

# NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG HỆ TRUYỀN ĐỘNG BỆ PHÓNG TÊN LỬA 9K35 STRELA-10 BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

IMPROVE QUALITY FOR 9K35 STRELA-10 ROCKET LAUNCHER DRIVE SYSTEM BY SLIDING MODE CONTROLLER

Trần Xuân Tinh<sup>1,\*</sup>, Lê Thanh Hòa<sup>1</sup>,  
Lê Ngọc Sơn<sup>1</sup>, Trần Hồng Phú<sup>1</sup>, Trần Viết Vui<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.102>

## TÓM TẮT

Bộ điều khiển tốc độ của hệ phóng có vai trò rất quan trọng trong ổn định chất lượng điều khiển, tăng xác suất tiêu diệt mục tiêu. Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động hệ phóng 9K35 STRELA-10. 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:** Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, điều khiển trượt, điều khiển logic mờ.

## ABSTRACT

The speed controller of the launcher has a very important role in stabilizing the control quality, increasing the probability of destroying the target. This paper presents the results of building a slide controller for the 9K35 STRELA-10 launcher drive system. 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:** Permanent magnet synchronous motor, Sliding mode control, fuzzy logic control.

<sup>1</sup>Học viện Phòng không - Không quân

\*Email: tinhpk79@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/4/2023

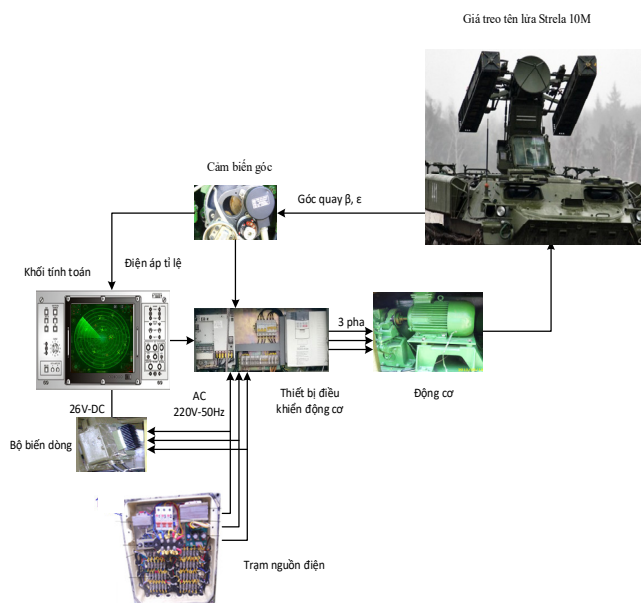
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/5/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2023

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tổ hợp tên lửa phòng không STRELA-10 là thành phần quan trọng, góp phần tạo nên lưới lửa Phòng không bảo vệ vùng trời Tổ quốc của Quân chủng Phòng không - Không quân. Hiện nay, hệ truyền động của hệ phóng 9K35 STRELA-10 của tổ hợp đã qua nhiều năm sử dụng, bộ điều khiển đã cũ, 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 cứu chính của bài báo là tập trung vào xây dựng bộ điều khiển về tốc độ cho hệ truyền động hệ phóng. Đây là hệ truyền động phức tạp theo hai mặt phẳng

phương vị và góc tà, chất lượng điều khiển vị trí và tốc độ của hệ thống bị ảnh hưởng lớn bởi tính phi tuyến của nhiều tải bên ngoài. Với phương pháp điều khiển tuyến tính, bộ điều khiển PID hiện có [1], hệ truyền động hệ chưa thể đáp ứng tốt chất lượng điều khiển. Sau nhiều nghiên cứu tính toán khảo sát cho thấy, điều khiển trượt là phương pháp có tính bền vững với bất định và nhiễu tác động [2-4]. Ứng dụng bộ điều khiển trượt trong xây dựng hệ truyền động cho hệ phóng 9K35 STRELA-10 đã cải thiện rõ rệt độ chính xác bám, giảm rung, tăng xác suất tiêu diệt mục tiêu của khí tài.



Hình 1. Sơ đồ khối chức năng hệ truyền động hệ phóng 9K35 STRELA-10

## 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ TRUYỀN ĐỘNG KÊNH PHƯƠNG VỊ BỆ PHÓNG

Hệ truyền động hệ phóng STRELA-10 có 2 kênh: Góc phương vị và góc tà, có cấu trúc như nhau. Sau đây chỉ đi xét cho một kênh phương vị, kênh góc tà tương tự. Phương trình cân bằng điện áp của động cơ AC trong tọa độ d-q của rôto có thể được biểu diễn như sau [5]:

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

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

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 của hệ:

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

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 stator 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:

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

### 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:

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

Chọn biến 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 với luật điều khiển trên hệ ổn định:

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

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

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:

$$s \cdot \text{sgn}(s) + c_0 = -K_a t_r + c_1 \Leftrightarrow |s| = -K_a t_r + c_2 ;$$

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

Do thời gian tới  $t_r$  tỷ lệ nghịch với độ lớn  $K_a$  nên  $K_a$  càng lớn thì thời gian đáp ứng của hệ truyền động 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  $k_c$ .

### 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

#### 4.1. Tham số mô phỏng

Tiến hành mô phỏng với các tham số cơ hệ được cho trong bảng 1.

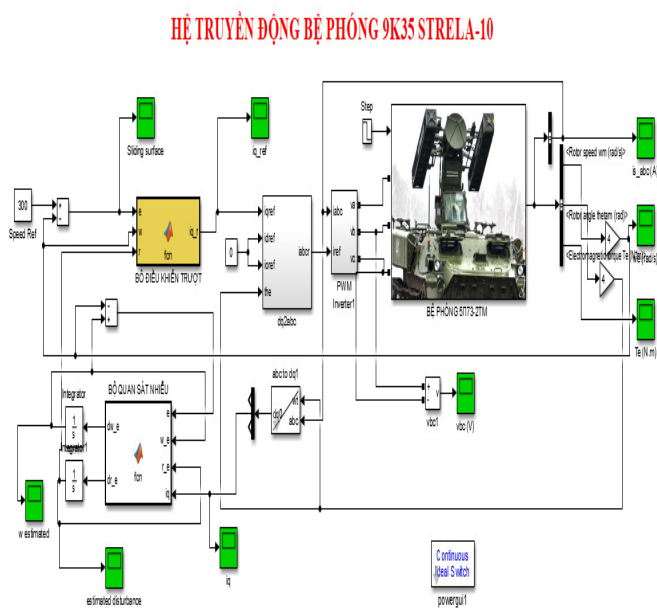
Bảng 1. Giá trị tham số mô phỏng

Ký hiệu	Tham số PMSM	Giá trị
$P_n$	Công suất định mức	5,75kW
$\omega_n$	Tốc độ định mức	3000vòng/phút

$P_n$	Số cặp cực	2
$I_N$	Dòng điện định mức	10,3A
$\Phi_m$	Từ thông	0,2025Wb
L	Độ tự cảm	0,23mH
$R_s$	Điện trở Stator	2,8 $\Omega$
J	Momen quán tính	156.10 <sup>-3</sup> kg.m <sup>2</sup>
B	Hệ số ma sát nhớt	2.10 <sup>-3</sup> Nm

### 4.2. Mô hình mô phỏng

Mô phỏng đánh giá chất lượng của bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab-Simulink như hình 2.

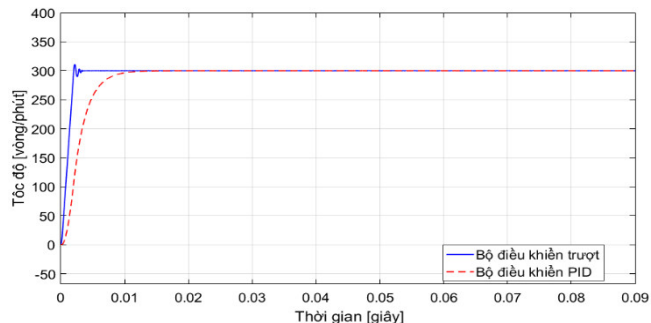


Hình 2. Sơ đồ mô phỏng hệ truyền động bộ phóng 9K35 STRELA-10

### 4.3. Kết quả mô phỏng

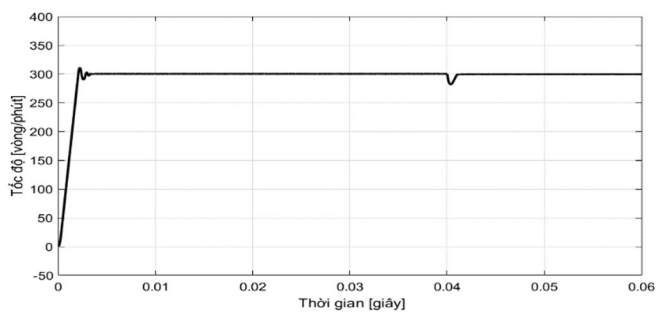
Kiểm tra chất lượng của bộ điều khiển thông qua đáp ứng tốc độ của hệ truyền động trong các trường hợp khác nhau.

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

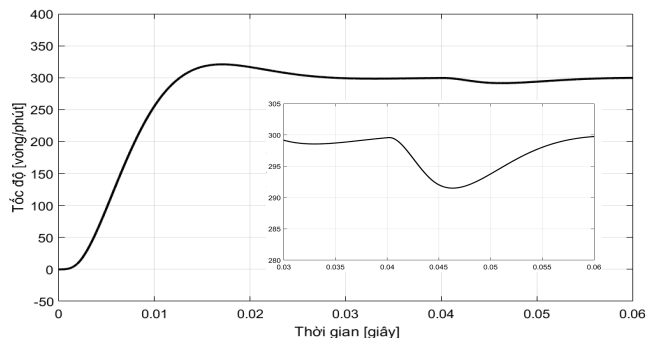


Hình 3. Đáp ứng tốc độ với momen tải ban đầu 30Nm

**Trường hợp 2:** Tốc độ đặt là 300 vòng/phút, với momen tải ban đầu là 30Nm, tăng momen tải lên 50Nm tại thời điểm 0,04 giây.



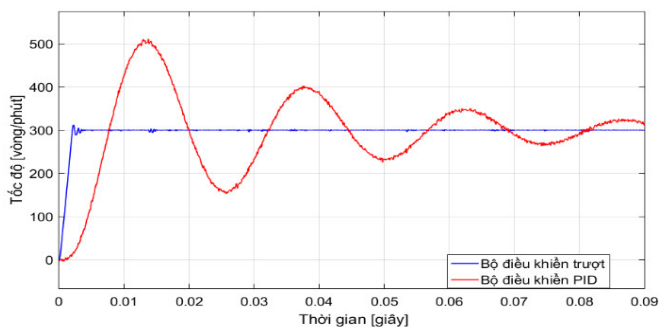
Hình 4. Đáp ứng tốc độ khi dùng bộ điều khiển trượt với momen tải tăng 50Nm tại thời điểm 0,04s



Hình 5. Đáp ứng tốc độ khi dùng bộ điều khiển PID với momen tải tăng 50Nm tại thời điểm 0,04s

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 5Nm.



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 [2, 3], phù hợp cho yêu cầu của hệ truyền động bộ phóng trong tổ hợp tên lửa STRELA-10.

**Nhận xét:** Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng, bộ điều khiển trượt cho chất lượng điều khiển tốt hơn bộ điều khiển hiện có của khí tài, nâng cao độ chính xác, bền vững với nhiễu.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động phương vị của khí tài bộ phóng tên lửa STRELA-10, chứng minh hệ ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, mô phỏng đánh giá bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab. Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đã đáp ứng được yêu cầu chất lượng của hệ truyền động, có thể ứng dụng vào cải tiến thực nghiệm trên khí tài.

---

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pham Van Thang, 2011. *Binh khi be phong 5P-73-2TM*. Air Defense-Air Force Academy.
- [2]. Vu Quoc Huy, Tran Ngoc Binh, Nguyen Van Duc, 2019. *Proxy based sliding mode control for tracking systems of anti-aircraft guns and turrets*. Journal of Military Science and Technology.
- [3]. Zhang B., Pi Y., Luo Y., 2012. *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., 2012. *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, pp. 1203–1208.
- [5]. Ke Z., Xiao-guang Z., Li S., Chang C., 2011. *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, pp. 1–4

---

### AUTHORS INFORMATION

**Tran Xuan Tinh, Le Thanh Hoa, Le Ngoc Son,  
Tran Hong Phu, Tran Viet Vui**  
Air Defense-Air Force Academy, Hanoi, Vietnam