

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI ĐẦU RA THÍCH NGHI TRÊN CƠ SỞ BỘ QUAN SÁT TRƯỢT BẬC CAO CHO BỆ PHÓNG TÊN LỬA

DESIGN OF ADAPTIVE OUTPUT FEEDBACK CONTROLLER
BASED ON HIGH-ORDER SLIDE OBSERVER FOR MISSILE LAUNCHERS

Nguyễn Tuấn Anh^{1,*}, Trần Thị Nga¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.059>

TÓM TẮT

Bộ điều khiển của hệ truyền động bộ phóng có vai trò rất quan trọng trong ổn định chất lượng điều khiển, tăng xác suất tiêu diệt mục tiêu. Bài báo trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển phản hồi đầu ra thích nghi trên cơ sở bộ quan sát trượt bậc cao cho hệ truyền động bộ phóng CM-90 thuộc tổ hợp tên lửa phòng không C-75-M3. 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 hệ thống ngay cả khi có nhiễu mạnh.

Từ khóa: Điều khiển trượt, bộ phóng, tên lửa phòng không, động cơ.

ABSTRACT

The controller of the launcher drive system plays a very important role in stabilizing the control quality and increasing the probability of destroying the target. This paper presents the results of building an adaptive output feedback controller based on a high-order sliding observer for the CM-90 launcher drive system of the C-75-M3 air defense missile system. The simulation test results on Matlab-Simulink software show that this controller ensures control accuracy; stabilizes the system even when there is strong interference.

Keywords: Sliding mode control, rocket launcher, air defense missile, motor.

¹Học viện Phòng không - Không quân

*Email: tu1anhpk@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/01/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 23/02/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tổ hợp tên lửa phòng không tầm trung C75-M3 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 bộ phóng C75-M3 của tổ hợp đã qua nhiều năm sử dụng, bộ điều khiển động cơ chấp hành 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. Để cải thiện chất lượng điều khiển của bộ phóng chủ yếu gặp phải những thách thức sau: (1) Khi tên lửa phóng, sẽ tạo lực đẩy gây nhiễu loạn mạnh lên hệ thống. (2) Vì bộ phóng bao gồm một cơ cấu quay phương vị và một cơ cấu quay góc tà, khi hai bộ cơ cấu quay quanh trục quay tương ứng, sẽ xảy ra mô men hồi chuyển và tác động chéo gây nhiễu loạn do hiệu ứng hồi chuyển. Tất cả các yếu tố này sẽ gây ra khó khăn cho việc cải thiện độ chính xác của hệ thống. Để giải quyết vấn đề trên đã có nhiều bộ điều khiển phi tuyến, tiên tiến đã được nghiên cứu [1], chẳng hạn như điều khiển thích nghi [2], điều khiển backstepping thích nghi [3], điều khiển loại bỏ nhiễu động chủ động [4], điều khiển thông minh dựa trên mạng nơron [5], bộ điều khiển chế độ trượt bậc cao [6], các phương pháp nêu trên đều sử dụng các phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái đầy đủ. Tuy nhiên, do sự bất định về tham số của mô hình, nhiễu tác động nên các thiết bị đo không thực sự chính xác, ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Hướng nghiên cứu chính của bài báo là tập trung vào xây dựng bộ điều khiển phản hồi đầu ra thích nghi trên cơ sở bộ quan sát trượt bậc cao cho hệ truyền động bộ phóng. Ứng dụng bộ điều khiển đề xuất đã cải thiện rõ rệt độ chính xác bám, giảm rung, tăng xác suất tiêu diệt mục tiêu của khí tài.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ TRUYỀN ĐỘNG

Hệ truyền động bộ phóng C75-M3 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.

Theo [2, 3], chế độ làm việc của hệ truyền động bệ là “chế độ mômen xoắn”, nghĩa là giá trị điều khiển đầu ra là điện áp tỷ lệ thuận với mômen xoắn đầu ra của động cơ và biểu thị hệ số điện áp mômen xoắn là k_u . Mô hình toán học của hệ truyền động trục phương vị có thể được biểu thị như sau:

$$J_{\text{equ}}\ddot{y} = k_u u - B_{\text{equ}}\dot{y} - d_n - c_1\omega - c_2\dot{\omega} - \tau(t, y, \dot{y}) \quad (1)$$

Trong đó: J_{equ} là tổng mômen quán tính của động cơ và tải; y là vị trí đầu ra theo phương vị của bệ; B_{equ} là hệ số ma sát nhớt; $\omega, \dot{\omega}$ là tốc độ góc và gia tốc góc của bệ; c_1, c_2 là hệ số nhiễu tác động chéo giữa hai kênh; d_n là hệ số bất định; $\tau(t, y, \dot{y})$ là thành phần bất định và sai số mô hình.

Giả thiết tất cả các tham số hệ thống đều bị giới hạn và các giới hạn trên/dưới đều được biết. Rất khó để biết chính xác các tham số hệ thống và không thể tránh khỏi việc các tham số hệ thống sẽ thay đổi trong quá trình làm việc. Cần phải tuyến tính hóa các tham số của phương trình không gian trạng thái để giảm sự không chắc chắn bằng cách sử dụng luật điều chỉnh tham số và cải thiện tính chất hệ thống. Từ (1) có:

$$\frac{J_{\text{equ}}}{k_u}\ddot{y} = u - \frac{B_{\text{equ}}}{k_u}\dot{y} - \frac{d_n}{k_u} - \frac{c_1}{k_u}\omega - \frac{c_2}{k_u}\dot{\omega} - \frac{1}{k_u}\tau(t, y, \dot{y}) \quad (2)$$

$$\text{Đặt: } \theta_1 = \frac{J_{\text{equ}}}{k_u}; \theta_2 = \frac{B_{\text{equ}}}{k_u}; \theta_3 = \frac{d_n}{k_u}; \theta_4 = \frac{c_1}{k_u}; \theta_5 = \frac{c_2}{k_u};$$

$$\tilde{d}(t, y, \dot{y}) = \frac{1}{k_u}\tau(t, y, \dot{y}) \text{ ta có:}$$

$$\theta_1\ddot{y} = u - \theta_2\dot{y} - \theta_3 - \theta_4\omega - \theta_5\dot{\omega} - \tilde{d}(t, y, \dot{y}) \quad (3)$$

Đặt $x = [x_1, x_2]^T = [y, \dot{y}]^T$ là biến trạng thái, khi đó có hệ phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \theta_1\dot{x}_2 = u - \theta_2x_2 - \theta_3 - \theta_4\omega - \theta_5\dot{\omega} - \tilde{d}(t, x) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI PHẢN HỒI ĐẦU RA

3.1. Bộ quan sát trượt bậc cao

Trong ứng dụng thực tế, rất khó để đo vận tốc của hệ thống, do đó cần thiết kế bộ quan sát để ước lượng biến trạng thái theo thời gian thực.

Từ (4) ta có:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Df}(t) \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{\theta_2}{\theta_1} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\theta_1} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \quad 0], \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}(t) = [-\theta_3 - \theta_4\omega - \theta_5\dot{\omega} - \tilde{d}(t, x)]/\theta_1$$

Bộ quan sát trượt bậc cao được thiết kế như sau:

$$\dot{z}_1 = z_2 + l_1(x_1 - z_1) \quad (6)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{u}{\theta_1} - \frac{\theta_2}{\theta_1}z_2 + l_2(x_1 - z_1) \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{z} + \mathbf{Pv} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{v}(x_1 - z_1, \mathbf{v}) \quad (9)$$

$$\text{Trong đó: } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}(\mathbf{A} - \mathbf{LC}) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ l_1 & 1 \end{bmatrix}$$

Bộ quan sát chế độ trượt bậc cao gồm hai phần. Một phần là bộ quan sát Luenberger như được thể hiện trong (6) và (7), với $\mathbf{z} = [z_1 \quad z_2]^T$ là ước lượng của biến trạng thái $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$. Giá trị ước lượng chính xác của biến trạng thái của bộ quan sát trượt bậc cao được thể hiện ở (8), trong đó $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2]^T$. $\mathbf{L} = [l_1, l_2]^T$ là tham số của bộ quan sát Luenberger.

Biểu thức cụ thể của (9) được thể hiện trong (10):

$$\dot{v}_1 = -\alpha_2 M^{\frac{1}{2}} |v_1 - x_1 + z_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(v_1 - x_1 + z_1) + v_2 \quad (10)$$

$$\dot{v}_2 = -\alpha M \text{sign}(v_2 - \dot{v}_1) \quad (11)$$

Trong đó: $M \gg f(t)$, α_1, α_2 là các hằng số dương.

Như vậy, bộ quan sát đề xuất gồm một là bộ quan sát Luenberger truyền thống cung cấp tính giới hạn của sai số quan sát hoặc sai số ước tính $z-x$ khi có đầu vào giới hạn chưa biết; phần còn lại là bộ quan sát chế độ trượt bậc cao, có thể hiệu chỉnh giá trị ước tính của bộ quan sát Luenberger thêm nữa các sai số ước tính có thể được giảm nhỏ tùy ý bằng cách tăng α_j và M đủ sau một thời gian hữu hạn. Hơn nữa, nếu không có nhiễu và khoảng thời gian lấy mẫu đủ nhỏ, sai số quan sát có thể hội tụ về 0.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển thích nghi phản hồi trạng thái

Với x_{1d} là giá trị đặt và $z_1 = x_1 - x_{1d}$ là sai số theo vị trí. Coi x_2 là lượng điều khiển ảo đầu vào. Sai lệch của x_2 là $z_2 = x_2 - x_{2eq}$, khi đó có:

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{x}_{1d} = z_2 + x_{2eq} - \dot{x}_{1d} \quad (12)$$

Thiết kế $x_{2eq} = \dot{x}_{1d} - k_1 z_1$, ta có phương trình theo sai lệch:

$$\dot{z}_1 = z_2 - k_1 z_1 \quad (13)$$

Từ (13) cho thấy để $z_1 \rightarrow 0$ thì $z_2 \rightarrow 0$, theo (3) có:

$$\begin{aligned} \theta_1 \dot{z}_2 &= \theta_1 \dot{x}_2 - \theta_1 \dot{x}_{2eq} \\ &= u - \theta_1 \dot{x}_{2eq} - \theta_2 x_2 - \theta_3 - \theta_4 \omega - \theta_5 \dot{\omega} - \tilde{d}(x, t) \\ &= u - \theta_1 (\ddot{x}_{1d} - k_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_{1d})) - \theta_2 x_2 - \theta_3 - \theta_4 \omega - \theta_5 \dot{\omega} - \tilde{d}(x, t) \\ &= u - \theta_1 \ddot{x}_{1d} - \theta_1 k_1 \dot{x}_{1d} - (\theta_2 - \theta_1 k_1) x_2 - \theta_3 - \theta_4 \omega - \theta_5 \dot{\omega} - \tilde{d}(x, t) \end{aligned} \quad (14)$$

Luật điều khiển được thiết kế như sau:

$$u = u_a + u_s \quad (15)$$

Trong đó:

$$u_a = \theta_1 \ddot{x}_{1d} + \theta_1 k_1 \dot{x}_{1d} + (\theta_2 - \theta_1 k_1) x_2 + \theta_3 + \theta_4 \omega + \theta_5 \dot{\omega} \quad (16)$$

$$u_s = -k_2 z_2 - \frac{h_s^2}{4\varepsilon_s} z_2 \quad (17)$$

Trong đó: h_s giá trị lớn nhất của sai lệch $h_s \geq \|\theta_M\| \|\varphi\| + \delta_d + |\theta_2 - \theta_1 k_1| \delta_2, |\tilde{x}_2| \leq \delta_2$;

ε_s là số thực dương thỏa mãn:

$$\varepsilon_s \geq z_2 \left[(\theta_2 - \theta_1 k_1) \tilde{x}_2 - \tilde{\theta}^T \varphi + u_s - \tilde{d}(x, t) \right]; z_2 u_s \leq 0.$$

Với bộ quan sát chế độ trượt bậc cao (6), (7), luật điều khiển phản hồi đầu ra thích nghi bền vững (15), đảm bảo cho hệ thống ổn định và hội tụ về 0.

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V_1(t) = \frac{1}{2} \theta_1 z_2^2 \quad (18)$$

Đạo hàm 2 vế (18) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \theta_1 z_2 \dot{z}_2 \\ &= -k_2 z_2^2 + z_2 \left[u_s + (\theta_2 - \theta_1 k_1) \tilde{x}_2 - \tilde{\theta}^T \varphi - \tilde{d}(x, t) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Rút ra: } \dot{V}_1(t) \leq -k_2 z_2^2 + \varepsilon = -\lambda V_1(t) + \varepsilon \quad (20)$$

Trong đó: $\lambda = \frac{2k_2}{\theta_{1min}}, V_1(0)$ là giá trị ban đầu của $V_1(t)$.

Do đó, khi $t \rightarrow \infty, V_1(t) = \frac{\varepsilon}{\lambda}$ và $|z_2| = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_1}} \leq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_{1min}}}$;

$$|z_1| \leq \frac{1}{k_1} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda\theta_{1min}}}$$

Từ luật điều khiển và bộ quan sát đã đề xuất tiến hành mô phỏng đánh giá trên phần mềm Matlab-Simulink trong phần tiếp theo.

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Tham số mô phỏng

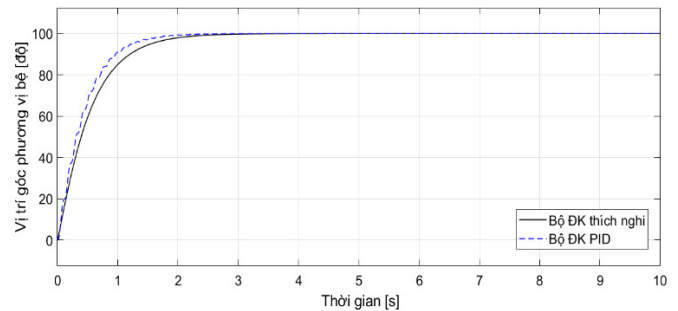
Tiến hành mô phỏng với các tham số điều khiển:

$$k_1 = 100; k_2 = 10; \theta = [0,2 \quad 0,1 \quad 0,5 \quad 0,2 \quad 0,3].$$

4.2. Kết quả mô phỏng

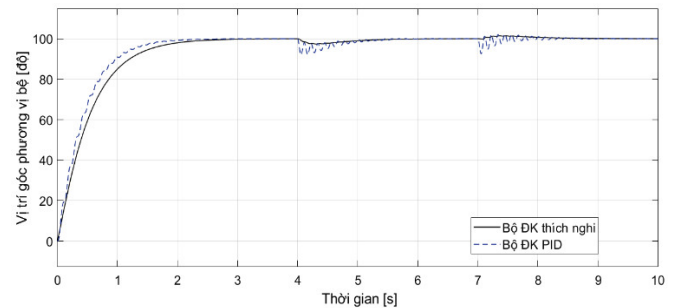
Kiểm tra chất lượng của bộ điều khiển thông qua đáp ứng vị trí của hệ truyền động trong các trường hợp khác nhau.

Trường hợp 1: Vị trí góc đặt là 100 độ, với mômen tải ban đầu là 30Nm, so sánh đáp ứng giữa hai bộ điều khiển PID và điều khiển thích nghi.



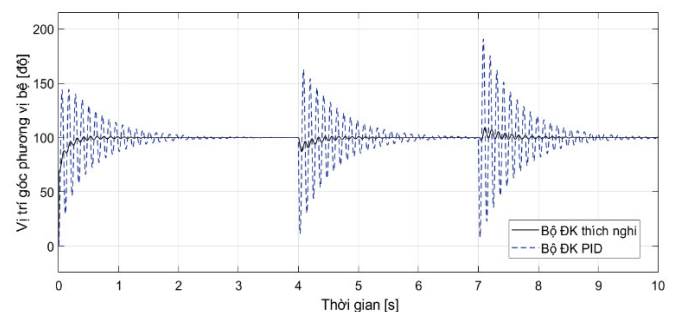
Hình 1. Đáp ứng vị trí với mômen tải ban đầu 30Nm

Trường hợp 2: Vị trí góc đặt là 100 độ, với mômen tải ban đầu là 30Nm, tăng mômen tải lên 50Nm tại thời điểm 4 giây và 7 giây.

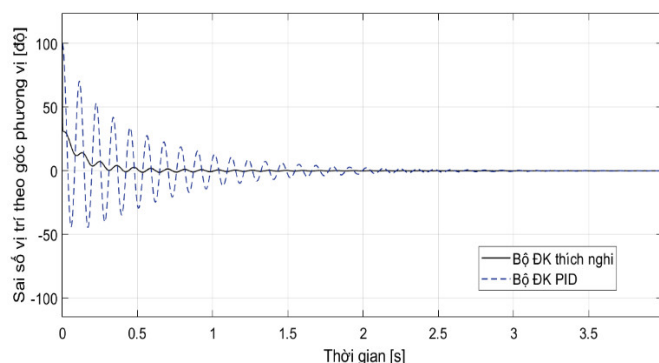


Hình 2. Đáp ứng vị trí với mômen tải thay đổi

Trường hợp 3: Vị trí góc đặt là 100 độ, với mômen tải ban đầu là 30Nm, tăng mômen tải lên 100Nm tại thời điểm 4 giây và 7 giây kết hợp nhiễu tác động.



Hình 3. Đáp ứng vị trí thay đổi mômen tải kết hợp nhiễu tác động



Hình 4. Sai số vị trí khi thay đổi mômen tải kết hợp nhiễu tác động

Qua ba trường hợp trên cho thấy, bộ điều khiển đề xuất có tốc độ đáp ứng nhanh, ổn định khi có nhiễu tác động. Với bộ điều khiển PID thời gian quá độ lớn, 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 thích nghi vẫn cho đáp ứng tốt, độ dao động không đáng kể, sai số trong phạm vi cho phép, hệ ổn định sau 0,5 giây, độ quá chỉnh 0,7%; sai số xác lập 0,02 độ. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển thích nghi tổng hợp được phù hợp cho yêu cầu của hệ truyền động bộ phóng trong tổ hợp tên lửa phòng không.

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 thích nghi phản hồi đầu ra, kết hợp bộ quan sát trượt bậc cao cho hệ truyền động phương vị của khí tài bộ phóng tên lửa phòng không, 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 tên lửa C75-M3.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W.S. Huang, C.W. Liu, P.L. Hsu, S.S. Yeh, "Precision control and compensation of servomotors and machine tools via the disturbance observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57, 1, 420-429, 2010.
- [2]. J. Yao, Z. Jiao, D. Ma, L. Yan, "High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19, 2, 633-641, 2014.
- [3]. C. S. Ting, Y. N. Chang, B.W. Shi, J. F. Lieu, "Adaptive backstepping control for permanent magnet linear synchronous motor servo drive," *IET Electric Power Applications*, 9, 3, 265-279, 2015.
- [4]. Q. Zheng, L. Q. Gao, Z. Gao, "On validation of extended state observer through analysis and experimentation," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 134, 024505, 1- 6, 2012.
- [5]. F.F.M. El-Sousy, "Intelligent optimal recurrent wavelet elman neural network control system for permanent-magnet synchronous motor servo drive," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9, 4, 1986 - 2003, 2013.
- [6]. C.L. Chen, C. C. Peng, H.T. Yau, "High-order sliding mode controller with backstepping design for aeroelastic systems," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*, 17, 4, 1813-1823, 2012.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Tuan Anh, Tran Thi Nga

Air Defense-Air Force Academy, Vietnam