NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRUYỀN ĐỘNG BÁM TỐC ĐỘ KÊNH TẦM CHO THÁP PHÁO TRÊN TỔ HỢP PPK TỰ HÀNH ZSU-23-4 CẢI TIẾN

Chu Đức Chình*, Hoàng Minh Sáng, Nguyễn Thị Lê Na, Nguyễn Văn Vũ

Tóm tắt: *Tổ hợp pháo phòng không (PPK) tự hành ZSU-23-4 được trang bị hệ thống truyền động thủy lực sử dụng các động cơ và bơm dạng piston hướng trục cho phép điều khiển tháp pháo quay về tầm và hướng với các tốc độ khác nhau thông qua việc điều khiển lưu lượng của các bơm. Trong đó, bơm tầm được điều khiển lưu lượng nhờ cơ cấu tay lắc sử dụng cuộn hút điện từ, bơm hướng được điều khiển lưu lượng nhờ cơ cấu tay lắc sử dụng động cơ điện không đồng bộ 2 pha. Bài báo đề xuất giải pháp thiết kế bộ điều khiển truyền động tầm cải tiến thay thế cho bộ điều khiển nguyên bản trên cơ sở ứng dụng công nghệ điều khiển công suất chế độ xung và đề xuất thuật toán điều khiển bám tốc độ kênh tầm cho tháp pháo.*

Từ khóa: Tổ hợp ZSU-23-4; Điều khiển bám tốc độ; Thuật toán ADRC.

1. MỞ ĐẦU

Trong chiến tranh hiện đại, vũ khí công nghệ cao luôn được sử dụng như chìa khóa cho các ý đồ tác chiến khác nhau. Bên cạnh việc đầu tư mua sắm vũ khí, khí tài hiện đại thì việc nghiên cứu phát triển vũ khí mới cùng với cải tiến, nâng cấp, hiện đại hóa các loại vũ khí, khí tài hiện có trong nước cũng rất quan trọng. Xuất phát từ nhiệm vụ cải tiến tổ hợp PPK tự hành Zsu-23-4, cần phải thiết kế bộ điều khiển truyền động bám tốc độ cho tháp pháo. Đây là một nhiệm vụ quan trọng trong tổng thể xây dựng hệ thống điều khiển hỏa lực, quyết định khả năng tiêu diệt mục tiêu của tổ hợp. Từ thực tế khảo sát hệ thống, nhận thấy trên tổ hợp Zsu 23-4 có nhiều yếu tố, tham số hệ thống không đo đạc được và việc phát sinh nhiễu từ nhiều nguồn thiết bị cao tần là khó tránh khỏi, nhóm tác giả đã lựa chọn giải pháp thiết kế bộ điều khiển có khả năng ước lượng trạng thái và loại bỏ nhiễu. Trong bài báo này, nhóm tác giả giới thiệu về phương pháp điều khiển chủ động loại bỏ nhiễu ADRC (Active Disturbance Rejection Control). Đây là một chiến lược điều khiển mạnh mẽ, với khả năng giảm nhiễu đa kênh và quan sát trạng thái, trong điều kiện không sẵn có thông tin mô hình đối tượng. Việc ước tính trực tuyến của trạng thái mới này được thực hiện bằng cách sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer – ESO). Bộ quan sát này có nhiệm vụ theo dõi và ước lượng các nhiễu tác động trực tiếp, các sai số của việc mô hình hóa đối tượng so với thực tế.

2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRUYỀN ĐỘNG KÊNH TẦM CHO THÁP PHÁO TRÊN TỔ HỢP PPK TỰ HÀNH ZSU-23-4 CẢI TIẾN

2.1. Xây dựng mô hình đối tượng điều khiển

Hệ thống truyền động kênh tầm của pháo trên tổ hợp ZSU-23-4 là một hệ cơ điện – thủy lực phức tạp, liên kết với nhau qua nhiều khâu. Để đơn giản trong việc mô hình hóa toán học, ta sử dụng sử dụng kỹ thuật phân tích giá trị riêng SVD (Singular Value Decomposition).

Bằng việc thực hiện kiểm tra đáp ứng xung của hệ thống và sử dụng kỹ thuật phân tích giá trị riêng SVD, xác định được bậc của đối tượng điều khiển truyền động bằng với giá trị hạng của ma trận Hankel.

Xét một hệ thống sau:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases}, \quad (1)$$

với k =0,1,… ∞ là tham số Markov.

Hàm truyền của hệ thống có dạng:

$$G(z) = C(zI - A)^{-1}B + D. \tag{2}$$

Đáp ứng xung $g(k)$ thu được sẽ là:

$$g(k) = \begin{cases} D & k = 0, \\ CA^{k-1}B & k \geq 1. \end{cases} \tag{3}$$

Đáp ứng xung được viết dưới dạng ma trận Hankel:

$$H_{m\times n} = \begin{bmatrix} g(1) & g(2) & g(3) & \dots & g(n) \\ g(2) & g(3) & g(4) & \dots & g(n+1) \\ g(3) & g(4) & g(5) & \dots & g(n+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g(m) & g(m+1) & g(m+2) & & g(m+n-1) \end{bmatrix} = U_{m\times m} \sum_{m\times n} V^T_{n\times n}. \tag{4}$$

Trong đó, ma trận $\sum_{m\times n}$ có kích thước $m\times n$, là ma trận chéo có các giá trị trên đường chéo $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_r \geq 0 \ldots 0$ (r là hạng ma trận $\sum_{m\times n}$) gọi là các *singular value*.

$$\sum_{m\times n} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \sigma_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \sigma_r & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

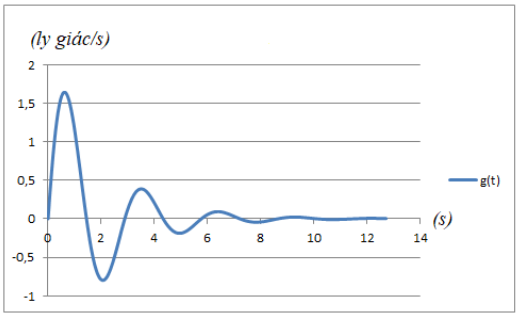
Có thể viết lại ma trận H dưới dạng tích của 3 ma trận có kích thước rút gọn:

$$H = U_r \sum_r V_r^T. \tag{6}$$

Trong đó U_r và V_r là các ma trận trực giao thỏa mãn điều kiện $U_r^T U_r = V_r^T V_r = I$.

Theo [5], bậc của hàm truyền hệ thống bằng hạng của ma trận $\sum_{m\times n}$, tức là bằng với giá trị r.

Từ khảo sát thực tế trên tổ hợp PPK ZSU 23-4, khi tín hiệu xung đơn vị tác động lên kênh tầm của pháo, thu được phản hồi tại đầu ra là các dao động tắt dần. Với thời gian lấy mẫu $0{,}5\ (s)$, ta có đồ thị biểu diễn vận tốc kênh tầm của pháo phụ thuộc thời gian kể từ thời điểm bắt đầu đặt giá trị xung tác động như hình 1.



Hình 1. *Đồ thị đáp ứng xung của hệ thống kênh tầm của pháo Zsu 23-4.*

Từ dữ liệu trên, để lập ma trận H theo công thức (4), chọn $m = n = 7$ ta tính được giá trị SVD:

$$\sum_r = diag\left[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7\right] = \left[3.205, 0.556, 0.0028, 0.0017, 0.0014, 0.0010, 0.0001\right].$$

Có thể nhận thấy, $\sigma_3 \approx 0 \Rightarrow rank\sum_r = 2$, nên bậc của hàm truyền hệ thống truyền động kênh

tầm của pháo bằng 2. Hàm truyền của hệ thống có dạng như sau:

$$G(s)=\frac{y(s)}{u(s)}=\frac{K}{T^2s^2+2DTs+1} \Leftrightarrow T^2\ddot{y}(t)+2DT\dot{y}(t)+y(t)=Ku(t). \quad (7)$$

Trong đó, tín hiệu điều khiển $u(t)$ là dòng điện điều khiển cuộn hút đóng mở van tiết lưu, $y(t)$ là tốc độ bám của kênh tầm pháo trên tổ hợp ZSU 23-4.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển tuyến tính ADRC

Để xây dựng bộ điều khiển tuyến tính ADRC, ta cần thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng. Trong bài báo này nhóm tác giả sử dụng bộ quan sát trạng thái Luenbeger. Trước tiên, ta viết lại phương trình (7) với sự bổ sung của tác động nhiễu như sau:

$$\ddot{y}(t)=\underbrace{\left(-\frac{2DT}{T^2}\dot{y}(t)-\frac{1}{T^2}y(t)+\frac{1}{T^2}d(t)+\Delta bu(t)\right)}_{f(t)}+b_0u(t) = f(t)+b_0u(t). \quad (8)$$

Trong (8), ta đã đặt $b=\frac{K}{T^2}=b_0+\Delta b$, và bổ sung thành phần nhiễu $d(t)$. Tổng $f(t)$ là giá trị tín hiệu bao gồm nhiễu và sai số không thể đo được trong thực tế, nhưng có thể ước lượng qua thành phần trạng thái của bộ quan sát trạng thái mở rộng. Như vậy, hệ phương trình mô tả không gian trạng thái có thể viết rút gọn:

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\dot{x}_1(t)\\ \dot{x}_2(t)\\ \dot{x}_3(t)\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}}_{A}.\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_3(t)\end{bmatrix}+\underbrace{\begin{bmatrix}0\\ b_0\\ 0\end{bmatrix}}_{B}.u(t)+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}\dot{f}(t)\\ y(t)=\underbrace{\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}}_{C}.\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_3(t)\end{bmatrix}\end{cases}. \quad (9)$$

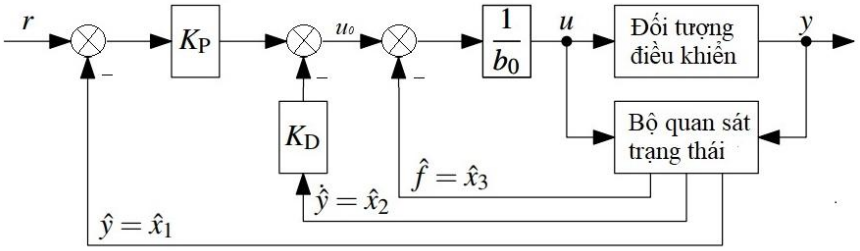
Trong bộ quan sát trạng thái mở rộng, một thành phần ma trận độ lợi *L* được thêm vào để hội tụ lỗi dự báo trạng thái $\lim_{t\to\infty}e((x_i-\hat{x}_i))=0,$ thỏa mãn điều kiện:

$$\dot{e}=(A-LC)e. \quad (10)$$

Ta có hệ phương trình biểu diễn không gian trạng thái của bộ quan sát trạng thái mở rộng như dưới đây:

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\dot{\hat{x}}_1(t)\\ \dot{\hat{x}}_2(t)\\ \dot{\hat{x}}_3(t)\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}}_{A}.\begin{bmatrix}\hat{x}_1(t)\\ \hat{x}_2(t)\\ \hat{x}_3(t)\end{bmatrix}+\underbrace{\begin{bmatrix}0\\ b_0\\ 0\end{bmatrix}}_{B}.u(t)+\underbrace{\begin{bmatrix}l_1\\ l_2\\ l_3\end{bmatrix}}_{L}\cdot(y(t)-\hat{x}_1(t))\\ y(t)=\underbrace{\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}}_{C}.\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_3(t)\end{bmatrix}\end{cases}. \quad (11)$$

Từ các hệ phương trình (9), (11) ta xây dựng luật cấu trúc vòng điều khiển sau:



Hình 2. *Cấu trúc vòng lặp điều khiển ADRC tuyến tính.*

Trong cấu trúc vòng lặp điều khiển ở trên, việc loại bỏ nhiễu được thực hiện thông qua luật điều khiển sau:

$$u(t) = \frac{u_0(t) - \hat{f}(t)}{b_0} \text{ với } u_0(t) = K_P.(r(t) - \hat{y}(t)) - K_D \cdot \dot{\hat{y}}(t). \quad (12)$$

Phương trình đặc tính của hệ kín trên sẽ có dạng:

$$\det(sI - (A - LC)) = s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3. \quad (13)$$

Phương trình đặc tính của hệ mong muốn có dạng:

$$(s - \lambda)^3 = s^3 - 3\lambda s^2 + 3\lambda^2 s - \lambda^3. \quad (14)$$

Với λ là nghiệm cực mong muốn. Đồng nhất hệ số của phương trình (13), (14) nhận được:

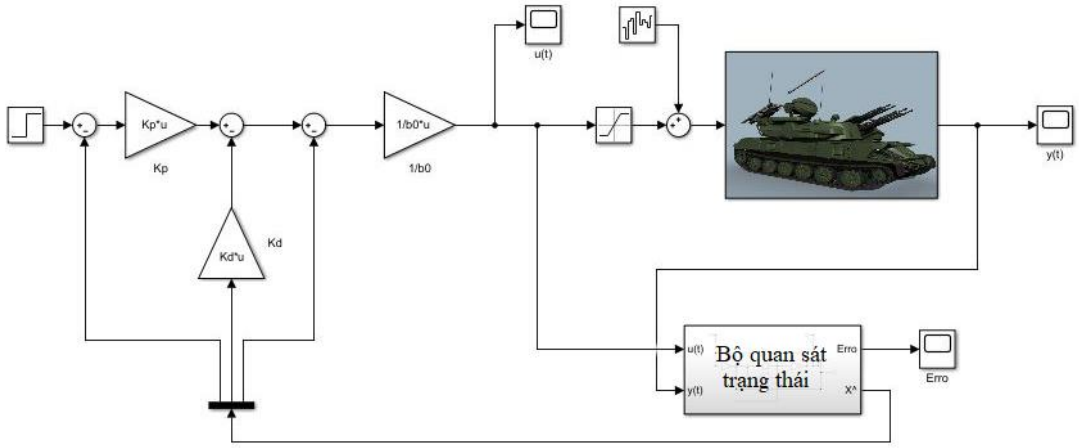
$$l_1 = -3\lambda;\ l_2 = 3\lambda^2;\ l_3 = -\lambda^3. \quad (15)$$

Việc tìm ra l_1, l_2, l_3 sẽ dựa trên nguyên tắc gán các điểm cực hợp lý cho bộ quan sát. Các điểm cực λ của bộ quan sát phải được đặt ở bên trái điểm cực của vòng kín. Có thể chọn như sau: $\lambda = (2 \div 10)s^k$.

Với hệ kín có thời gian quá độ $T_{qđ}$ theo tiêu chuẩn 2%, thì giá trị s^k được tính gần đúng:

$$s^k \approx -\frac{4}{T_{qđ}}. \quad (16)$$

3. MÔ PHỎNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN BÁM TỐC ĐỘ KÊNH TẦM CHO THÁP PHÁO TỔ HỢP ZSU-23-4



Hình 3. *Mô phỏng điều khiển ADRC kênh tầm pháo trên tổ hợp PPK Zsu 23-4 trong phần mềm Matlab.*

Khi thiết kế bất cứ bộ điều khiển nào, ta cũng cần khảo sát độ bão hòa điều khiển, bao gồm giới hạn về công suất bộ điều khiển, giới hạn về gia tốc của hệ thống truyền động, vùng hệ thống không hoạt động,… Với bộ điều khiển ADRC cũng tương tự, nếu ta chọn giá trị nghiệm cực mong muốn λ càng lớn, hay thời gian quá độ càng nhỏ sẽ làm cho giá trị các phần tử của ma trận độ lợi L càng tăng. Điều này giúp tăng tốc độ hội tụ sai số trạng thái dự báo, nhưng lại tạo ra tín hiệu điều khiển rất lớn, có thể vượt quá công suất của bộ điều khiển thực tế và không an toàn cho hệ thống. Để mô phỏng trạng thái bão hòa của bộ điều khiển, ta đặt giới hạn cho tín hiệu điều khiển $|u(t)| \le 10,$ và xem kết quả tác động lên hệ thống của bộ điều khiển khi thời gian quá độ thay đổi.

Cấu trúc điều khiển ADRC trên kênh tầm pháo ZSU 23-4 được biểu diễn như hình 3.

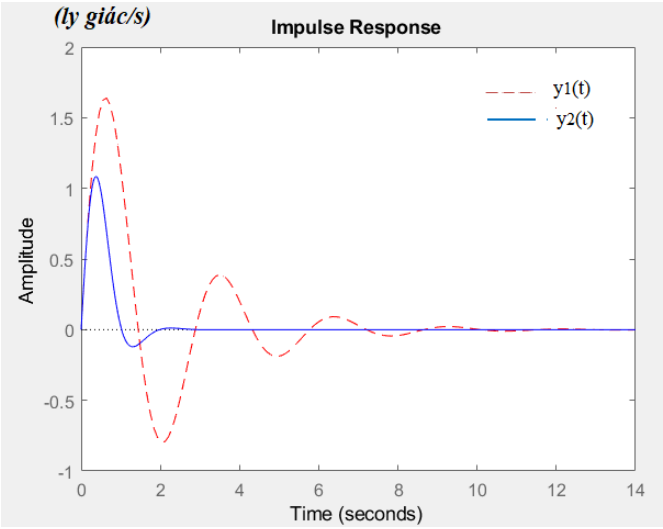
Chọn các giá trị thời gian quá độ $T_1 = 0,3(s), T_2 = 0,4(s), T_3 = 0,5(s), T_4 = 1,2(s).$

Bằng phép thử thực nghiệm chọn giá trị $K_p = (s^k)^2; K_D = -2s^k; \lambda = 3s^k.$

Theo công thức (16) sẽ tính được các giá trị tương ứng s^k và ma trận độ lợi L.

Theo tài liệu tham khảo [2], có thể ước lượng tham số hệ thống $b_0 = \dfrac{K}{T^2} = 4,95.$

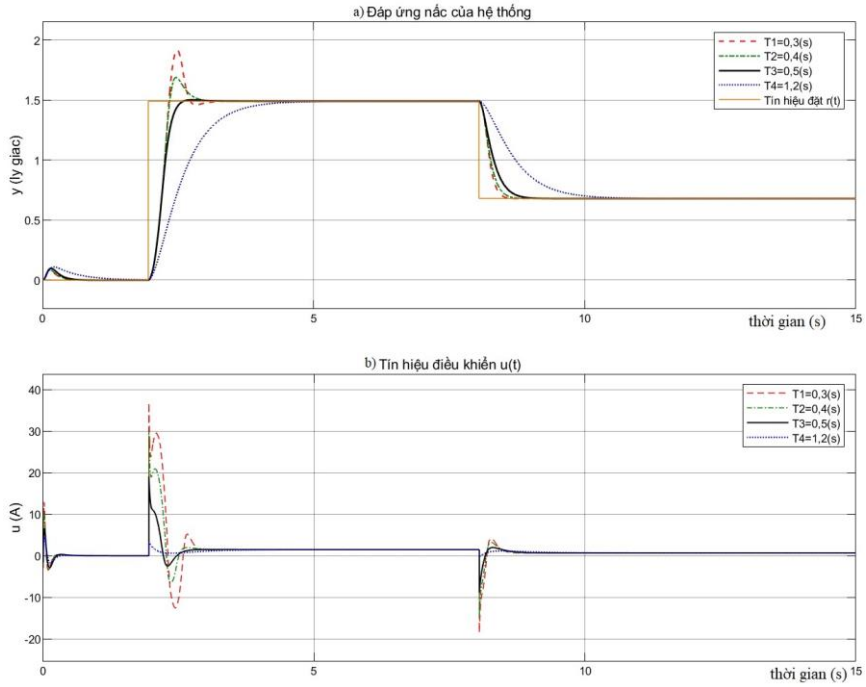
Kết quả thử nghiệm điều khiển bám tốc độ sau khi dùng bộ điều khiển ADRC với kênh tầm pháo trên tổ hợp PPK ZSU 23-4 được thể hiện ở hình sau:



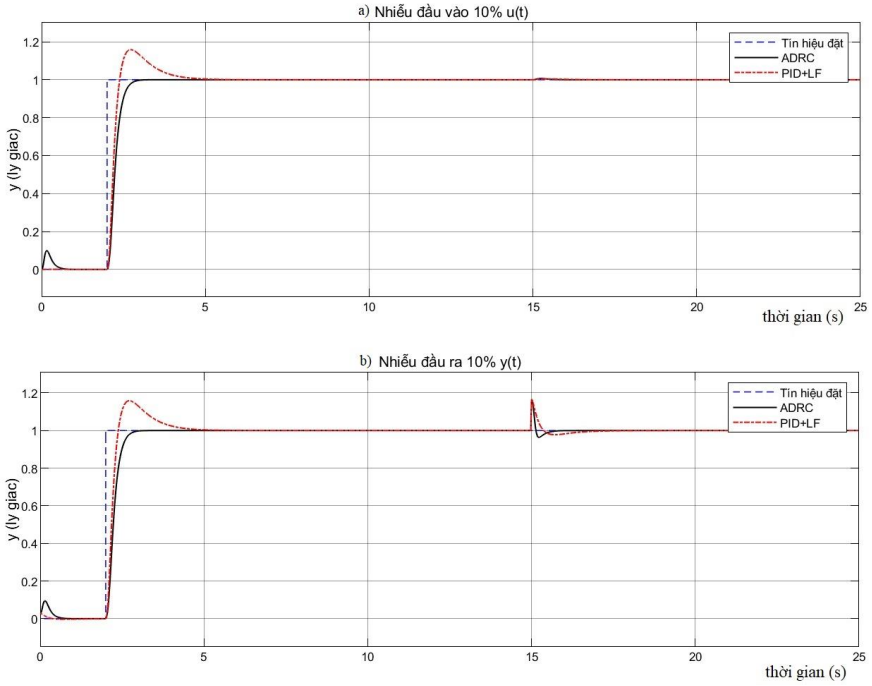
Hình 4. *Đáp ứng xung đơn vị của hệ thống kênh tầm nguyên bản – $y_1(t)$ và hệ thống khi sử dụng bộ điều khiển ADRC– $y_2(t)$.*

Nhận thấy bộ điều khiển ADRC đã hoạt động hiệu quả, giúp làm giảm thời gian tác động và số chu kỳ dao động của đầu ra hệ thống điều khiển truyền động kênh tầm trên mô hình pháo ZSU 23-4 giảm từ 4 chu kỳ dao động xuống còn 1 chu kỳ dao động (hình 4). Việc điều khiển bám tốc độ tại những điểm đặt khác nhau với tín hiệu điều khiển như trên hình 5a thì đầu ra được xác lập đảm bảo chất lượng theo yêu cầu theo thời gian quá độ đã thiết kế. Tuy nhiên, với giá trị thời gian quá độ $T_1 = 0,3(s), T_2 = 0,4(s),$ thì độ vọt lố của đầu ra khá cao và biên độ tín hiệu điều khiển $u(t)$ cũng rất lớn, vượt ngưỡng giới hạn đặt ra ban đầu $|u(t)| \le 10,$ (hình 5b). Với giá trị $T_3 = 0,5(s),$ thì độ vọt lố đầu ra bằng không, biên độ tín hiệu điều khiển nằm trong dải cho phép, nên có thể kết luận đây chính là giá trị thời gian quá độ nhỏ nhất cho phép thiết lập của bộ điều

khiển ADRC. Để đánh giá toàn diện hơn, ta so sánh chất lượng điều khiển của bộ điều khiển ADRC với bộ điều khiển PID kết hợp với bộ lọc thông thấp (LF).



Hình 5. *Điều khiển bám tốc độ tại những điểm đặt khác nhau.*



Hình 6. *(a) Tác động của nhiễu đầu vào 10% u(t); (b) tác động của nhiễu đầu ra 10% y(t).*

Nhận xét: Trong thực tế, bộ điều khiển PID thường được sử dụng kết hợp với bộ lọc thông thấp để hạn chế sự nhạy cảm của khâu vi phân với nhiễu đo lường và sự thay đổi tín hiệu điểm

đặt. Trên hình 6 (a), (b) thể hiện đáp ứng của hệ thống khi cho nhiễu tác động lên đầu vào và đầu ra. Dễ thấy với cả hai bộ điều khiển, hệ thống đều ít bị tác động bởi nhiễu đầu vào $10\%u(t)$. Còn khi tác động nhiễu đầu ra $10\%y(t)$ tại thời điểm $T = 15(s)$, hệ thống nhanh chóng dập tắt tác động sau $0{,}4(s)$ đối với bộ điều khiển ADRC và sau $1(s)$ đối với bộ điều khiển "PID+LF". Ở cả hai trường hợp, khi sử dụng bộ điều khiển ADRC thời gian đạt được giá trị xác lập nhanh hơn và độ vọt lố đầu ra bằng không, thấp hơn so với trường hợp sử dụng bộ điều khiển"PID+LF".

4. KẾT LUẬN

Hệ thống điều khiển truyền động kênh tầm trên tổ hợp pháo ZSU 23-4 dựa trên nguyên lý điều khiển van tiết lưu bằng cuộn hút điện từ, có những yếu tố phi tuyến tác động nên rất khó xác định được một mô hình toán học mô tả chính xác. Bài báo đã đưa ra một phương pháp điều khiển chủ động loại bỏ nhiễu ADRC cho hệ dao động bậc hai dựa trên khảo sát đáp ứng xung của hệ thống và kỹ thuật phân tích SVD. Kết quả mô phỏng trong phần mềm Matlab đã thể hiện được giá trị đầu ra bám nhanh so với giá trị thiết lập, độ vọt lố thấp và ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu tác động. Phương pháp điều khiển cũng thể hiện được ưu điểm khi so sánh với bộ điều khiển PID kết hợp với bộ lọc thông thấp. Kết quả nghiên cứu này mở ra một hướng nghiên cứu ứng dụng phương pháp điều khiển ADRC cho hệ truyền động kênh hướng của tháp pháo và các hệ truyền động khác trên tổ hợp PPK ZSU 23-4, từ đó có thể so sánh, đánh giá toàn diện hơn khả năng giảm nhiễu đa kênh của bộ điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Đề tài cấp Bộ Quốc Phòng: *"Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo hệ thống điều khiển hỏa lực sử dụng khí tài quang điện tử thay thế hệ thống điều khiển hỏa lực và khí tài radar thế hệ cũ cho tổ hợp pháo phòng không tự hành ZSU-23-4"*, Viện Tự động hóa KTQS.

[2]. Kung, S. Y., *"A New Identification and Model Reduction Algorithm via Singular Value Decompositions,"* Proc. Twelfth Asilomar Conf. on Circuits, Systems and Computers, November 6-8, 1978, p. 705-714.

[3]. Lennart Ljung, "*System Identification: Theory for the User"*, Prentice-Hall, UT library code WK 62-5:514/518 l065, 1987

[4]. Z. Gao, Y. Huang, J. Han, *"An alternative paradigm for control system design"*, Proceedings of 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, December 4-7, 2001, pp. 4578-4585.

[5]. H. Yin, Z. Zhu, F. Ding, *"Model order determination using the Hankel matrix of impulse responses"* Appl. Math. Lett. 2011, 24, 797-802.

[6]. G. Herbst, *"A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) as a Control Tool for Practitioners,"* Electronics, vol. 2, no. 3, pp. 246–279, Aug. 2013.

[7]. S. Zhao and Z. Gao, *"An Active Disturbance Rejection based Approach to Vibration Suppression in Two-Inertia Systems,"* Asian Journal of Control, Vol 15, No. 3, pp. 146-155, 2013.

[8]. Q. Zheng, L. Q. Gao and Z. Gao, *"On validation of extended state observer through analysis and experimentation,"* Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 134, no. 2, Jan. 2012.

[9]. J. Li, Y. Xia, X. Qi and Z. Gao, *"On the necessity, scheme, and basis of the linear–nonlinear switching in active disturbance rejection control,"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 2, pp. 1425-1435, Feb. 2017.

[10]. L. Dong, P. Kandula and Z. Gao, *"On a robust control system design for an electric power assist steering system,"* in Proceedings of American Control Conference,2010, pp. 5356-5361.

[11]. B. Sun and Z. Gao, *"A DSP-based active disturbance rejection control design for a 1-kW H-bridge DC–DC power converter,"* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 5, pp. 1271–1277, Oct. 2005.

[12]. Y. Su, C. Zheng, and B. Duan, *"Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors,"* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 3, pp. 814–823, Jun. 2005.

[13]. M. Valenzuela, J. M. Bentley, P. C. Aguilera, and R. D. Lorenz, *"Improved coordinated response and disturbance rejection in the critical sections of paper machines,"* IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 3, pp. 857–869, May/Jun. 2007.
[14]. Z. Fan and L. Yan, *"Type synthesis of a fully decoupled parallel wrist manipulator,"* in Proceedings of the 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation-Volume 03. IEEE Computer Society, 2011, pp. 1068–1071.
[15]. Y. Li, J. Huang, and H. Tang, *"A compliant parallel xy micromotion stage with complete kinematic decoupling,"* Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, vol. 9, no. 3, pp. 538–553, 2012.
[16]. Huang Y, Xu KK, Han J, Lam J. *"Flight control design using extended state observer and non-smooth feedback"*. In: Proceedings of the 40th IEEE conference on decision and control, Orlando, USA; 2001. p. 223–8.
[17]. Nakao M, Ohnishi K, Miyachi K. *"A robust decentralized joint control based on interference estimation"*. In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation; 1987. p. 326–31.

ABSTRACT

RESEARCHING AND DESIGNING A CONTROLLER
FOR ANGULAR RATE TRACKING OF GUN-TURRET IN ELEVATION PLANE
ON IMPROVED SELF-PROPELLED AINTI-AIRCRAFT GUN ZSU-23-4

The self-propelled anti-aircraft gun ZSU-23-4 is equipped with a hydraulic transmission system using axial piston pumps and motors that allows the gun and turret to be rotated in elevation and azimuth plane at different speeds throught pumps's flow control. In particular, the elevation pump's flow is controlled by a mechanism using electromagnetic coils, while the azimuth pump's flow is controlled by a mechanism using 2-phase asynchronous electric motor. The article introduces a solution to design an improved controller with output works in pulse mode and proposes a angular rate tracking control algorithm in elevation plane for the gun-turret.

Keywords: ZSU-23-4; Rate tracking control; ADRC algorithm.

Nhận bài ngày 15 tháng 9 năm 2021
Hoàn thiện ngày 20 tháng 10 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 28 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: Viện Tự động hóa KTQS.
*Email: ducchinhcpx@gmail.com.