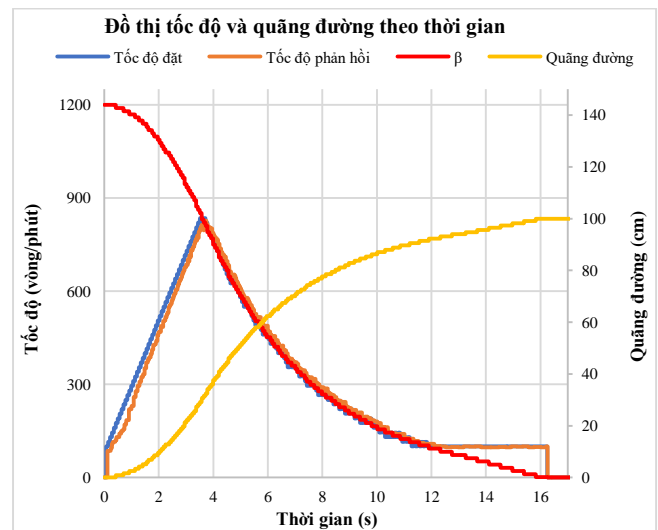
Ở trường hợp này, bỏ qua khối RAMP, hệ thống sẽ gia tốc tối đa theo năng lực động cơ. Bộ điều khiển vị trí cho đầu ra là v_{max} khi $e_s(t) > 0$ và bằng không khi $e_s(t) \leq 0$. Kết quả thí nghiệm được chỉ ra trên Hình 9. Trường hợp này giá chứa tài liệu bị chạy quá một quãng so với giá trị đặt, hoạt động của hệ thống không được êm ái, có nguy cơ bị đổ nếu lượng tài liệu ngăn trên lớn hơn ngăn dưới và thường va vào giá chứa tài liệu bên cạnh khi đóng hoặc mở hần.

3.2.2. Kết quả thực nghiệm khi sử dụng bộ điều khiển vị trí kiểu tỷ lệ và có khống chế gia tốc.

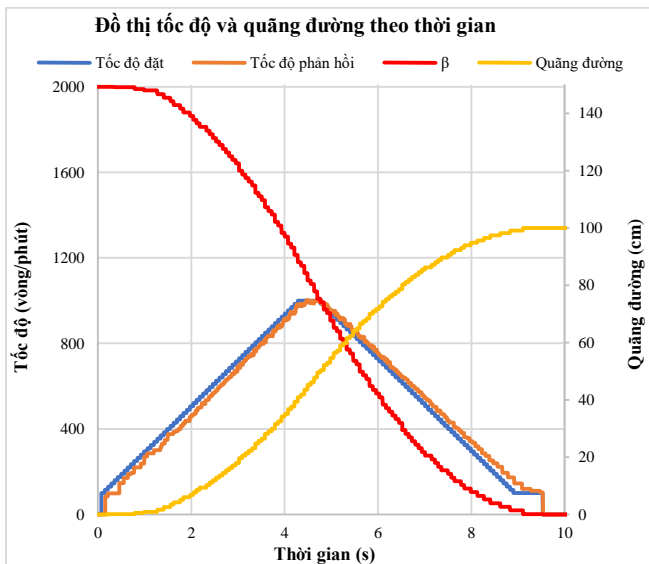
Trường hợp này, khống chế gia tốc là $\epsilon = 3,67 \text{ rad/s}^2$, ta thay đổi hệ số K_p trong bộ điều khiển R_s . Hình 10 là kết quả thực nghiệm với $K_p = 1,2$ (nhỏ hơn giá trị tối ưu). Trong trường hợp này, tốc độ đặt không đạt tới tốc độ $v_{max} = 1000$ vòng/phút, do hệ số K_p trong trường hợp này nhỏ nên thời gian để đi hết quãng đường 100 cm là 16 giây.



Hình 9: Điều khiển với bộ điều khiển vị trí và không kiểm soát gia tốc

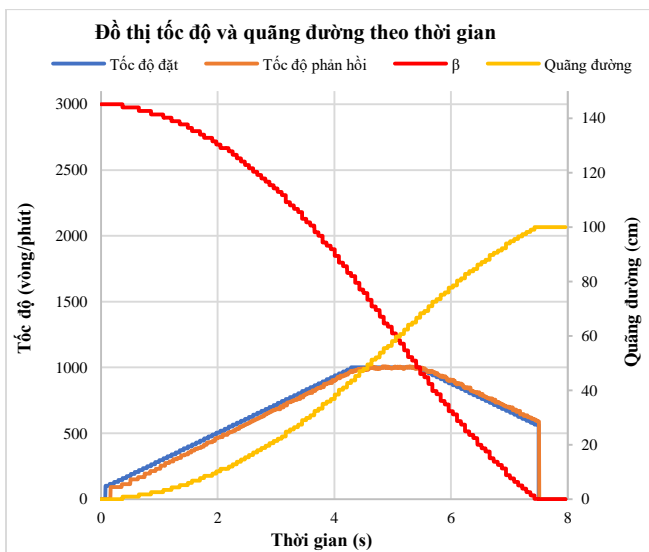


Hình 10: Điều khiển với bộ điều khiển vị trí $K_p=1,2$ và có khống chế gia tốc



Hình 11: Điều khiển với bộ điều khiển vị trí $K_p = 2$ và có không chế gia tốc

Hình 11 là kết quả thực nghiệm với $K_p = 2$ (xấp xỉ phía dưới với giá trị tối ưu). Trong trường hợp này, tốc độ đặt đạt tới $v_{max} = 1000$ vòng/phút, duy trì ở tốc độ tối đa trong khoảng thời gian 0,8s và sau đó giảm tốc với gia tốc đã định. Thời gian di chuyển hết quãng đường là xấp xỉ 9 giây và tốc độ giảm xuống tới v_{min} trước khi dừng.



Hình 12: Điều khiển với $K_p = 3$

Hình 12 là kết quả thử nghiệm với $K_p = 3$ (lớn hơn giá trị tối ưu). Trường hợp này thời điểm bắt đầu giảm tốc chậm hơn và do giới hạn của gia tốc nên tốc độ vẫn còn khá lớn khi giá chứa tài liệu đi hết quãng đường đã định. Giá chứa tài liệu sẽ phải dừng đột ngột giống như khi sử dụng bộ điều khiển vị trí không có không chế gia tốc.

Kết quả thử nghiệm cho thấy việc lựa chọn tham số bộ điều khiển vị trí trong trường hợp cần không chế gia tốc theo công thức (14) sẽ cho kết quả tốt nhất.

4. Kết luận

Bài báo này trình bày một phương pháp thiết kế hệ điều khiển động cơ BLDC để di chuyển giá chứa tài liệu trong hệ thống

lưu trữ thông minh nhằm tăng cường khả năng hoạt động ổn định và chính xác của giá chứa. Mô hình toán học và phương pháp điều khiển động cơ BLDC đã được trình bày và phân tích rõ ràng. Cấu trúc điều khiển nói chung với vòng ngoài cùng là điều khiển vị trí, vòng trong là điều khiển tốc độ được sử dụng. Bộ điều khiển PID được đề xuất cho vòng điều khiển tốc độ và bộ điều khiển tỷ lệ (K_p) được sử dụng cho vòng điều khiển vị trí. Phương pháp hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển được thực hiện khi có sự kết hợp với đánh giá ảnh hưởng của giới hạn gia tốc.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ làm việc ổn định khi bộ điều khiển vị trí dạng tỷ lệ với tham số được tính theo gia tốc và tốc độ tối đa. Ngoài ra việc lựa chọn giới hạn phù hợp cũng sẽ đảm bảo chuyên động của giá chứa tài liệu là tối ưu về thời gian và đáp ứng các yêu cầu an toàn đặt ra như tránh đổ giá hay va chạm với giá khác.

Lời cảm ơn

Bài báo thực hiện trong khuôn khổ đề tài “Nghiên cứu xây dựng phần mềm điều khiển giám sát và quản lý hệ thống lưu trữ hồ sơ tài liệu thông minh trong trường học theo định hướng cách mạng công nghiệp lần thứ 4” mã số CT2020.02.BKA-05 do Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ kinh phí.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. Preston., "https://www.olpingroup.com, 10 2020. Why a mobile shelving system is a great high-density storage solution.," [Online].
- [2] Johann L.Camenisch, Dubendorf, Switzerland; Maximum Density Mobile Storage System; US 4017131; Apr. 12, 1977
- [3] A. D'Alessandro, A. Buffi, P. Nepa, G. Isola, "A localization technique for smart bookshelves based on UHF-RFID systems", Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) 2013 IEEE, pp. 1112-1113, 2013.
- [4] Alice Buffi, Paolo Nepa, "A 2D localization technique for UHF-RFID smart bookshelves", Antennas and Propagation (APSURSI) 2016 IEEE International Symposium on, pp. 1159-1160, 2016.
- [5] Alice Buffi, Andrea Michel, Paolo Nepa, Bernardo Tellini, "RSSI Measurements for RFID Tag Classification in Smart Storage Systems", Instrumentation and Measurement IEEE Transactions on, vol. 67, no. 4, pp. 894-904, 2018.
- [6] P. K. Khanke and S. D. Jain, "Comparative analysis of speed control of BLDC motor using PI, simple FLC and Fuzzy - PI controller," 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, 2015
- [7] T. Mathew and C. A. Sam, "Closed loop control of BLDC motor using a fuzzy logic controller and single current sensor," 2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, 2013
- [8] R. Arulmozhiyal and R. Kandiban, "Design of Fuzzy PID controller for Brushless DC motor," 2012 International Conference on Computer Communication and Informatics, 2012
- [9] Xiang, Wen & Zhen-qiang, Li., "Brushless DC motor speed control strategy of simulation research," MATEC Web of Conferences, 2017, 139. 00172. 10.1051/mateconf/201713900172."
- [10] S. Mondal, A. Mitra and M. Chattopadhyay, "Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control," 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2".
- [11] Sang-Hoon Kim, "Brushless direct current motors," in Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors, 1st ed, Elsevier, 2017.

- [12] Y. Okuyama, "Discretized PID control on an integer grid," 2008 SICE Annual Conference, 2008, pp. 279-282, doi: 10.1109/SICE.2008.4654663."
- [13] P. M. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor," IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012), 2012
- [14] A. R. Sierra, J. F. M. Carballido and J. L. V. González, "Switching techniques for brushless DC motors," CONIELECOMP 2013, 23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing, 2013
- [15] A. S. Al-Adsani, M. E. AlSharidah and O. Beik, "BLDC Motor Drives: A Single Hall Sensor Method and a 160° Commutation Strategy," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, pp. 2025-2035, Sept. 2021.