

NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN VÀ THIẾT KẾ PHẦN CỨNG XÁC ĐỊNH GÓC QUAY ROTOR CỦA ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

RESEARCH ON ALGORITHM AND HARDWARE DESIGN TO DETERMINE THE ROTOR ANGLE OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Lê Thanh Quang^{1,*}, Lý Vĩnh Đạt¹,
Lê Thanh Phúc¹, Lê Vũ Thanh¹, Hoàng Quang Tuấn²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huieh5804.2025.115>

TÓM TẮT

Trên ô tô điện, cảm biến tốc độ của động cơ điện truyền động đóng vai trò quan trọng trong các phương pháp điều khiển hồi tiếp. Đối với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) kèm với bộ giải (Resolver) có vai trò quan trọng hơn vì nó được dùng để đọc vị trí góc quay của rotor. Resolver không chứa linh kiện điện tử nào nên phù hợp với môi trường làm việc khắc nghiệt, nhưng xử lý đầu ra của nó phức tạp và đòi hỏi nhiều giai đoạn. Bài báo này đề xuất một thuật toán và thiết kế phần cứng mới nhằm tối ưu hóa xử lý tín hiệu resolver trên PMSM. Khác biệt so với các nghiên cứu trước tập trung vào phương pháp điều khiển và các thuật toán điều khiển, nghiên cứu này đi sâu vào quá trình xử lý tín hiệu resolver, giúp đo lường chính xác vị trí rotor - yếu tố then chốt trong điều khiển hồi tiếp PMSM. Hệ thống ứng dụng STM32 làm vi điều khiển tính toán vị trí, cùng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) giúp loại bỏ nhiễu, tăng độ chính xác đo lường vượt trội so với các phương pháp lọc thông thường. Cuộn dây kích của resolver được dẫn động bằng mạch cầu H với điều khiển sine PWM, tăng tần số kích resolver lên 100Hz, vượt trội so với các thiết lập trước, giúp hệ thống thu thập được nhiều tín hiệu hơn trong mỗi chu kỳ quay. Vị trí góc quay rotor được tính toán từ các tín hiệu resolver đã qua xử lý.

Từ khóa: PMSM, Resolver, bộ lọc Kalman mở rộng, sine PWM, vi điều khiển STM32.

ABSTRACT

In electric vehicles, the speed sensor of the drive electric motor plays a crucial role in feedback control methods. For permanent magnet synchronous motors (PMSM) equipped with a resolver, it is even more important as it is used to read the rotor's angular position. The resolver contains no electronic components, making it suitable for harsh working environments, but its output processing is complex and requires multiple stages. This paper proposes a new algorithm and hardware design to optimize resolver signal processing on PMSM. Unlike previous studies that focused on control methods and control algorithms, this research delves into the resolver signal processing, enabling accurate rotor position measurement—a key factor in PMSM feedback control. The system uses an STM32 microcontroller to calculate the position, along with an extended Kalman filter (EKF) to eliminate noise, significantly improving measurement accuracy compared to conventional filtering methods. The resolver's excitation coil is driven by an H-bridge circuit with sine PWM control, increasing the resolver excitation frequency to 100Hz, surpassing previous setups, allowing the system to collect more signals per rotation cycle. The rotor's angular position is calculated from the processed resolver signals.

Keywords: PMSM, Resolver, extended Kalman filter, sine PWM, STM32 microcontroller.

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: quanglt@hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/11/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 14/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực ô tô điện nhờ những ưu điểm như mật độ công suất cao, hiệu suất vượt trội và khả năng điều khiển chính xác. Tuy nhiên, để khai thác tối đa tiềm năng của PMSM, việc nghiên cứu và phát triển các chiến lược điều khiển hiệu quả đóng vai trò quan trọng. Tại Việt Nam, chủ đề điều khiển PMSM đã nhận được nhiều sự quan tâm từ các nhà nghiên cứu, đặc biệt là trong việc cải thiện khả năng thích ứng, độ ổn định và hiệu suất điều khiển.

Một số nghiên cứu trước đây đã tập trung vào các phương pháp điều khiển truyền thống, chẳng hạn như, N. B. Thanh và N. N. Tuấn [1] đã đề xuất một phương pháp điều khiển trượt kết hợp với logic mờ, giúp hệ thống tăng cường khả năng thích ứng trong môi trường có nhiều không xác định. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn phụ thuộc vào cảm biến vị trí rotor, điều này có thể ảnh hưởng đến chi phí và độ tin cậy trong một số điều kiện làm việc khắc nghiệt. Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển không cảm biến đã và đang được nghiên cứu nhằm giảm sự phụ thuộc vào cảm biến vị trí rotor. J. Luo và cộng sự [2] đã đề xuất bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) kết hợp với điều khiển dự đoán mô hình miễn nhiễm từ thông (Flux-immune MPC) để ước lượng vị trí rotor mà không cần sử dụng cảm biến. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn tồn tại hạn chế về độ nhạy với nhiễu đo, làm giảm độ chính xác khi tín hiệu cảm biến có sai số lớn. Một số nghiên cứu khác tập trung vào cải thiện hiệu suất điều khiển vector cho PMSM. V. Biyam và cộng sự [3] đã thực hiện nghiên cứu so sánh các phương pháp điều khiển vector khác nhau, giúp cung cấp cái nhìn tổng quan về hiệu suất của từng phương pháp. Tuy nhiên, nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào phân tích hiệu suất hệ thống mà chưa đi sâu vào xử lý tín hiệu cảm biến, đặc biệt là tín hiệu resolver - yếu tố quan trọng trong việc xác định vị trí rotor một cách chính xác. Trong khi đó, R. K. Mahto và cộng sự [4] đã tập trung tối ưu hóa bộ điều khiển PI sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) nhằm nâng cao độ ổn định và khả năng đáp ứng của hệ thống PMSM. Kết quả cho thấy, bộ điều khiển PI tối ưu hóa bằng GA giúp cải thiện đáng kể hiệu suất điều khiển. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn có hạn chế khi có sự thay đổi tải đột ngột, có thể ảnh hưởng đến độ chính xác trong điều khiển vị trí rotor. Một trong những hướng nghiên cứu quan trọng gần đây là tối ưu hóa xử lý tín hiệu resolver để nâng cao độ chính xác của tín hiệu vị trí rotor. S. Chen và cộng sự [5] đã đề xuất một chiến lược hiệu chỉnh tự thích nghi,

giúp giảm sai số đo lường vị trí rotor bằng resolver. Giải pháp này khắc phục các sai lệch do mất cân bằng biên độ tín hiệu resolver và lỗi từ bộ chuyển đổi resolver-to-digital (RDC), góp phần nâng cao độ chính xác của hệ thống PMSM. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn chưa tích hợp các kỹ thuật lọc nhiễu tiên tiến, khiến hệ thống có thể gặp khó khăn khi hoạt động trong môi trường có nhiễu cao. Mặc dù các nghiên cứu trước đây đã góp phần đáng kể trong việc cải thiện điều khiển PMSM, nhưng vẫn chưa có một giải pháp toàn diện kết hợp giữa phần cứng và thuật toán xử lý tín hiệu resolver, nhằm đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cao trong điều kiện vận hành thực tế. Một số nghiên cứu đã áp dụng các thuật toán lọc và hiệu chỉnh tín hiệu resolver để giảm sai số đo lường, tuy nhiên, các phương pháp này vẫn còn nhiều thách thức cần giải quyết, đặc biệt là trong môi trường có nhiễu cao và khi tốc độ rotor thay đổi đột ngột. Hầu hết các công trình trước đây chỉ tập trung vào cải tiến một trong hai yếu tố - phần cứng hoặc thuật toán - mà chưa có sự kết hợp đồng bộ để tối ưu hóa toàn diện hệ thống. Các nghiên cứu trước chủ yếu sử dụng mạch kích resolver với tần số tiêu chuẩn 50Hz - 60Hz, điều này giới hạn số lượng tín hiệu thu được trong mỗi chu kỳ quay của rotor, làm giảm độ phân giải đo lường và ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển PMSM. Ngoài ra, các hệ thống xử lý tín hiệu resolver trước đây chưa được thiết kế tối ưu để loại bỏ nhiễu ngay từ đầu vào, dẫn đến tín hiệu đưa vào vi điều khiển vẫn bị ảnh hưởng bởi nhiễu môi trường, rung động và nhiễu điện từ từ bộ biến tần.

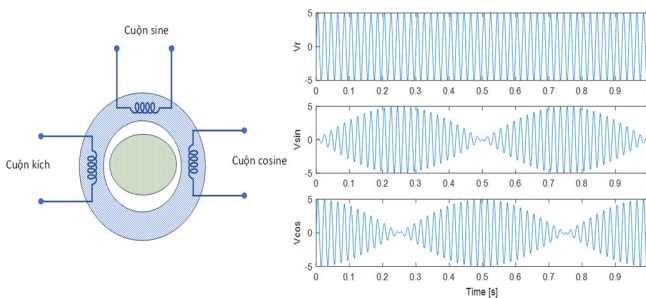
Trước những vấn đề trên, nghiên cứu này tập trung vào đề xuất một thuật toán và phương pháp xử lý tín hiệu resolver tối ưu, giúp xác định chính xác vị trí rotor, từ đó nâng cao độ ổn định và hiệu suất điều khiển của hệ thống PMSM. Phương pháp được đề xuất kết hợp giữa bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) và mạch phần cứng cải tiến, giúp giảm sai số đo lường vị trí rotor nhờ thuật toán EKF kết hợp với hiệu chỉnh sai số resolver, đồng thời tăng độ chính xác xử lý tín hiệu bằng cách nâng tần số kích resolver lên 100Hz để cải thiện độ phân giải tín hiệu. Bên cạnh đó, nghiên cứu còn tối ưu hóa phần cứng với mạch khuếch đại và chỉnh lưu bán kỳ, giúp tín hiệu resolver được xử lý sạch hơn ngay từ đầu vào trước khi đưa vào vi điều khiển, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định ngay cả trong môi trường có nhiễu cao - một thách thức mà các nghiên cứu trước đây chưa giải quyết triệt để. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đề xuất một giải pháp tích hợp giữa kỹ thuật xử lý tín hiệu cảm biến và thuật toán hiệu chỉnh nhiễu, nhằm giảm thiểu sai số đo lường và nâng cao độ

tin cậy của hệ thống điều khiển PMSM trong môi trường vận hành thực tế. Với các cải tiến này, nghiên cứu không chỉ giúp nâng cao độ chính xác đo lường vị trí rotor mà còn tối ưu hóa toàn bộ hệ thống điều khiển PMSM, góp phần cải thiện hiệu suất và độ tin cậy trong các ứng dụng thực tế như ô tô điện và các hệ thống công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Resolver (bộ giải) trên động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu

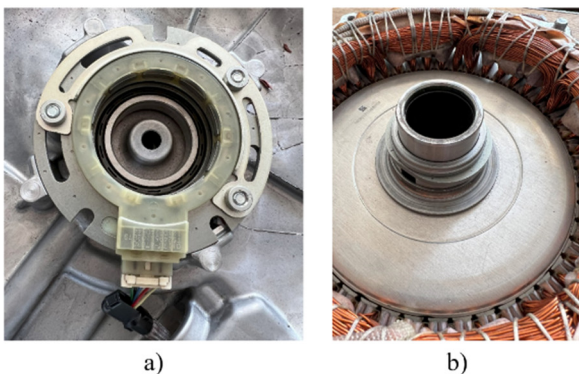
2.1.1. Cấu tạo và chức năng



Hình 1. Nguyên lý hoạt động của resolver

Resolver là một loại cảm biến dùng để xác định vị trí của rotor trên PMSM. Nguyên tắc hoạt động của resolver dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ của máy biến áp. Cấu tạo resolver bao gồm ba cuộn dây, cuộn kích sẽ được cấp một điện áp xoay chiều tạo ra dòng điện cảm ứng bên trong hai cuộn dây còn lại, cuộn sine và cuộn cosine đặt vuông góc với nhau.

Trục cảm biến được làm bằng thép, quay cùng với rotor PMSM. Tiết diện trục resolver có hình dạng oval, tạo sự không đồng nhất và có sự luân chuyển các khe hở khi rotor quay. Như trong hình 1, khe hở thay đổi làm biến thiên từ trường trên cuộn sine và cuộn cosine, sinh ra hai tín hiệu điện áp trả về biến thiên theo điểm tiếp xúc giữa cuộn dây và khe hở. Tỷ lệ của hai tín hiệu này sau đó được xử lý giúp vi điều khiển xác định vị trí tuyệt đối của rotor.



Hình 2. Mô hình con lắc ngược gắn trên xe

Hình 2 (a) thể hiện bộ resolver thực tế được gắn lên PMSM, cũng như cụm rotor và stator trong hình (b). Đây là cụm động cơ được dùng để thực hiện các thử nghiệm trong các phần sau.

2.1.2. Xử lý tín hiệu resolver

Quá trình xử lý các tín hiệu trả về từ resolver có thể được chia làm ba bước:

Khuếch đại tín hiệu là quá trình giúp vi điều khiển có thể đọc được các giá trị trả về từ vi điều khiển. Tín hiệu có biên độ 100mV được khuếch đại lên 1V sử dụng các op-amp và được offset lên 1,6V sử dụng mạch phân áp. Đây là ngưỡng giữa của khoảng giá trị điện áp mà vi điều khiển có thể đọc được (cụ thể từ 0V đến 3,3V).

Lọc nhiễu tín hiệu từ resolver sau khi khuếch giúp tăng độ chính xác. Do tín hiệu sine và cosine là dạng phi tuyến nên phương pháp lọc Kalman mở rộng (Extended Kalman Filter - EKF) có thể được ứng dụng cho việc này.

Theo [6], tín hiệu sine dạng rời rạc tổng quát có dạng:

$$y_k = v_k \sin(\omega_k \cdot k \cdot \Delta t + \varphi) \quad (1)$$

Trong đó, v_k là biên độ của sóng sine, ω_k là tần số sóng sine, Δt là thời gian lấy mẫu và φ là góc lệch pha.

Áp dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) [7], ta có các phương trình:

Các phương trình dự đoán của EKF:

$$\hat{x}_{k+1,k} = F\hat{x}_{k,k} \quad (2)$$

$$P_{k+1,k} = F P_{k,k} F^T + Q \quad (3)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta t \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \sigma_\omega^2 & \frac{\Delta t^2 \sigma_\omega^2}{2} \\ 0 & \frac{\Delta t^2 \sigma_\omega^2}{2} & \frac{\Delta t^3 \sigma_\omega^2}{3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Với, Q là ma trận hiệp phương sai của các đại lượng v_k , ω_k và φ_k . Trong khi σ_v là phương sai biên độ, và σ_ω là phương sai tần số.

Đọc giá trị và tính toán vị trí rotor. Các điện áp được tạo ra, V_{sine} và V_{cos} , có tần số bằng điện áp tham chiếu trong cuộn kích, V_r . Biên độ của chúng thay đổi dựa trên vị trí các cuộn dây ứng và khe hở. Điện áp tham chiếu đầu vào và điện áp tức thời của các cuộn ứng được biểu diễn theo các công thức theo [8]:

$$V_r = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$V_{\text{sine}} = \sin(\theta) \cdot V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$V_{\text{cosine}} = \cos(\theta) \cdot V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

Với V_m là biên độ của tín hiệu đầu vào và ω là tần số kích resolver. Trong đó θ là góc quay tức thời của rotor. Nếu bỏ qua các sai số không đáng kể, vị trí của rotor có

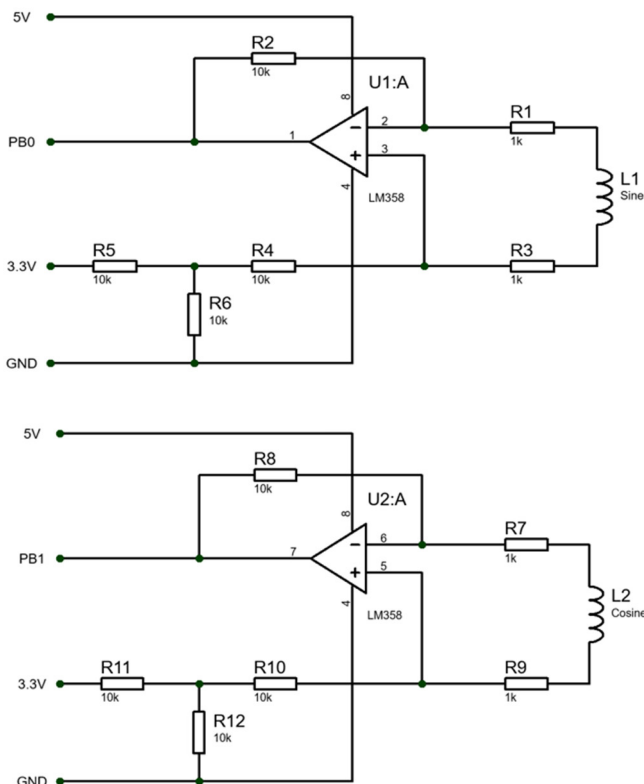
thể được xác định sử dụng hàm arctan theo công thức sau:

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_{\text{sine}}}{V_{\text{cosine}}}\right) \quad (8)$$

Để tìm ra các giá trị của $\tan\theta$, các giá trị đỉnh của điện áp hai cuộn ứng trả về sẽ được đọc sử dụng một mạch chỉnh lưu bán kì. Sử dụng cùng nguồn cấp cho cuộn kích, mạch chỉnh lưu sẽ cho đầu ra cùng tần số dưới dạng xung vuông, lệch pha. Từ đó, sử dụng hàm ngắt của vi điều khiển mỗi khi xung vuông thay đổi cạnh xuống, các giá trị trả về từ resolver có thể được đọc và dùng để xác định vị trí chính xác của rotor.

2.2. Thiết kế phần cứng đọc tín hiệu

2.2.1. Mạch khuếch đại



Hình 3. Mạch khuếch đại cuộn sine và cuộn cosine

Hình 3 mô tả cấu trúc của mạch khuếch đại cuộn sine (cuộn cosine tương tự). Hai op - amp tích hợp trong IC LM358P sẽ được dùng trong chế độ khuếch đại đảo. Điều này nhằm tăng và thay đổi pha của đầu ra cuộn dây bằng cách sử dụng hệ số khuếch đại từ công thức:

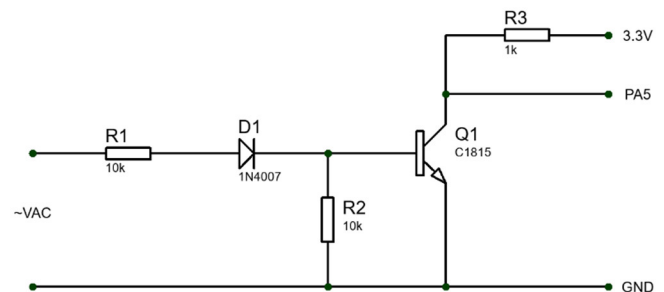
$$V_{\text{sine sau khuếch đại}} = -\frac{R_2}{R_1} * (\pm 0,1) \\ = -10 * (\pm 0,1) = -(\pm 1)(V) \quad (9)$$

Áp dụng công thức này thu được hệ số khuếch đại là (-10), đồng nghĩa với đầu ra sẽ lớn gấp 10 lần và bị đảo

ngược lại. Việc đảo ngược sẽ giúp mạch chỉnh lưu có thể đọc được điện áp khi rotor xoay.

2.2.2. Mạch chỉnh lưu bán kì

Mạch chỉnh lưu bán kì giúp vi điều khiển đọc được điện áp đỉnh trả về từ resolver. Sử dụng cùng nguồn và tần số với cuộn kích, nhưng đầu ra của mạch chỉnh lưu sẽ có dạng xung vuông. Hình 4 thể hiện nguyên lý của mạch chỉnh lưu bán kì. Diode D1 có nhiệm vụ cắt đi phần bán kì âm của điện áp tham chiếu, trong khi cầu phân áp tạo bởi điện trở R1 và R2 sẽ chia phần điện áp dương xuống để kích vào chân base của BJT C1815. Điều đó đồng nghĩa với việc, mỗi khi điện áp tham chiếu nằm ở bán kì dương, tín hiệu đầu ra mạch chỉnh lưu vào chân PA5 của vi điều khiển sẽ nhận điện áp GND. Trái lại, mỗi khi điện áp tham chiếu ở bán kì âm, chân PA5 sẽ nhận điện áp cố định 3,3V.



Hình 4. Mạch chỉnh lưu bán kì

Đầu ra của mạch chỉnh lưu và mạch khuếch đại được thiết kế hướng đến khi rotor quay, xung vuông cạnh xuống của mạch chỉnh lưu sẽ trùng vào điện áp đỉnh trả về từ resolver. Khi đó, hàm ngắt của vi điều khiển sẽ thực hiện chức năng đọc ADC để nhận giá trị điện áp phục vụ tính toán vị trí chính xác của rotor, như đã trình bày trong công thức (8).

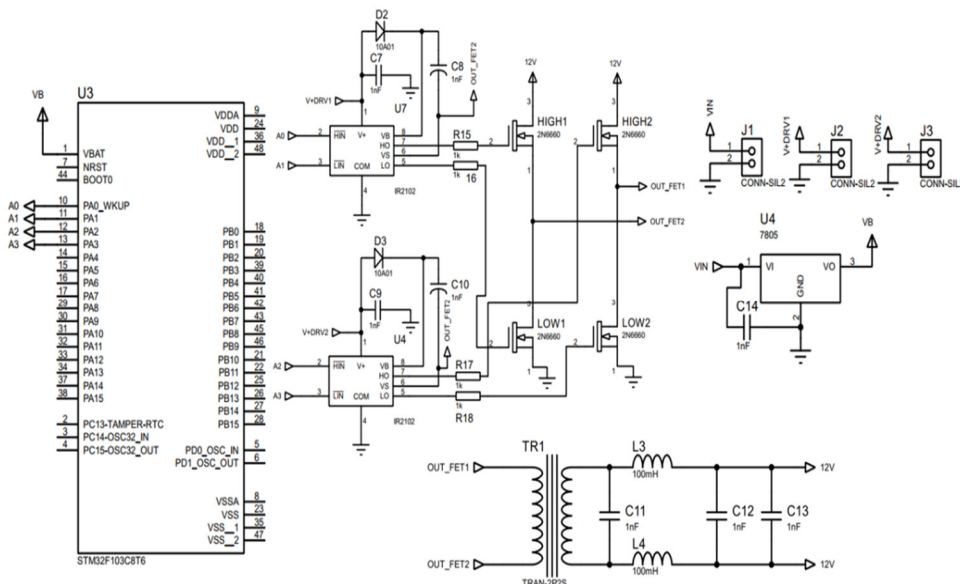
2.2.3. Mạch cầu H

Sử dụng nguồn 4 pin 18650, mạch cầu H đóng ngắt 2 cặp MOSFET theo lý thuyết Sine PWM (Pulse Width Modulation). Các pin này vừa cấp điện áp cao cho chân Drain MOSFET, vừa cấp nguồn hoạt động cho vi điều khiển thông qua ổn áp LM7805. Từ đó, đầu ra là nguồn xoay chiều 100Hz cấp cho cuộn kích của resolver và đầu vào mạch chỉnh lưu bán kì.

Sự đóng ngắt các cặp MOSFET diễn ra luân phiên nhau, đảm bảo trong cùng một thời điểm không có cặp MOSFET nào cùng phía được đóng để phòng tránh hiện tượng ngắn mạch xảy ra. Theo đó, Q1 và Q2 hoạt động như MOSFET phía cao áp điều khiển nửa dương của PWM hình sine, trong khi Q3 và Q4 thì ngược lại.

Việc đóng ngắt hai cặp MOSFET sẽ được điều khiển thông qua hai driver IR 2103. Nhận tín hiệu từ vi điều khiển,

mỗi driver dẫn tín hiệu vào chân Gate của các MOSFET cùng phía (Q1, Q3 và Q2, Q4). Hình 5 biểu diễn các điện áp đầu vào HIN, LIN và điện áp đầu ra HO, LO. Nhờ vào đặc tính của driver IR 2103, tín hiệu đầu ra HO và LO không thể cùng đưa ra mức cao trong cùng một thời điểm. Cụ thể, HO chỉ cho tín hiệu mức cao khi cả hai điện áp đầu vào đều ở mức cao, trong khi đối với hai điện áp đầu vào đều ở mức thấp, chân LO mới xuất tín hiệu điều khiển.



Hình 5. Sơ đồ tổng thể mạch cầu H

Trong hình 5, bốn chân PA0, PA1, PA2 và PA3 của vi điều khiển hoạt động như các bộ tạo PWM. Tham chiếu các giá trị CCR được trích xuất từ mảng đầu ra được tạo sẵn, các chân này có thể tạo ra các tín hiệu điện áp với nhiều duty cycle khác nhau.

Hai driver IR2103 - mỗi driver được trang bị mạch bootstrap riêng - điều khiển hai cặp MOSFET bằng điện áp của pin. Ngoài ra còn có 4 điện trở hỗ trợ dập đi điện dung ký sinh bên trong mỗi MOSFET.

Đầu ra của mỗi MOSFET dẫn tới mạch lọc, bao gồm bởi một biến áp tỉ lệ 1:1, hai cuộn cảm nhỏ và ba tụ điện không phân cực. Biến áp hoạt động như một bộ cách ly, tách biệt hai bên nhờ hiện tượng cảm ứng và từ trường. Các cuộn dây và tụ điện có thể được xem như bộ lọc LPF (Low Pass Filter) tiêu chuẩn, loại bỏ các xung tần số cao và nhiễu, trong khi các tụ điện nhỏ hơn làm mịn sóng điện áp. Tóm lại, một dạng sóng gần giống với hình sine có thể thu được từ mạch cầu H.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Điện áp cuộn kích

Trong nghiên cứu này, các thử nghiệm được thực hiện trên mô hình thực tế của động cơ PMSM với bộ giải

resolver. Để kiểm chứng hiệu quả thuật toán xử lý tín hiệu resolver, mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Matlab/Simulink, trong khi thực nghiệm sử dụng vi điều khiển STM32 để đo lường tín hiệu trên phần cứng thực tế.

Các thông số chính của động cơ PMSM trong mô phỏng và thực nghiệm:

- Công suất định mức: 2,2kW

- Điện áp định mức: 310VDC

- Tốc độ quay định mức: 3000 vòng/phút

- Số cặp cực: 4

- Tần số kích resolver: 100Hz

- Bộ điều khiển chính: Vi điều khiển STM32F4

- Phương pháp lọc tín hiệu: Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF).

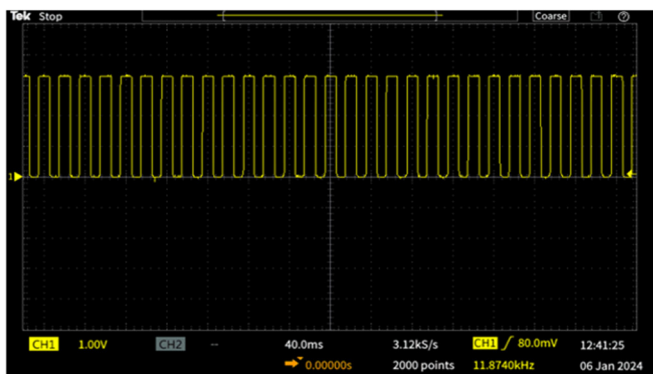
Để tối ưu hóa hệ thống thử nghiệm, nghiên cứu này đã thực hiện một số cải tiến quan trọng nhằm đảm bảo hiệu suất cao và độ chính xác đo lường. Đầu tiên, thuật toán EKF được kết hợp với phương pháp nội suy tín hiệu để giảm nhiễu và

nâng cao khả năng theo dõi vị trí rotor trong môi trường có nhiễu cao. Đồng thời, vi điều khiển STM32F4 được tối ưu hóa với thuật toán điều khiển tốc độ cao, cải thiện bộ nhớ và tốc độ lấy mẫu để đảm bảo phản hồi nhanh và chính xác. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng áp dụng các bộ lọc nhiễu phần cứng trên đường tín hiệu resolver và bố trí dây tín hiệu hợp lý để giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu điện từ từ các thành phần công suất cao. Cuối cùng, để đánh giá hiệu suất hệ thống, các bài kiểm tra thực nghiệm được thực hiện trong môi trường có mức nhiễu cao, mô phỏng các thay đổi tốc độ rotor đột ngột và kiểm tra khả năng bám tín hiệu resolver nhằm xác thực độ ổn định và chính xác của thuật toán. Những giải pháp này giúp đảm bảo hệ thống đo lường và điều khiển PMSM tận dụng tối đa lợi ích của việc tăng tần số kích thích resolver, đồng thời duy trì độ chính xác và ổn định trong điều kiện vận hành thực tế.

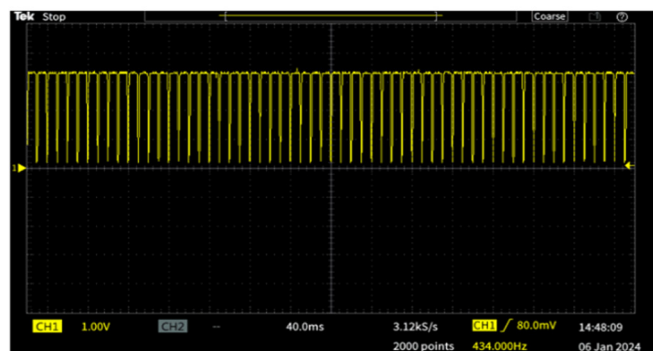
Mô phỏng Matlab/Simulink được thực hiện để kiểm tra khả năng xử lý tín hiệu resolver và loại bỏ nhiễu trước khi triển khai trên hệ thống thực tế. Mô phỏng sử dụng mô hình động học của PMSM kết hợp với bộ điều khiển vector FOC (Field-Oriented Control) và thuật toán xử lý tín hiệu resolver. Cụ thể, hệ thống mô phỏng tái hiện quan

hệ giữa điện áp, dòng điện, mô-men và tốc độ quay rotor thông qua các phương trình toán học mô tả đặc tính của PMSM. Bộ điều khiển FOC được tích hợp để kiểm soát dòng điện stator, trong khi thuật toán EKF được áp dụng để xử lý tín hiệu resolver, lọc nhiễu và xác định chính xác góc quay rotor. Mô phỏng này giúp đánh giá hiệu suất của EKF trong điều kiện có nhiễu, đo lường sai số, thời gian hội tụ và độ ổn định của thuật toán so với các phương pháp lọc truyền thống. Kết quả thu được từ mô phỏng cung cấp dữ liệu quan trọng để điều chỉnh tham số của EKF, tối ưu hóa khả năng theo dõi vị trí rotor trước khi triển khai thực nghiệm trên phần cứng, đảm bảo rằng hệ thống có thể hoạt động chính xác và ổn định trong các điều kiện vận hành thực tế.

Hình 6 (a) mô tả độ rộng xung của cuộn kích từ khi sử dụng nguồn điện 220V tần số 50Hz, trong khi hình 6 (b) biểu diễn độ rộng xung thay thế tối ưu sau khi đưa vào mạch cầu H, với tần số tăng trong một chu kỳ nhằm mục đích thu được nhiều góc giá trị Theta (θ) hơn với số lượng ngắt ngoài lớn hơn bằng STM32.



a)



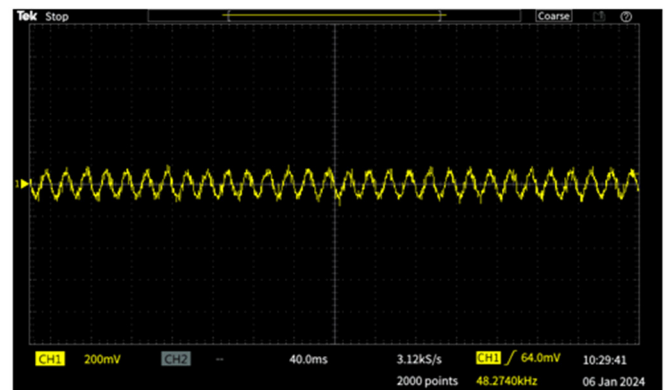
b)

Hình 6. Tín hiệu đầu vào cuộn kích khi (a) sử dụng biến áp 50Hz và (b) ứng dụng mạch cầu H 100Hz

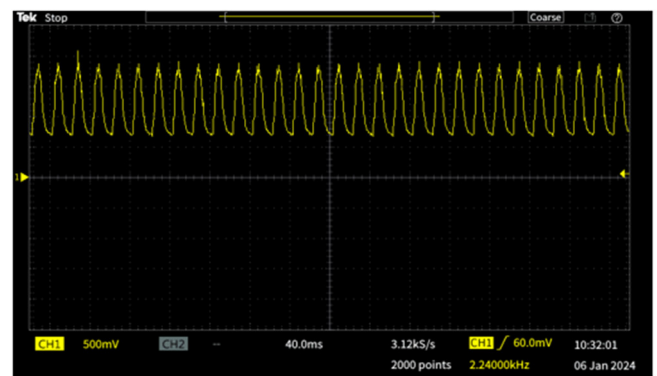
3.2. Điện áp cuộn ứng

Trong hình 7 (a), sóng sine trả về của resolver và phiên bản đã được khuếch đại qua bộ op - amp (b) được thể

hiện. Từ dao động ký, biên độ của tín hiệu là 100mV. Sau khi được khuếch đại, tín hiệu có biên độ là 1V và được offset lên 1,6V.



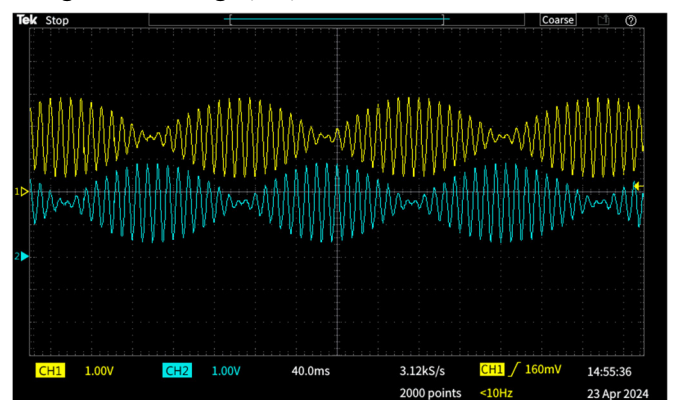
a)



b)

Hình 7. Điện áp cuộn ứng với (a) tín hiệu phản hồi từ resolver và (b) tín hiệu sau khi được khuếch đại và offset

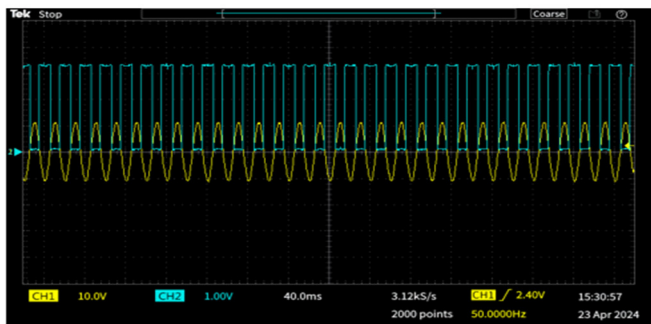
Do sự sắp xếp của các cuộn dây sine và cosine từ bộ resolver, các điện áp trả về của hai cuộn dây này cũng lệch pha với nhau như ở hình 8. Điều này dẫn đến khi rotor quay, điện áp sine trả về sẽ đạt cực đại khi điện áp cosine tiến gần về 0 và ngược lại.



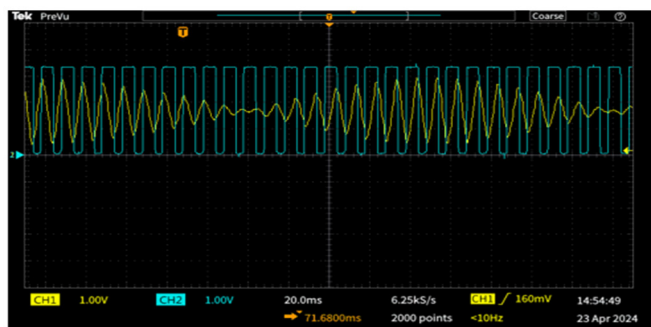
Hình 8. Dạng sóng sine và cosine trả về

Trong hình 9 (a), điện áp cung cấp cho cuộn kích lệch pha với tín hiệu chỉnh lưu dùng để xác định vị trí rotor.

Đồng thời, các đặc tính của mạch khuếch đại cũng như mạch chỉnh lưu bán kì hỗ trợ vi điều khiển đọc điện áp ADC tại các vị trí đỉnh của tín hiệu đầu ra (hình 9 (b)).

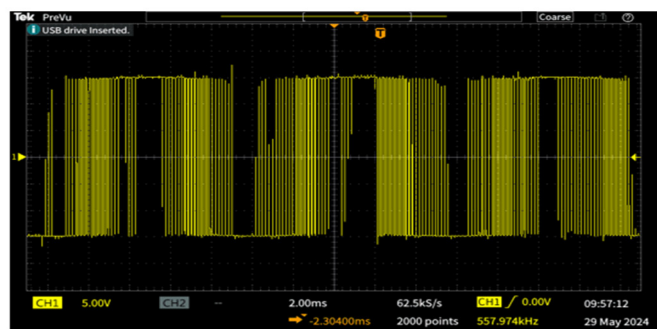


a)

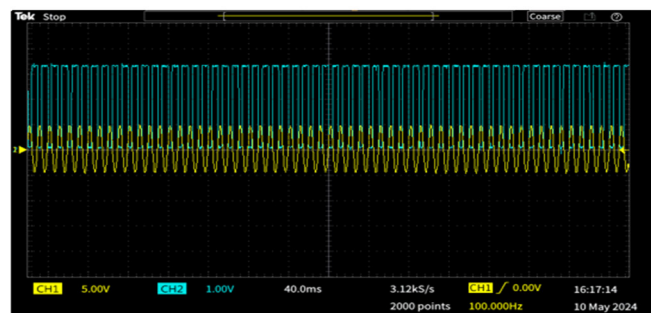


b)

Hình 9. Tương quan giữa (a) tín hiệu chỉnh lưu và đầu vào cuộn kích; (b) tín hiệu chỉnh lưu và đầu ra resolver khi rotor quay



a)



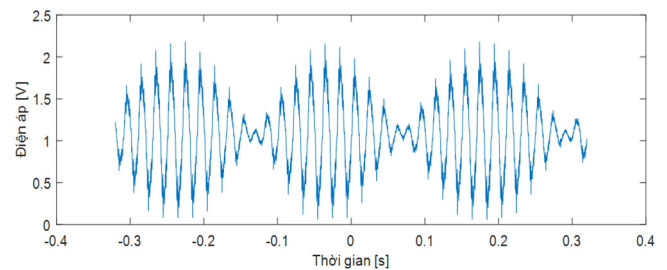
b)

Hình 10. (a) Đầu ra cầu H khi chưa được lọc; (b) tín hiệu chỉnh lưu và đầu ra cầu H sau khi đã được lọc thành sóng sine

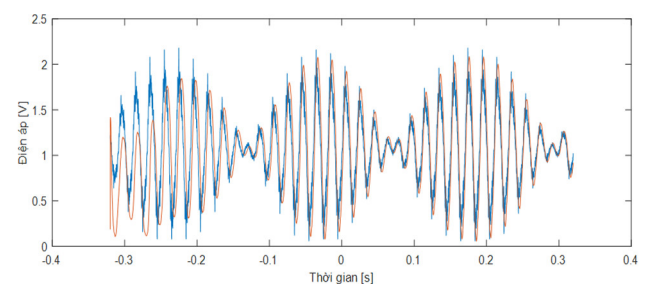
Dạng sóng sine chưa qua bộ lọc được thể hiện trong hình 10 (a) và sau khi đã trải qua quá trình cách ly và lọc nhiễu (hình 10 (b)). Mạch cầu H cung cấp một xung sine có tần số 100Hz từ nguồn DC, giúp nâng cao tốc độ của PMSM nhanh gấp đôi so với dải tần số 50Hz đã được thử nghiệm trước đó.

3.3. Kết quả bộ lọc Kalman

Hình 11 (a) biểu diễn điện áp khuếch đại cuộn sine thu được từ dao động ký. Tần số sóng cuộn kích là 50Hz. Biên độ thay đổi tăng giảm là do trực cảm biến được xoay. Nhiễu sinh ra trong quá trình đo đạc làm giá trị điện áp đo được có nhiều gai nhọn, ảnh hưởng đến độ chính xác vị trí góc quay rotor của động cơ PMSM. Áp dụng bộ lọc Kalman mở rộng như mô ở trên, tín hiệu điện áp được làm phẳng thể hiện trong hình 11 (b). Đường màu đỏ là tín hiệu sau khi được lọc. Trong chu kỳ đầu tiên, giá trị lọc chưa bám được tín hiệu dạng sóng sine. Tuy nhiên, trong chu kỳ sau đó và các chu kỳ tiếp theo, tín hiệu lọc có dạng sóng sine, bám được với dạng sóng gửi về từ cảm biến. Các nhiễu và gai nhọn tạo ra trong quá trình đo và khuếch đại được lọc bớt nhờ đó giảm sai số giá trị đo góc quay của rotor.



a)



b)

Hình 11. (a) Xung trả về từ cuộn sine resolver sau khuếch đại; (b) tín hiệu được lọc bằng EKF sau đó

Sai số trung bình của tín hiệu trước bộ lọc được tính toán dựa trên độ lệch trung bình so với tín hiệu tham chiếu:

$$\varepsilon_{\text{root}} = \frac{\sum_{i=0}^N \left(\frac{A_{\text{root}} - A_{\text{standard}}}{A_{\text{standard}}} \right)_i}{N} \quad (10)$$

Trong đó:

$\varepsilon_{\text{root}}$: Sai số trung bình tín hiệu sau khi lọc.

A_{root} : Biên độ dao động của tín hiệu sau khi lọc.

A_{standard} : Biên độ dao động của tín hiệu tham chiếu.

N: Số mẫu lấy.

Sai số trung bình của tín hiệu sau bộ lọc được tính toán dựa trên độ lệch trung bình của tín hiệu sau lọc EKF so với tín hiệu tham chiếu:

$$\varepsilon_{\text{EKF}} = \frac{\sum_{i=0}^N \left(\frac{A_{\text{EKF}} - A_{\text{standard}}}{A_{\text{standard}}} \right)_i}{N} \quad (11)$$

Trong đó:

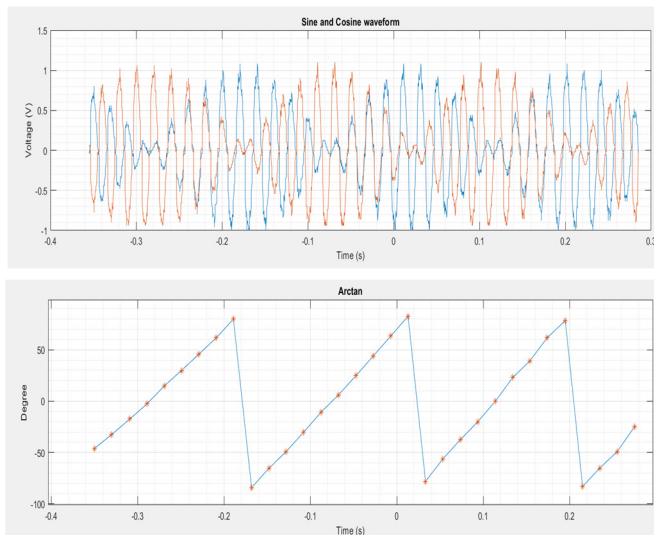
ε_{EKF} : Sai số trung bình EKF.

A_{EKF} : Biên độ dao động của tín hiệu sau khi lọc.

A_{standard} : Biên độ dao động của tín hiệu tham chiếu.

N: Số mẫu lấy.

So sánh sai số trung bình trước và sau khi áp dụng EKF (hình 11) so với dạng sóng của tín hiệu chuẩn (hình 8) với cùng biên độ và tần số, cho thấy mức sai số giảm từ 5% xuống 1,5%, chứng minh hiệu quả của thuật toán trong việc theo dõi vị trí rotor chính xác hơn. Hơn nữa, thời gian hội tụ của EKF cũng được cải thiện, giúp hệ thống nhanh chóng ổn định khi tốc độ rotor thay đổi. Kết quả này khẳng định rằng EKF không chỉ giúp giảm nhiễu mà còn nâng cao độ chính xác và khả năng bám tín hiệu resolver trong điều kiện vận hành thực tế.



Hình 12. Các tín hiệu trả về từ resolver và hàm arctan của chúng

Sau quá trình lọc bằng EKF, tín hiệu sine và cosine được vi điều khiển thu và tính ra vị trí của rotor sử dụng hàm arctan. Trong một vòng quay của rotor, giá trị arctan đổi dấu hai lần thể hiện các vị trí nơi giá trị cos tiến tới 0, thể hiện trong hình 12. Các giá trị tan theta tối ưu sẽ đem

lại hiệu suất điều khiển tối ưu, việc tăng tần số cuộn kích lên 100Hz cũng nhằm phục vụ cho mục đích giúp vi điều khiển đọc được nhiều giá trị trả về từ resolver hơn.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) giúp loại bỏ nhiễu và làm mượt tín hiệu resolver, giảm sai số đo lường và cải thiện độ chính xác trong xác định vị trí rotor. Cụ thể, như thể hiện trong hình 11, tín hiệu resolver ban đầu có mức nhiễu cao và biên độ dao động không ổn định. Sau khi áp dụng EKF, tín hiệu đã trở nên mượt hơn, giảm thiểu nhiễu đáng kể, giúp cải thiện độ chính xác đo lường. Phân tích định lượng cho thấy phương sai của tín hiệu giảm đáng kể, chứng tỏ EKF giúp nâng cao độ ổn định tín hiệu.

Đồng thời, việc tăng tần số kích lên 100Hz giúp vi điều khiển thu thập nhiều dữ liệu hơn, nâng cao độ phân giải tín hiệu và tăng độ ổn định cho hệ thống. Việc tăng tần số kích thích resolver lên 100Hz thay vì 50Hz giúp nâng cao độ phân giải tín hiệu vị trí rotor, cải thiện khả năng thu thập dữ liệu trong mỗi chu kỳ quay. Tuy nhiên, điều này cũng kéo theo một số thách thức, bao gồm gia tăng tổn hao năng lượng, tăng nhiễu tín hiệu và đặt ra yêu cầu cao hơn đối với tốc độ xử lý của mạch giải mã. Do đó, mặc dù đây là một hướng tiếp cận tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất hệ thống điều khiển động cơ, nhưng cần có đánh giá chi tiết về mức tiêu hao năng lượng, ảnh hưởng của nhiễu và khả năng đáp ứng của phần cứng thông qua các tính toán và thực nghiệm cụ thể trước khi triển khai trong ứng dụng thực tế.

So với nghiên cứu của S. Chen và cộng sự, vốn tập trung vào hiệu chỉnh sai số resolver bằng phần mềm, phương pháp này kết hợp cả phần cứng và thuật toán EKF, giúp cải thiện tín hiệu ngay từ giai đoạn đo lường, giảm sai số trước khi đưa vào hệ thống điều khiển. Bên cạnh đó, so với nghiên cứu của J. Luo và cộng sự [2], trong đó EKF được áp dụng cho hệ thống điều khiển PMSM không cảm biến, phương pháp này tận dụng dữ liệu từ resolver và tối ưu chất lượng tín hiệu đầu vào, giúp hệ thống không chỉ nâng cao độ chính xác đo lường mà còn duy trì độ ổn định trong các điều kiện vận hành thực tế. Ngoài ra, để kiểm chứng khả năng hoạt động của EKF trong môi trường có nhiễu cao và tín hiệu biến đổi nhanh, nghiên cứu đã tiến hành thực nghiệm bằng cách tạo ra nhiễu điện từ từ bộ biến tần, thêm nhiễu nhân tạo vào tín hiệu resolver và mô phỏng sự thay đổi đột ngột của tải động cơ. Kết quả cho thấy, EKF không chỉ giảm sai số đo lường mà còn có khả năng hội tụ nhanh hơn khi tốc độ rotor thay đổi đột ngột, đồng thời duy trì độ chính xác cao hơn so với các phương pháp lọc truyền thống trong điều kiện nhiễu mạnh và tín hiệu biến động nhanh.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất một phương pháp xử lý tín hiệu resolver hiệu quả, kết hợp thuật toán bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) và thiết kế phần cứng để xác định chính xác vị trí góc quay rotor trong động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). Hệ thống đã được thử nghiệm trên mô hình thực tế, cho thấy khả năng cải thiện độ chính xác đo lường, giảm thiểu nhiễu và tăng cường độ tin cậy của tín hiệu resolver. Việc ứng dụng vi điều khiển STM32 kết hợp với mạch cầu H để kích resolver ở tần số 100Hz giúp nâng cao số lượng dữ liệu thu được trong mỗi chu kỳ quay, cải thiện đáng kể khả năng xác định vị trí rotor. So với các phương pháp truyền thống, bộ lọc EKF đã giúp giảm sai số đáng kể, nâng cao tính ổn định của hệ thống đo lường và tăng hiệu suất điều khiển động cơ.

Nghiên cứu này mở ra triển vọng ứng dụng trong các hệ thống điều khiển PMSM yêu cầu độ chính xác cao, đặc biệt trong lĩnh vực ô tô điện và các hệ thống công nghiệp hiện đại. Trong tương lai, có thể tiếp tục phát triển thuật toán nhằm tối ưu hóa hơn nữa quá trình xử lý tín hiệu, cũng như mở rộng ứng dụng cho các môi trường hoạt động phức tạp hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. B. Thanh, N. N. Tuan, N. T. Ha, V. V. Chian, "Sliding mode controller based on fuzzy logic for PMSM servo system with uncertain disturbance," *Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry*, 59, 1, 17-20, 2023.
- [2]. J. Luo, K. Yang, Y. Luo, J. Yu, "Extended Kalman Filter based Sensorless Control of PMSM using Flux-immune MPC," in *Proc. 2024 IEEE 10th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (IPEMC-ECCE Asia)*, 2024.
- [3]. Vishesh Biyani, Jinesh R., Tharani Eswar T. A., Sithartha Sourya V. S., Pinkymol K. P., "Comparative Study of Different Control Strategies in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives," in *Proceedings of the 2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 2021.
- [4]. R. K. Mahto, A. Mishra, B. Kumari, "Performance Improvement of Vector Control Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Using Genetic Algorithm-Based PI Controller Design," in *Proc. Int. Conf. Innovative Comput. Commun. (ICICC)*, 279-287, 2021.
- [5]. S. Chen, Y. Zhao, H. Qiu, X. Ren, "High-Precision Rotor Position Correction Strategy for High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Resolver," *IEEE Trans. Power Electron.*, 35, 9, 9716-9726, 2020.

[6]. DSP Stack Exchange, *Estimate and Track the Amplitude, Frequency and Phase of a Sine Signal Using a Kalman Filter*. <https://dsp.stackexchange.com/questions/76443/estimate-and-track-the-amplitude-frequency-and-phase-of-a-sine-signal-using-a-k>

[7]. A. Becker, *Kalman Filter from the Ground Up*. KilmanFilter.NET, 2023.

[8]. N. Aupetit, "AN5161 - Signal conditioning for resolver," STMicroelectronics, Application Note, Rev. 1, 2018.

AUTHORS INFORMATION

**Le Thanh Quang¹, Ly Vinh Dat¹, Le Thanh Phuc¹, Le Vu Thanh¹,
Hoang Quang Tuan²**

¹Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

²Hanoi University of Industry, Vietnam