

## XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG PHÁO PHÒNG KHÔNG TỐC ĐỘ CAO CADS-N-1 TRÊN TÀU HẢI QUÂN

### BUILDING SLIDING MODE CONTROLLER FOR DRIVE SYSTEM OF HIGH-SPEED ANTI-AIRCRAFT CADS-N-1 ON THE NAVY SHIPS

**Đặng Tiến Trung, Tạ Tuấn Hữu**

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 04/7/2022, Ngày chấp nhận đăng: 24/8/2022, Phản biện: TS. Trần Đình Lâm

#### **Tóm tắt:**

Bộ điều khiển tốc độ của pháo có vai trò rất quan trọng trong ổn định chất lượng điều khiển, tăng xác suất tiêu diệt mục tiêu, bảo vệ tàu. Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động pháo cao tốc sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Các kết quả kiểm nghiệm bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển này đảm bảo được độ chính xác trong điều khiển; ổn định được tốc độ ngay cả khi có nhiễu mạnh.

#### **Từ khóa:**

Điều khiển trượt, pháo phòng không tốc độ cao, tàu hải quân, động cơ đồng bộ.

#### **Abstract:**

The speed controller of the cannon has a very important role in stabilizing control quality, increasing the probability of target destruction, and protecting the ship. This paper presents the results of building a sliding controller for high-speed cannon transmission using a permanent magnet synchronous motor. The test results by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures accuracy in control; Stable speed even in the presence of strong interference.

#### **Keywords:**

Sliding mode controller, high-speed anti-aircraft, navy ship, synchronous motor.

### **1. MỞ ĐẦU**

Pháo cao tốc CADS-N-1 Kashtan trang bị trên tàu hải quân, chủ yếu dùng để chống lại máy bay, trực thăng hoặc các mục tiêu bay yêu cầu có độ chính xác cao (đánh chặn các tên lửa diệt hạm) cũng như các mục tiêu trên mặt đất nếu cần. Kashtan được trang bị một hệ thống tự động nhận diện và xác định các mục tiêu trong tầm

bắn hiệu quả. Để đảm bảo khả năng đó hệ truyền động của pháo phải hoạt động chính xác và ổn định.

Hiện nay, hệ truyền động của pháo trên tàu hải quân đã qua nhiều năm sử dụng, thiết bị xuống cấp, bộ điều khiển lạc hậu, rất cần nghiên cứu nâng cấp, hiện đại hóa để đáp ứng tốt hơn những yêu cầu của chiến tranh công nghệ cao. Hướng nghiên

cứ chính của bài báo là tập trung vào xây dựng bộ điều khiển mới cho hệ truyền động pháo sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). Đây là động cơ có cấu trúc đơn giản, trọng lượng nhẹ, công suất cao và khả năng truyền động mạnh mẽ. Tuy nhiên, chất lượng điều khiển vị trí và tốc độ của hệ thống PMSM bị ảnh hưởng lớn bởi tính phi tuyến của nhiễu tải bên ngoài [1], [2]. Với phương pháp điều khiển tuyến tính, bộ điều khiển PID hiện có, hệ truyền động pháo chưa thể đáp ứng tốt chất lượng điều khiển.

Để khắc phục vấn đề này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt. Đây là bộ điều khiển có tính bền vững cao, cấu trúc đơn giản, đảm bảo độ chính xác khi hệ thống có tham số bất định và nhiễu bên ngoài [3], [4]. Bên cạnh đó bộ điều khiển trượt cũng đã áp dụng thành công vào một

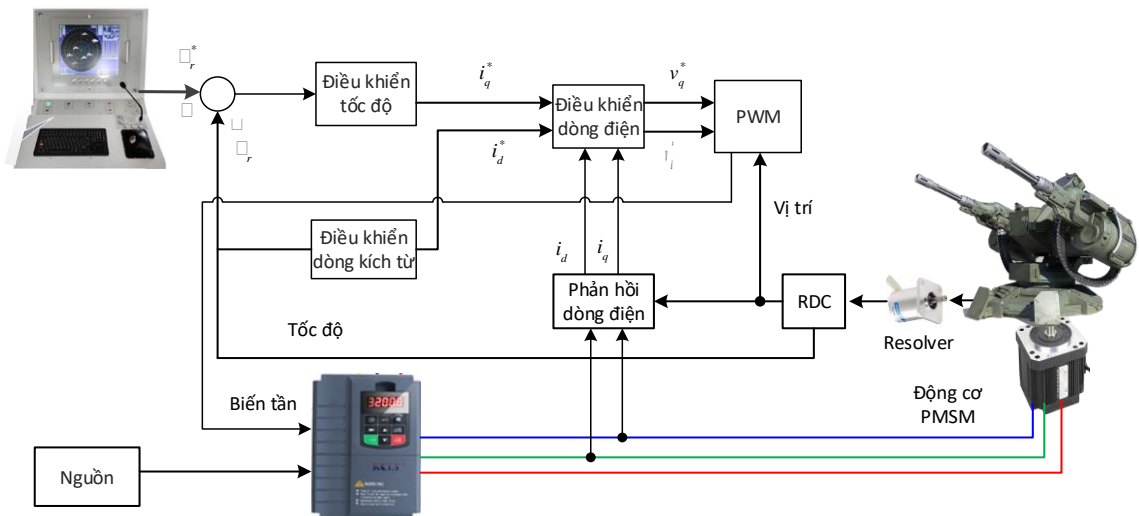
số hệ truyền động vũ khí như pháo phòng không và radar [1], [2]. Trong quá trình nghiên cứu tác giả đã xây dựng mô hình toán học của hệ truyền động pháo tàu, từ đó tổng hợp bộ điều khiển trượt, chứng minh tính ổn định với thời gian hữu hạn của hệ thống. Qua khảo sát cho thấy bộ điều khiển trượt tổng hợp được cho kết quả tốt ngay cả khi có các yếu tố phi tuyến tác động.

## 2. MÔ HÌNH HỆ TRUYỀN ĐỘNG PHÁO CADS-N-1

Mô hình toán học của hệ [3].

$$u_q = \left( R_s + \frac{dL_q}{dt} \right) i_q + (\omega_r L_d) i_d + \omega_r \varphi_m \quad (1)$$

$$u_d = \left( -\omega_r L_q \right) i_q + \left( R_s + \frac{dL_d}{dt} \right) i_d + \frac{d\varphi_m}{dt} \quad (2)$$



Hình 1. Mô hình hệ truyền động pháo cao tốc CADS-N-1 trên tàu hải quân

Phương trình mô men điện từ của động cơ được tính:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \left[ \varphi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (3)$$

Một cách gần đúng có thể coi  $L_d = L_q$  nên có:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \varphi_m i_q \quad (4)$$

Phương trình cân bằng mômen:

$$T_e - T_L = \frac{B}{P_n} \omega_r + \frac{J}{P_n} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

Trong đó,  $i_d, i_q, u_d, u_q$  là dòng điện, điện áp trục  $d, q$  tương ứng;  $R_s, L, \varphi_m, P_n$  lần lượt thể hiện điện trở của stato, độ tự cảm, từ thông của nam châm vĩnh cửu và số cặp cực,  $J, T_L, T_e, B$  lần lượt là mômen quán tính, mômen tải, mômen điện từ và hệ số ma sát nhớt.

Từ đó rút ra mô hình toán học hệ truyền động:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{1}{\omega_r L_d} \left( -R_s i_q - \frac{dL_q}{dt} i_q - \omega_r \varphi_m + u_q \right) \\ i_q &= \frac{1}{\omega_r L_q} \left( R_s i_d + \frac{dL_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_m}{dt} - u_d \right) \quad (6) \\ \omega_r &= \frac{P_n}{J} \left( T_e - T_L - \frac{B}{P_n} \omega_r \right) \end{aligned}$$

### 3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Thay (4) vào (6) có:

$$\dot{\omega}_r = \frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} - \frac{P_n T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \quad (7)$$

Sai số tốc độ giữa trục động cơ và tốc độ đặt:  $e = \omega_d - \omega_r$ . Đạo hàm sai số và thay (7) vào phương trình có:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\omega}_d - \dot{\omega}_r \\ \dot{e} &= \dot{\omega}_d - \left[ \frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} - \frac{P_n T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \right] \quad (8) \end{aligned}$$

Chọn mặt trượt:  $s = e$ .

Tín hiệu điều khiển được chọn sao cho  $\dot{s} = 0$ .

$$\dot{\omega}_d - \left[ \frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} - \frac{P_n T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \right] = 0 \quad (9)$$

Đặt  $k = \frac{3P_n^2 \varphi_m}{2J}$ , qua biến đổi có:

$$k i_q = \dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \quad (10)$$

Từ (10) rút ra

$$i_q = \frac{1}{k} \left[ \dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \right] \quad (11)$$

Đặt  $u_{eq} = i_q$ , đây là thành phần giữ cho các biến trạng thái nằm trên mặt trượt.

Thành phần tín hiệu đưa biến trạng thái tiến về mặt trượt  $u_N = K_a \text{sgn}(s)$  với  $K_a = \frac{3P_n^2 \varphi_m k_c}{2J} > 0$ , trong đó  $k_c$  là hằng số được chọn để điều chỉnh sự ổn định và tốc độ tiến về mặt trượt của biến trạng thái.

Cuối cùng tìm ra luật điều khiển có dạng:

$$u = u_{eq} + u_N = \frac{1}{k} \left[ \dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \right] + K_a \text{sgn}(s) \quad (12)$$

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov:  $V = \frac{1}{2} s^2$

$$\dot{V} = s \dot{s} = s \left( -K_a \text{sgn}(s) \right) = -K_a |s|$$

Với  $K_a > 0$  thì  $\dot{V} < 0$  với mọi  $s$ , vì vậy điều kiện ổn định của hệ luôn tồn tại. Thời gian để các biến trạng thái tiến về miền ổn định là:

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = -K_a \text{sgn}(s) \Leftrightarrow \frac{ds}{\text{sgn}(s)} = -K_a dt$$

Lấy tích phân hai vế có:

$$\int \frac{ds}{\text{sgn}(s)} = - \int K_a dt$$

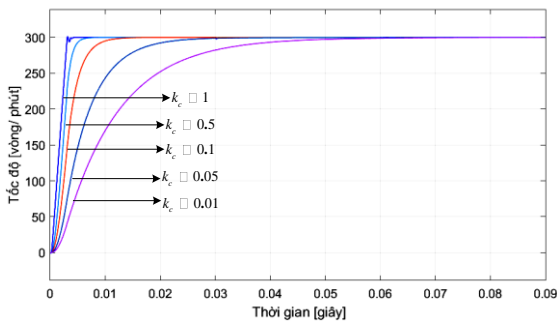
Kết quả có:

$$s \text{sgn}(s) + c_0 = -K_a t_r + c_1$$

$$\Leftrightarrow |s| = -K_a t_r + c_2;$$

Với  $c_2 = |s(0)|$  từ đó xác định được  $t_r = \frac{|s(0)|}{K_a}$

Do thời gian tới  $t_r$  tỷ lệ nghịch với độ lớn  $K_a$  nên  $K_a$  càng lớn thì thời gian đáp ứng càng nhanh. Do  $K_a = \frac{3P_n^2 \varphi_m k_c}{2J}$ , vì thế có thể điều chỉnh  $K_a$  thông qua hằng số  $k_c$ .



Hình 2. Lựa chọn hằng số  $k_c$  thông qua mô phỏng

## 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

### 4.1. Tham số mô phỏng

Mô phỏng đánh giá chất lượng của bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab-Simulink với các tham số cơ hệ được cho trong bảng sau.

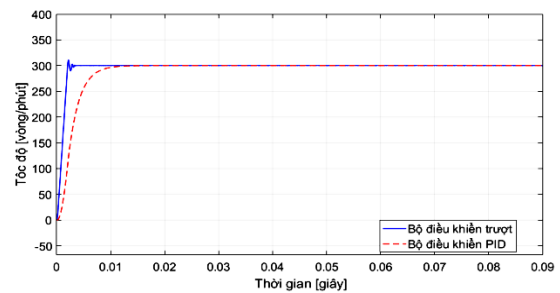
Ký hiệu	Tham số PMSM	Giá trị
$P_N$	Công suất định mức	5.75 kW
$\omega_N$	Tốc độ định mức	3000 vòng/phút
$P_n$	Số cặp cực	2
$I_N$	Dòng điện định mức	10.3 A
$\varphi_m$	Từ thông của nam châm vĩnh cửu	0.205 Wb
$L$	Độ tự cảm	0.23 mH

Ký hiệu	Tham số PMSM	Giá trị
$R_s$	Điện trở Stator	2.8 $\Omega$
$J$	Momen quán tính	15.10 <sup>-3</sup> kgm <sup>2</sup>
$B$	Hệ số ma sát nhớt	2.10 <sup>-3</sup> Nms

### 4.2. Kết quả mô phỏng

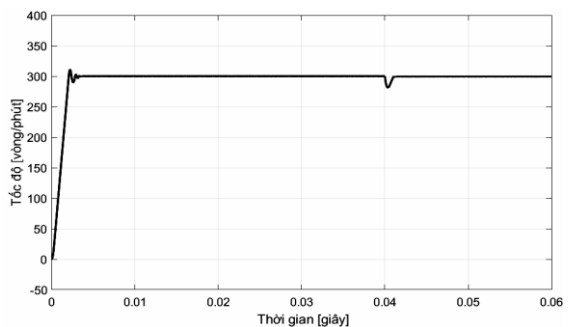
Kiểm tra chất lượng của bộ điều khiển thông qua đáp ứng tốc độ của hệ truyền động trong các trường hợp khác nhau.

**Trường hợp 1:** Tốc độ đặt là 300 vòng/phút, với momen tải ban đầu là 30 Nm, so sánh đáp ứng giữa hai bộ điều khiển PID và điều khiển trượt.

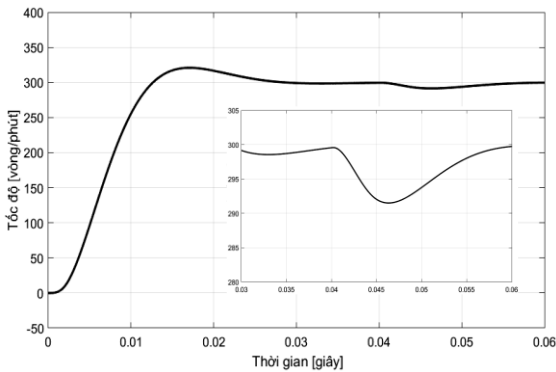


Hình 3. Đáp ứng tốc độ với momen tải ban đầu 30 Nm

**Trường hợp 2:** Tốc độ đặt là 300 vòng/phút, với momen tải ban đầu là 30 Nm, tăng momen tải lên 50 Nm tại thời điểm 0.04 giây.



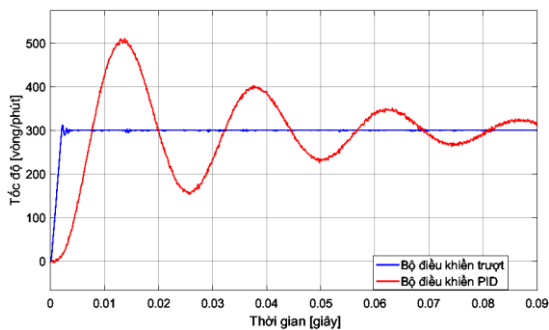
Hình 4. Đáp ứng tốc độ khi dùng bộ điều khiển trượt với momen tải tăng 50 Nm tại thời điểm 0.04 s



**Hình 5. Đáp ứng tốc độ khi dùng bộ điều khiển PID với momen tải tăng 50 Nm tại thời điểm 0.04 s**

Qua hai trường hợp trên cho thấy bộ điều khiển trượt có tốc độ đáp ứng nhanh, ổn định khi có nhiễu tác động. Với bộ điều khiển PID hiện tại thời gian quá độ lớn, sai số cao hơn bộ điều khiển trượt.

**Trường hợp 3:** Tốc độ đặt là 300 vòng/phút, với momen tải là nhiễu ngẫu nhiên trong khoảng 5 Nm.



**Hình 6. Đáp ứng tốc độ với tải ngẫu nhiên**

Khi có tải ngẫu nhiên tác động, bộ điều khiển PID đã không còn giữ được ổn định cho hệ thống. Trong khi đó bộ điều khiển trượt vẫn cho đáp ứng tốt, độ dao động không đáng kể, sai số trong phạm vi cho phép, hệ ổn định sau 0,002 giây, độ quá chỉnh 7%; sai số xác lập 0.5 vòng/phút.

Kết quả này cho thấy bộ điều khiển trượt tổng hợp được cho tốc độ đáp ứng nhanh hơn so với các công trình nghiên cứu trước [1], [2], phù hợp cho yêu cầu của pháo cao tốc CADS-N-1.

#### **Nhận xét:**

Từ các kết quả mô phỏng đánh giá thấy rằng bộ điều khiển trượt cho chất lượng điều khiển tốt. Trong điều kiện chịu ảnh hưởng của yếu tố phi tuyến, mômen tải thay đổi, hệ thống vẫn luôn đảm bảo được độ ổn định, chính xác, đáp ứng nhanh yêu cầu điều khiển. Giúp tăng khả năng tiêu diệt mục tiêu, bảo vệ tàu.

#### **4. KẾT LUẬN**

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động pháo tàu. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra cho thấy bộ điều khiển đã nâng cao được chất lượng của hệ truyền động pháo tàu, thông qua các tiêu chí đánh giá, đó là: tính bền vững với nhiễu, đảm bảo tính chính xác bám, tác động nhanh, sai số nhỏ. Dao động trong quá trình điều khiển giảm, thời gian quá độ ngắn giúp nâng cao tính chính xác khi bắn, tăng sắc xuất tiêu diệt mục tiêu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đặng Tiến Trung, Nguyễn Ngọc Tuấn, Trần Xuân Tình, Dương Văn Thanh, Trần Thị Nga, "Xây dựng bộ điều khiển trượt cuốn chiều cho vòng tốc độ hệ truyền động đài ra đa P18 khi tính đến các yếu tố phi tuyến của phần cơ", Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Tập 57, số 3, tháng 6/ 2021.
- [2] Vũ Quốc Huy, Trần Ngọc Bình, Nguyễn Văn Đức, "Điều khiển chế độ trượt tựa proxy trong hệ bám của súng pháo phòng không", Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số Đặc san TĐH, 04 – 2019.
- [3] Zhang, B.; Pi, Y.; Luo, Y. Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor. ISA Trans. 2012, 51, 649–656 .
- [4] Huang, J.; Li, H.; Teng, F.; Liu, D. Fractional order sliding mode controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor. In Proceedings of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, China, 23–25 May 2012; pp. 1203–1208.
- [5] Ke, Z.; Xiao-guang, Z.; Li, S.; Chang, C. Sliding mode control of high-speed PMSM based on precision linearization control. In Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Beijing, China, 20–23 August 2011; pp. 1–4.
- [6] Liu, Y.; Zhou, B.; Fang, S. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Disturbance Observer. Proc. Chin. Soc. Electr. Eng. 2010, 30, 80–85.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Đặng Tiến Trung tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện - tự động hóa tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện- Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.



Tác giả Tạ Tuấn Hữu tốt nghiệp đại học chuyên ngành hệ thống điện năm 2001, nhận bằng Thạc sĩ năm 2006 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: bảo vệ rơle và tự động hoá trong hệ thống điện.

