

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG HỆ BẮM ĐIỆN THỦY LỰC KÊNH HƯỚNG CHO PHÁO TÀU AK-176M ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI

RESEARCH ON DEVELOPING A HYDRAULIC POWER-DRIVEN DIRECTIONAL CHANNEL FOR AK-176M SHIP CANNON APPLYING ADAPTIVE CONTROL

Phạm Tuấn Thành¹,
Hoàng Hải Sơn², Hoàng Mạnh Cường^{3,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.199>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu và thiết kế hệ bám điện thủy lực cho pháo AK-176M có xét đến tính phi tuyến, nhiễu. Nội dung chi tiết bài báo thể hiện quá trình nghiên cứu và xây dựng bộ điều khiển thích nghi cho hệ thống bám điện thủy lực pháo AK-176M trên tàu Hải quân, bao gồm cả các yếu tố như độ chính xác của hệ thống, tương tác giữa các thành phần. Thuật toán tổng hợp được kiểm chứng mô phỏng trên Matlab-Simulink.

Từ khóa: Hệ thống điện - thủy lực, kênh hướng, pháo AK-176M, hệ thống thích nghi, bộ điều khiển modal.

ABSTRACT

The paper presents the research results on the electro-hydraulic tracking system of the AK176M naval gun, considering nonlinearity and noise. It focuses on constructing a mathematical model of the electro-hydraulic tracking system and designing an adaptive controller for it with component interactions to enhance stability and accuracy. The algorithm is tested on Matlab-Simulink software.

Keywords: Electro-hydraulic tracking system, direction channel, AK-176M naval gun, adaptive control system, modal controller.

¹Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự

²Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

³Học viện Hải quân

*Email: manhcuong.haiquan@gmail.com

Ngày nhận bài: 24/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

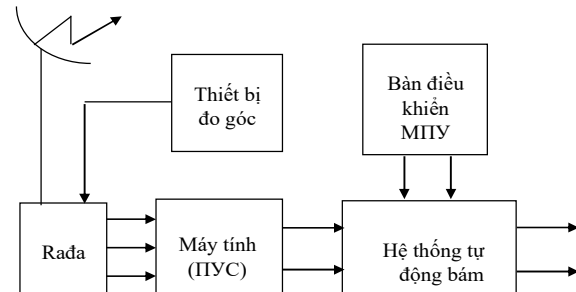
Pháo AK-176M được trang bị cho các tàu chiến hiện đại của quân chủng Hải quân dùng để tiêu diệt các mục tiêu trên không, trên biển và trên bờ. Việc điều khiển pháo tới mục tiêu được thực hiện nhờ radar điều khiển bắn hoặc bằng tay thông qua kính ngắm quang học. Sơ đồ nguyên lý chung được trình bày trên hình 1.

Tổ hợp pháo AK-176M có hai chế độ làm việc chính [1]:

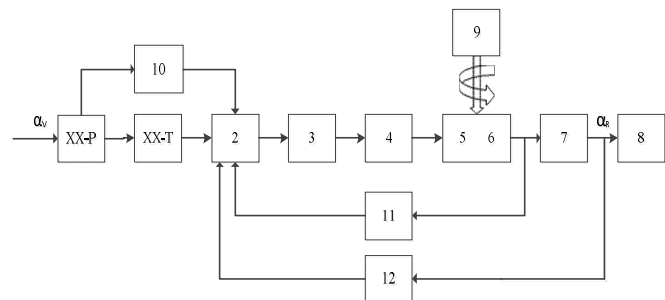
- Chế độ bắn từ xa từ hệ thống máy điều khiển bắn (chế độ chính);

- Chế độ dự phòng bắn bằng kính ngắm quang học.

Radar đo các thông số của mục tiêu: cự li D , góc tà ε và góc phương vị q . Các thông số này được đưa vào đầu vào của máy tính (ПYC). Máy tính có nhiệm vụ tìm ra tọa độ của điểm bắn dưới dạng các sai lệch về tầm $\Delta\varphi$ và sai lệch về hướng Δq . Khi radar điều khiển pháo bị hỏng, thực hiện điều khiển bắn pháo ở chế độ dự phòng. Ở chế độ này quá trình điều khiển pháo do trực thủ trực tiếp ngắm và điều khiển kính ngắm hướng về phía mục tiêu. Các tín hiệu về thông số sai lệch tầm $\Delta\varphi$ và hướng Δq do pháo thủ trực tiếp điều khiển ở bàn điều khiển tại bệ pháo (МПУ).



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý chung của hệ bám pháo AK-176M



Hình 2. Sơ đồ khối cấu trúc của hệ truyền động bám pháo AK-176M

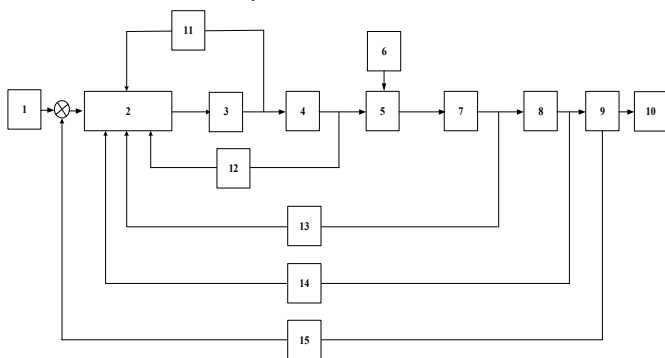
XX-P. Thiết bị phát; XX-T. Thiết bị thu; 2. Thiết bị khuếch đại và biến đổi điện tử; 3. Cơ cấu điện tử; 4. Khuếch đại thủy lực; 5, 6. Thiết bị chấp hành (bơm và động cơ thủy lực); 7. Hộp đổi tốc; 8. Đối tượng điều khiển; 9. Động cơ lái; 10. Thiết bị bù; 11. Tín hiệu phản hồi; 12. Thiết bị thu; α_r . Góc điều khiển; α_p . Góc quay của pháo.

Các thông số về sai lệch tầm và hướng được đưa tới đầu vào thiết bị đo lường của hệ truyền động bám (hình 2). Các

thông số này được đưa tới khuếch đại và biến đổi điện tử (2), tại đây nó được kết hợp với các tín hiệu phản hồi (11), (12) để hiệu chỉnh góc điều khiển, sau đó nó được biến đổi thành tín hiệu điện và được khuếch đại lên đủ lớn ở khối khuếch đại điện tử. Tín hiệu sau khi đã được khuếch đại sẽ đưa tới cuộn dây nam châm điện thuộc bộ phận điều khiển (bộ khuếch đại thủy lực (4)), dưới tác động của nam châm làm bộ phân phối thủy lực dịch chuyển. Tín hiệu đưa vào cuộn dây nam châm điện là tín hiệu một chiều giá trị phụ thuộc vào góc sai lệch, còn cực tính phụ thuộc vào chiều của góc sai lệch. Khi van phân phối hoạt động cấp dầu đến xilanh lực, cán của piston nằm trong xilanh lực dịch chuyển (được gắn chặt với đĩa nghiêng) nên nó làm lệch giá lắc của bơm thủy lực (5). Bơm thủy lực được nối với động cơ điện M bên ngoài, khi động cơ điện quay làm bơm thủy lực quay và cấp dầu cao áp đến mô tơ thủy lực (6), làm mô tơ thủy lực quay, thông qua hộp đổi tốc (7) làm pháo (8) quay về vị trí giảm góc sai lệch. Tốc độ quay và chiều quay của mô tơ thủy lực phụ thuộc vào giá trị và chiều của tín hiệu sai lệch.

Sau thời gian làm việc, hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-176M sẽ xuất hiện khe hở giữa các bánh răng truyền động (hộp đổi tốc); tổn hao lưu lượng trong hệ thống thủy lực; sự giãn nở của các đường ống dẫn dầu và thay đổi áp suất của dầu do ảnh hưởng của nhiệt độ,... Dẫn đến ảnh hưởng sai lệch trong quá trình hoạt động. Nguyên lý hoạt động của hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-176M ở kênh tầm và kênh hướng cơ bản là giống nhau nên khi ta nghiên cứu kênh hướng thì dễ dàng hiểu được kênh tầm. Để đảm bảo và nâng cao chất lượng điều khiển của hệ thống khi có sự xuất hiện của các yếu tố bất định hoặc biến đổi không biết trước giải pháp của bài báo đưa ra là xây dựng bộ điều khiển thích nghi cho hệ truyền động bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M.

2. MÔ HÌNH HỆ DẪN ĐỘNG KÊNH HƯỚNG VỚI CƠ CẤU CHẤP HÀNH THỦY LỰC



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc của hệ truyền động bám pháo AK-176M

1. Góc điều khiển; 2. Khối điều khiển; 3. Khối khuếch đại vòi phun - bản chắn (VP-BC); 4. Khối xi lanh điều khiển; 5. Bơm thủy lực; 6. Động cơ lai; 7. Hộp van; 8. Mô tơ thủy lực; 9. Hộp đổi tốc; 10. Phân tử chấp hành (Bệ pháo); 11. Cảm biến dịch chuyển tuyến tính; 12. Cảm biến áp suất; 13. Cảm biến tốc độ Mô tơ thủy lực; 14. Tín hiệu phản hồi vị trí; 15. Cảm biến tốc độ góc quay bệ pháo.

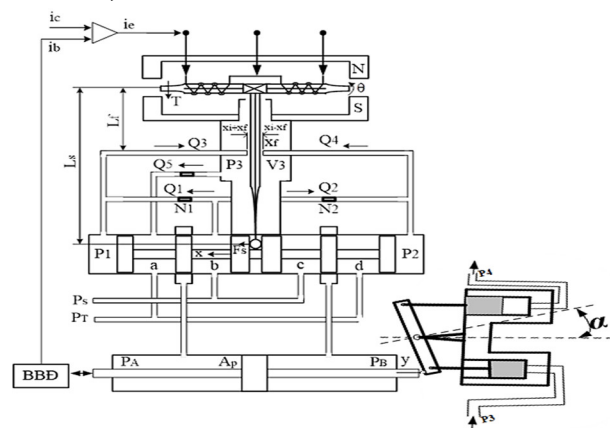
Hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-176M là hệ thống điều khiển vòng kín. Bài toán điều khiển bệ pháo đặt ra là góc quay của bệ pháo bám sát theo giá trị góc điều

khiển. Từ sơ đồ nguyên lý (hình 1), sơ đồ chức năng (hình 2) và yêu cầu của bài toán ta mô hình hóa được sơ đồ cấu trúc của hệ truyền động điện thủy lực pháo AK-176M như hình 3.

Sơ đồ cấu trúc (hình 3) trên thể hiện rõ quá trình điều khiển hệ thống thủy lực của bộ pháo, sử dụng các tín hiệu phản hồi lấy từ các cảm biến. Có 5 tín hiệu phản hồi được sử dụng trong quá trình điều khiển: Vòng 1: Tín hiệu phản hồi vị trí của piston trong xilanh điều khiển (11); Vòng 2: Tín hiệu phản hồi tín hiệu độ chênh áp suất vào ra động cơ thủy lực (12); Vòng 3: Tín hiệu phản hồi tốc độ quay mô tơ thủy lực (13); Vòng 4: Tín hiệu phản hồi tốc độ góc quay bệ pháo (14); Vòng 5: Tín hiệu phản hồi góc quay bệ pháo (15).

Quá trình phát sinh mô men của động cơ thủy lực: Sơ đồ thủy lực của động cơ thủy lực được trình bày trong hình 3 gồm: Bơm thủy lực với lưu lượng được điều chỉnh bởi giá lắc (GL), cung cấp lưu lượng dầu cho động cơ thủy lực. Phần khuếch đại tín hiệu điện điều khiển cho hệ thống thông qua cơ cấu điện tử và khuếch đại thủy lực kiểu dạng vòi phun - bản chắn, theo tín hiệu điện điều khiển cấp đến cuộn dây làm cho thay đổi góc nghiêng phần ứng của cơ cấu điện tử, việc thay đổi góc nghiêng này làm lệch cánh chắn dẫn tới chênh lệch áp suất trong bộ khuếch đại làm con trượt trong cơ cấu van 4 cửa dịch chuyển, mở van để dầu thủy lực vào khoang xi lanh điều khiển. Khi có dầu thủy lực vào khoang, xảy ra chênh lệch áp suất làm cán của piston nằm trong xilanh điều khiển dịch chuyển (được gắn chặt với giá lắc của bơm thủy lực) làm lệch giá lắc của bơm thủy lực, bơm thủy lực quay và cấp dầu cao áp đến mô tơ thủy lực, làm mô tơ thủy lực quay, thông qua hộp đổi tốc làm pháo quay theo tỉ lệ với mô tơ thủy lực.

Như vậy động học của cơ cấu chấp hành được xây dựng mô tả mối quan hệ giữa điện áp điều khiển u, mô men làm quay phần ứng của cơ cấu điện tử θ, độ dịch chuyển của piston xilanh điều khiển y và sự chênh lệch áp suất vào - ra mô tơ thủy lực.



Hình 4. Mô hình hệ chấp hành thủy lực

* Phương trình cân bằng momen trên phần ứng [2, 5]:

$$\ddot{\theta} = J^{-1}uK_RK_i - J^{-1}f_0\dot{\theta} - J^{-1}(K_T - K_0)\theta \tag{1}$$

Trong đó: θ - Góc quay của cơ cấu điện tử; J - Mô men quán tính của phần quay; u - điện áp điều khiển cấp vào

cuộn dây; K_i - Hệ số dòng điện; K_θ - Hệ số góc quay phản ứng; f_θ - Hệ số giảm chấn; $K_R = 1/R$ (R - Điện trở của cơ cấu điện từ); K_T : Mômen cản thủy lực.

- Xilanh điều khiển:

Phương trình mô tả độ dịch chuyển của piston trong xilanh điều khiển như sau [3, 5]:

$$\dot{y} = T_{tp}^{-1} K_{dk} \theta - T_{tp}^{-1} y \quad (2)$$

Trong đó: y - Độ dịch chuyển của piston trong xilanh điều khiển; T_{tp} - Hệ số thời gian của khuếch đại van trượt; K_{dk} - Hệ số khuếch đại. T_{tp} , K_{dk} được xác định:

$$T_{tp} = K_p \cdot \frac{A_p^2}{K_b} \cdot \frac{dP_{dk}}{dQ_{dk}}; K_{dk} = \frac{A_p}{K_b} \cdot \frac{dP_{dk}}{dx} \cdot d_0 \quad (3)$$

Trong đó: A_p - Diện tích piston xilanh điều khiển; K_p - Hệ số cơ học của van trượt; $d_0 \approx \frac{x}{\theta}$: Đường kính cánh chắn đàn hồi.

* Phương trình của bơm thủy lực:

- Phương trình cân bằng áp suất [2, 6]:

$$\frac{V_t}{4\beta_e} \Delta \dot{P}_B = -k_M \dot{\phi} - C_t \Delta P_B + Q(t) + Q_B \quad (4)$$

Trong đó: V_t - Thể tích thùng chứa; β_e - Hệ số đàn hồi của dầu thủy lực; ΔP_B - Độ chênh lệch áp suất đầu vào - ra của bơm thủy lực; Q - Tổng hao lưu lượng; Q_B - Lưu lượng của bơm; k_M - Hệ số thể tích của động cơ; C_t - Hệ số rò.

- Phương trình tính lưu lượng [3, 5]:

$$Q_B = A_{pt} \cdot h \cdot z_{pt} \cdot \omega \cdot 10^3 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z_{pt} \cdot \omega \cdot 10^3 \cdot D \cdot \tan(\alpha) \quad (5)$$

Trong đó: z_{pt} - Số piston; D - Đường kính của rôto trên có đặt các xilanh; ω - Tốc độ quay của động cơ lai; h - Hành trình tối đa của piston trong xilanh.

Do góc lặc của bơm thủy lực α có giá trị nhỏ, nên ta có thể xấp xỉ như sau:

$$\tan(\alpha) \approx \alpha; y \approx d_b \cdot \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{y}{d_b} \quad (6)$$

Trong đó: d_b là bán kính của đĩa nghiêng bơm thủy lực.

Từ (4) - (6) ta có:

$$\Delta \dot{P}_B = \frac{-4\beta_e}{V_t} k_M \dot{\phi} - \frac{4\beta_e}{V_t} C_t \Delta P_B + \frac{4\beta_e}{V_t} \cdot d_b^{-1} \cdot K_b \cdot y + \frac{4\beta_e}{V_t} Q(t) \quad (7)$$

Trong đó: $K_b = \frac{\pi d^2}{d} z_{pt} \omega \cdot 10^3 D$

* Thành phần mô men chính phát sinh do hoạt động của mô tơ thủy lực [2, 5]:

$$\tau_m = k_v \cdot \Delta P_B = J_t \dot{\phi} + f_1 \phi \quad (8)$$

Trong đó: k_v - Hệ số mô men phụ thuộc kết cấu của cơ cấu chấp hành; $\Delta P_B = P_3 - P_4$ - Hiệu áp suất trên các đầu vào và đầu ra của mô tơ thủy lực; J_t - Tải quán tính; f_1 - Hệ số rò rỉ động cơ thủy lực; ϕ - Góc quay của mô tơ thủy lực.

Từ (8) ta có phương trình vi phân:

$$\ddot{\phi} = J_t^{-1} k_v \cdot \Delta P_B - J_t^{-1} f_1 \phi \quad (9)$$

Từ các phương trình được xây dựng ở trên, ta có hệ các phương trình vi phân như sau:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = J_t^{-1} k_v \cdot \Delta P_B - J_t^{-1} f_1 \phi \\ \Delta \dot{P}_B = \frac{-4\beta_e}{V_t} k_M \dot{\phi} - \frac{4\beta_e}{V_t} C_t \Delta P_B + \frac{4\beta_e}{V_t} \cdot d_b^{-1} \cdot K_b \cdot y + \frac{4\beta_e}{V_t} Q(t) \\ \dot{y} = T_{tp}^{-1} K_{dk} \theta - T_{tp}^{-1} y \\ \ddot{\theta} = J^{-1} u K_R K_i - J^{-1} f_\theta \dot{\theta} - J^{-1} (K_T - K_\theta) \theta \end{cases} \quad (10)$$

Hệ thống tám mô tả bởi hệ phương trình (10) là hệ phi tuyến. Để đơn giản hóa chúng ta có thể bỏ qua tổn hao lưu lượng trong hệ thống $\frac{4\beta_e}{V_t} Q(t)$, ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = J_t^{-1} k_v \cdot \Delta P_B - J_t^{-1} f_1 \phi \\ \Delta \dot{P}_B = \frac{-4\beta_e}{V_t} k_M \dot{\phi} - \frac{4\beta_e}{V_t} C_t \Delta P_B + \frac{4\beta_e}{V_t} \cdot d_b^{-1} \cdot K_b \cdot y \\ \dot{y} = T_{tp}^{-1} K_{dk} \theta - T_{tp}^{-1} y \\ \ddot{\theta} = J^{-1} u K_R K_i - J^{-1} f_\theta \dot{\theta} - J^{-1} (K_T - K_\theta) \theta \end{cases} \quad (11)$$

Đặt $x_5 = \dot{\theta}; x_4 = \theta; x_3 = y; x_2 = \Delta P_B; x_1 = \dot{\phi}$, ta có hệ phương trình vi phân như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -J_t^{-1} f_1 x_1 + J_t^{-1} k_v \cdot x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-4\beta_e}{V_t} k_M x_1 - \frac{4\beta_e}{V_t} C_t x_2 + \frac{4\beta_e}{V_t} \cdot d_b^{-1} \cdot K_b \cdot x_3 \\ \dot{x}_3 = -T_{tp}^{-1} x_3 + T_{tp}^{-1} K_{dk} x_4 \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = -J^{-1} (K_T - K_\theta) x_4 - J^{-1} f_\theta x_5 + J^{-1} K_R K_i u \end{cases} \quad (12)$$

Để thuận tiện cho việc tính toán ta đặt:

$$\begin{aligned} a_1 &= -J_t^{-1} f_1; a_2 = J_t^{-1} k_v; a_3 = \frac{-4\beta_e}{V_t} k_M; a_4 = -\frac{4\beta_e}{V_t} C_t; \\ a_5 &= \frac{4\beta_e}{V_t} \cdot d_b^{-1} \cdot K_b; a_6 = -T_{tp}^{-1}; a_7 = T_{tp}^{-1} K_{dk}; a_8 = -J^{-1} (K_T - K_\theta); \\ a_9 &= -J^{-1} f_\theta; b = J^{-1} K_R K_i \end{aligned} \quad (13)$$

Khi đó hệ phương trình trạng thái mô tả hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 \\ \dot{x}_2 = a_3 x_1 + a_4 x_2 + a_5 x_3 \\ \dot{x}_3 = a_6 x_3 + a_7 x_4 \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = a_8 x_4 + a_9 x_5 + bu \\ y = cx_1 \end{cases} \quad (14)$$

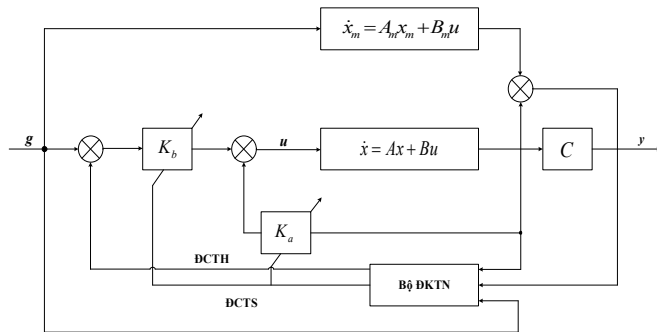
Mô tả toán học hệ tám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M ở dạng phương trình trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Với: } A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_4 & a_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_8 & a_9 \end{bmatrix};$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T; C = [c \ 0 \ 0 \ 0 \ b] \quad (16)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc điều chỉnh thích nghi theo mô hình mẫu với điều chỉnh tham số (ĐCTS) và điều chỉnh tín hiệu (ĐKTH)

* Xây dựng mô hình mẫu

Mô hình mẫu là mô hình có các đặc tính thỏa mãn các yêu cầu mong muốn của hệ thống. Mô hình mẫu cho hệ bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M được xây dựng từ mô hình tuyến tính hóa của hệ thống nguyên bản kết hợp với bộ điều khiển phản hồi trạng thái.

Phương trình điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_M = A_M x_M + B_M u_0 \\ y_M = C x_M \end{cases} \quad (17)$$

Trong đó: A_M, B_M là các ma trận điều khiển; A_M là ma trận dạng Hurwitz.

Để tìm ma trận A_M, B_M ta xét phương trình tuyến tính sau:

$$\dot{x} = (A + BK)x + B u_0 \quad (18)$$

Từ (17) và (18) ta có ma trận A_M, B_M ở dạng:

$$\begin{cases} A_M = A + BK \\ B_M = B \end{cases} \quad (19)$$

* Xây dựng luật điều khiển thích nghi với hiệu chỉnh tham số

Thực chất của việc áp dụng điều khiển thích nghi cho một hệ thống là thiết kế bộ điều khiển sao cho đặc tính của hệ thống bám theo các đặc tính của mô hình mẫu.

Bài toán điều khiển thích nghi trong khuôn khổ cấu trúc hệ thích nghi theo mô hình mẫu, phương trình được biểu diễn ở dạng [7]:

$$\begin{cases} \dot{x} = [A(t) + a(x)]x + [B(t) + b(x)]u_\Sigma + f \\ y = Cx \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó: $A(t), B(t)$ - Ma trận không cố định, xác định thành phần tuyến tính của các tham số đối tượng điều khiển

(có kích thước tương ứng là $n \times n$ và $n \times m$); $a(x), b(x)$ - Thành phần phi tuyến của đối tượng điều khiển; C - Ma trận đầu ra cố định; u_Σ - Vector tín hiệu điều khiển (kích thước m). Trong phần tiếp theo ta giả thiết rằng tất cả các biến trạng thái đều đo được, tức là $y = Cx$ (C - Ma trận đường chéo đơn vị). Ở đây y - Vector đầu ra của đối tượng.

Ta phân vế phải của phương trình (20) ra phần tuyến tính dùng, phần phi tuyến và mô tả dưới dạng sau [4, 7]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0 x + B_0 u_\Sigma + \sigma + \varphi \\ y = x \end{cases} \quad (21)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} \sigma = (A - A_0)x + (B - B_0)u_\Sigma \\ \varphi = a(x)x + b(x)u + f \end{cases} \quad (22)$$

A_0, B_0 - Các ma trận hằng số đặc trưng cho thành phần tuyến tính dùng có kích thước tương ứng ($n \times n$), ($n \times m$); σ - Thành phần tham số sai khác; φ - Thành phần phi tuyến của đối tượng.

Mục tiêu điều khiển sẽ là:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} (x - x_M) \rightarrow 0 \quad (23)$$

Trong đó: $e = x - x_M$ là vector sai lệch giữa đầu ra mô hình mẫu và đối tượng điều khiển.

Tín hiệu điều khiển có dạng như sau:

$$u_\Sigma = K_A x + K_B (u_0 + u_a + u_1) \quad (24)$$

Trong đó: K_A, K_B là các ma trận tham số hiệu chỉnh có kích thước ($n \times n, n \times m$); u_a - Tín hiệu điều khiển thích nghi; u_1 - tín hiệu từ bộ điều khiển Modal.

Thay phương trình (24), (22) vào phương trình (21) ta có phương trình sau:

$$\dot{x} = A_M x + B_M u_0 + [(A + BK_A - A_M)x + (BK_B - B_M)(u_0 + u_1) + BK_B u_a + \varphi] \quad (25)$$

Để phương trình (25) trùng với hệ phương trình mô hình mẫu thì biểu thức trong ngoặc vuông ở (25) phải bằng 0, hay ta có [8, 9]:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (A + BK_A) = A_M \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (BK_B) = B_M \\ BK_B u_a = -\varphi \end{cases} \quad (26)$$

Để hệ thống bám thích nghi kịp theo mô hình mẫu thì $e(t) \rightarrow 0$, tức là phải tồn tại giá trị $\lim_{t \rightarrow \infty} K_A = K_A^0, \lim_{t \rightarrow \infty} K_B = K_B^0$ thỏa mãn:

$$BK_A^0 = A_M - A, BK_B^0 = B_M \quad (27)$$

Đặt $\delta_A = K_A - K_A^0$
 $\delta_B = K_B - K_B^0$ } - Sai lệch tham số hiệu chỉnh so với giá trị tối ưu.

$\delta = [\delta_A \ \delta_B]$ - Vector tổng quát của sai lệch hiệu chỉnh so với giá trị tối ưu.

$W = [x \quad (u_0 + u_1)]$ - Vector tổng quát của tín hiệu điều khiển.

Phương trình (25) được viết lại như sau:

$$\dot{x} = A_M x + B_M u_0 + B_M \delta W + B_M u_a + \varphi \quad (28)$$

Từ phương trình sai số (23): $\Rightarrow \dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_M \quad (29)$

Thay (18) và (28) vào (29) ta được:

$$\dot{e} = A_M e + B_M \delta W + B_M u_a + \varphi \quad (30)$$

Xét hàm Lyapunov xác định dương [9]:

$$V(e, \delta) = \frac{1}{2} [e^T P e + (\delta^T \Gamma^{-1} \delta)] > 0 \quad (31)$$

$$P = P^T, P > 0; \Gamma = \text{diag}(\gamma_{ii}), \gamma_{ii} > 0 \quad (32)$$

Để hệ thống ổn định tiệm cận thì đạo hàm (31):

$$\dot{V}(e, \delta) \leq 0. \text{ Ta có:}$$

$$\dot{V}(e, \delta) = \frac{1}{2} [e^T (A_M^T P + A_M P) e + [e^T B_M P W \delta + (\delta^T \Gamma^{-1} \dot{\delta}) + e^T P \varphi + e^T P B_M u_a]] \leq 0 \quad (33)$$

Để bất đẳng thức (33) xảy ra thì các điều kiện sau phải đảm bảo:

- Tồn tại ma trận Q là ma trận vuông xác định dương, đối xứng bất kỳ thỏa mãn: $Q = Q^T$ và P là nghiệm của phương trình: $A_M^T P + P A_M = -Q \quad (34)$

- Các thành phần trong dấu ngoặc vuông (33) triệt tiêu nhau từng đôi một:

$$+ e^T B_M P W \delta = -(\delta^T \Gamma^{-1} \dot{\delta}) \Rightarrow \dot{\delta} = -\Gamma e B_M^T P W^T \quad (35)$$

$$+ u_a = -h \cdot \text{sign}(B_M^T P e) \quad (36)$$

Từ: $\begin{cases} \delta_A = K_A - K_A^0 \\ \delta_B = K_B - K_B^0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{\delta}_A = \dot{K}_A \\ \dot{\delta}_B = \dot{K}_B \end{cases} \quad (37)$

$\Gamma = [\Gamma_A \quad \Gamma_B]$ - Ma trận điều chỉnh tham số (ĐCTS).

Phương trình (37) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{K}_A = -\Gamma_A e B_M^T P x^T \\ \dot{K}_B = -\Gamma_B e B_M^T P (u_0 + u_1)^T \end{cases} \quad (38)$$

Trong đó: Γ_A, Γ_B, h là các ma trận đường chéo xác định dương điều chỉnh tham số (ĐCTS) và vector điều chỉnh tín hiệu (ĐCTH) (có kích thước lần lượt là $n \times n, m \times m$ và $m \times 1$).

Để tăng tốc độ điều chỉnh và giảm dao động, người ta đưa thêm vào thành phần tỷ lệ ở bên phải biểu thức (38), ta có biểu thức sau:

$$\begin{cases} \dot{K}_A = -\Gamma_A e B_M^T P x^T - \Lambda_A K_A \\ \dot{K}_B = -\Gamma_B e B_M^T P (u_0 + u_1)^T - \Lambda_B K_B \end{cases} \quad (39)$$

Trong đó: Λ_A, Λ_B là ma trận xác định dương Hurwitz.

Tín hiệu điều khiển thích nghi được đưa vào có dạng [7, 9]:

$$u_a(t) = K_A(t) \text{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n x + K_B(t) [u_0(t) + u_1(t)] \quad (40)$$

Trong đó: $f_p(x_r)$ là hàm trội [4].

Ma trận tham số hiệu chỉnh K_A, K_B được xác định như sau:

$$\begin{cases} \dot{K}_A(t) = -\gamma_A B_M^T P e \cdot \text{diag}\{f_{qr}(x_r)\}_1^n x^T - \lambda_A K_A(t), r = \overline{1, n} \\ \dot{K}_B(t) = -\gamma_B B_M^T P e (u_0 + u_1)^T - \lambda_B K_B(t) \end{cases} \quad (41)$$

Trong đó: $\gamma_A, \lambda_B, \gamma_B, \lambda_B$ là hệ số dương khuếch đại hiệu chỉnh tham số.

$$\text{diag}\{f_p(x_r)\}_1^n = \text{diag}\{f_p(x_1), f_p(x_2), \dots, f_p(x_r), \dots, f_p(x_q)\} \quad (42)$$

Trong hệ bám điện thủy lực pháo AK-176M sử dụng các hàm sau:

$$\text{diag}\{f_p(x_r)\}_1^5 \text{ và } \begin{cases} f_p(x_1) = f(x_1); f_p(x_2) = f(x_2); \\ f_p(x_3) = f(x_3); f_p(x_4) = f(x_4); f_p(x_5) = f(x_5) \end{cases} \quad (43)$$

Khi đó theo phương trình (40) luật điều khiển thích nghi với hiệu chỉnh tham số sẽ được viết lại:

$$u_a(t) = K_A(t) \text{diag}\{f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4), f(x_5)\} x + K_B(t) [u_0(t) + u_1(t)] \quad (44)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} K_A(t) = [k_{1A}(t) \quad k_{2A}(t) \quad k_{3A}(t) \quad k_{4A}(t) \quad k_{5A}(t)] \\ K_B(t) \end{cases} - \text{Vector}$$

hiệu chỉnh tham số

$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ - Vector các biến trạng thái.

Biến đổi (44) thành dạng vô hướng:

$$u_a(t) = k_{1A}(t) f(x_1) x_1 + k_{2A}(t) f(x_2) x_2 + k_{3A}(t) f(x_3) x_3 + k_{4A}(t) f(x_4) x_4 + k_{5A}(t) f(x_5) x_5 + K_B(t) [u_0(t) + u_1(t)] \quad (45)$$

Phương trình vi phân của tham số hiệu chỉnh như sau [10]:

$$\begin{cases} \dot{K}_A(t) = -\gamma_A B_M^T P e \cdot \text{diag}\{f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4), f(x_5)\} x^T - \lambda_A K_A(t) \\ \dot{K}_B(t) = -\gamma_B B_M^T P e (u_0 + u_1)^T - \lambda_B K_B(t) \end{cases} \quad (46)$$

Hoặc ở dạng vô hướng:

$$\begin{cases} \dot{k}_{1A}(t) = -\gamma_A f(x_1) B_M^T P e \cdot x_1^T - \lambda_A k_{1A}(t) \\ \dot{k}_{2A}(t) = -\gamma_A f(x_2) B_M^T P e \cdot x_2^T - \lambda_A k_{2A}(t) \\ \dot{k}_{3A}(t) = -\gamma_A f(x_3) B_M^T P e \cdot x_3^T - \lambda_A k_{3A}(t) \\ \dot{k}_{4A}(t) = -\gamma_A f(x_4) B_M^T P e \cdot x_4^T - \lambda_A k_{4A}(t) \\ \dot{k}_{5A}(t) = -\gamma_A f(x_5) B_M^T P e \cdot x_5^T - \lambda_A k_{5A}(t) \\ \dot{K}_B(t) = -\gamma_B B_M^T P e (u_0 + u_1)^T - \lambda_B K_B(t) \end{cases} \quad (47)$$

Trong đó: $\gamma_A, \lambda_B, \gamma_B, \lambda_B$ là hệ số dương khuếch đại hiệu chỉnh tham số.

Khi đó sơ đồ cấu trúc điều khiển thích nghi hiệu chỉnh tham số - modal với bộ quan sát trạng thái hệ bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M có dạng như hình 6.

Trong đó bộ quan sát trạng thái và bộ điều khiển modal được xây dựng như sau:

- Các tham số cần phải đánh giá là góc quay của cơ cấu điện từ, độ dịch chuyển của piston trong xilanh điều khiển y, độ chênh lệch áp suất vào - ra của động cơ thủy lực ΔP_B . Để đánh giá các tham số trên không đơn giản vì chi phí để

lắp cảm biến cao hoặc vị trí của các cảm biến ở những vị trí không thuận lợi nên dẫn đến sai số. Do vậy chúng ta xây dựng bộ quan sát đủ bậc để có thể đánh giá được các trạng thái trên.

Mục tiêu thiết kế bộ quan sát là tìm ma trận quan sát L sao cho tất cả các nghiệm của phương trình đặc trưng nằm bên trái mặt phẳng phức. Phương trình đặc trưng của bộ quan sát có dạng:

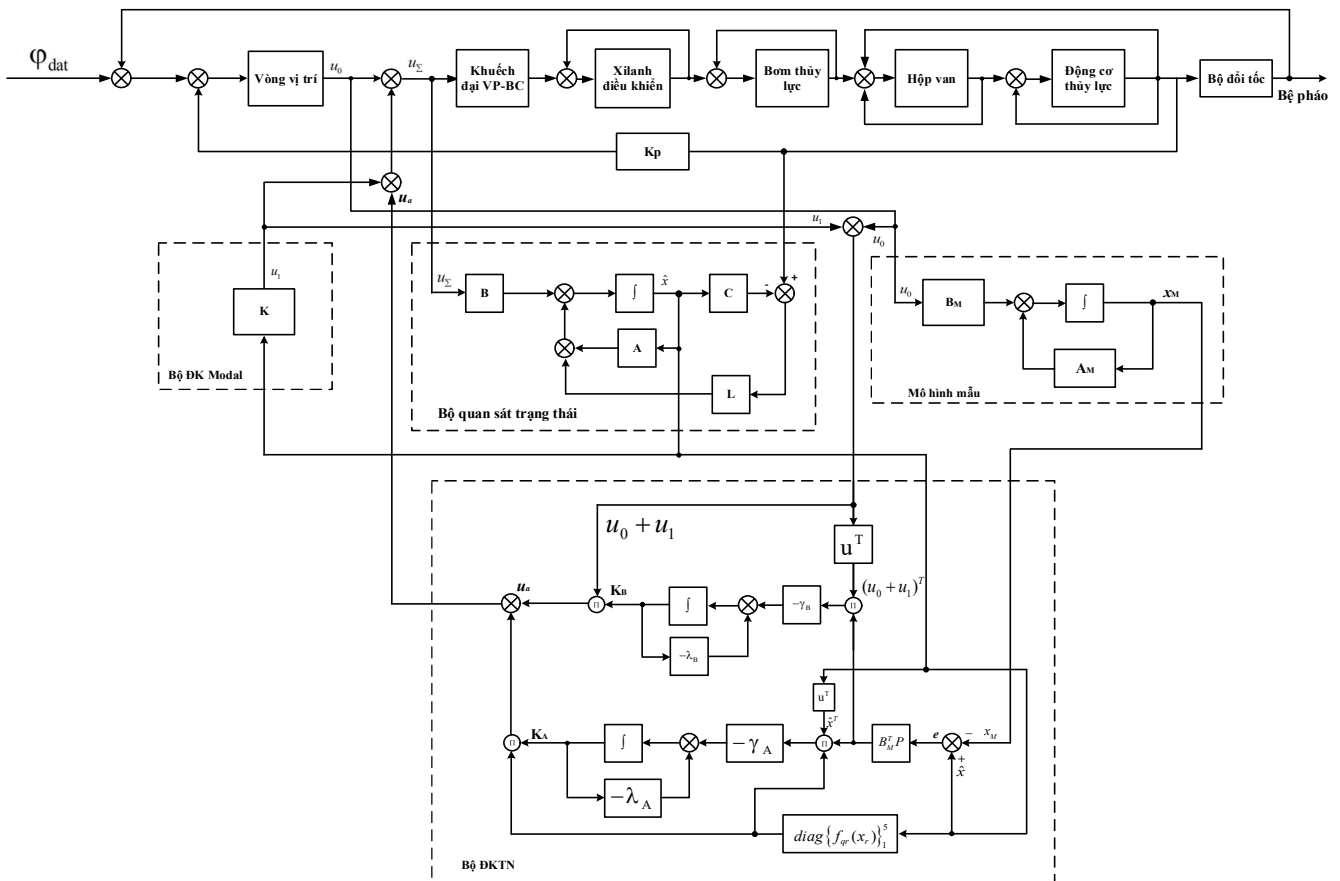
$$\Delta_H = \det(sI - A + LC) \quad (48)$$

bên trái mặt phẳng phức của đa thức đặc trưng ButterWorth bậc 5.

Cân bằng đa thức H_0, Δ_H với đa thức ButterWorth bậc 5 ở các bậc s tương ứng ta thu được các hệ số của bộ điều khiển K và bộ quan sát L.

Mô hình toán của bộ quan sát đủ bậc được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + LC[x(t) - \hat{x}(t)] \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (50)$$



Hình 6. Sơ đồ cấu trúc điều khiển thích nghi hiệu chỉnh tham số hệ bám điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M

- Bộ điều khiển modal để xác định giá trị các hệ số tín hiệu phản hồi cho tất cả các biến trạng thái của đối tượng để đảm bảo sự phân bố mong muốn của các điểm cực trên mặt phẳng phức cần để đa thức đặc trưng hệ truyền động kín theo vector trạng thái của vòng tốc độ đa thức mẫu mong muốn. Phương trình đặc trưng của bộ điều khiển có dạng:

$$\det(sI - A + BK) = H_0 \quad (49)$$

Đa thức mẫu được chọn trong trường hợp này là đa thức ButterWorth bậc 5. Vì vậy ta có biểu thức sau:

$$\Delta_H = H_0 = s^5 + \alpha_1 \omega_0 s^4 + \alpha_2 \omega_0^2 s^3 + \alpha_3 \omega_0^3 s^2 + \alpha_4 \omega_0^4 s + \omega_0^5$$

Trong đó: $\omega_0 = (0,5 \dots 1,0) \omega_{0p}; \omega_{0p} = T_{up}^{-1}; \alpha_1 = 3,24; \alpha_2 = 15,24; \alpha_3 = 5,24; \alpha_4 = 3,24$ là dải thông mong muốn của hệ kín theo điều khiển modal; s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 là các điểm cực phân bố

$$L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5]^T \quad (51)$$

Trong đó: \hat{x} - Vector biến đánh giá; L - Ma trận hệ số bộ quan sát; \hat{x}, \hat{y} là ước lượng biến trạng thái x và đầu ra y; $(y - \hat{y})$ là sai số quan sát thể hiện sự khác nhau giữa ngõ ra đo được thực tế y(t) và ngõ ra $\hat{y} = C\hat{x}$; thành phần thêm vào $LC[x(t) - \hat{x}(t)]$ cung cấp một sự điều chỉnh chủ động ngay khi sai số của sự quan sát là khác 0.

Phương trình điều khiển Modal:

$$u_1 = Kx = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4 + k_5 x_5 \quad (52)$$

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5] \quad (53)$$

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Tham số mô phỏng

Các thông số của hệ thống như bảng 1.

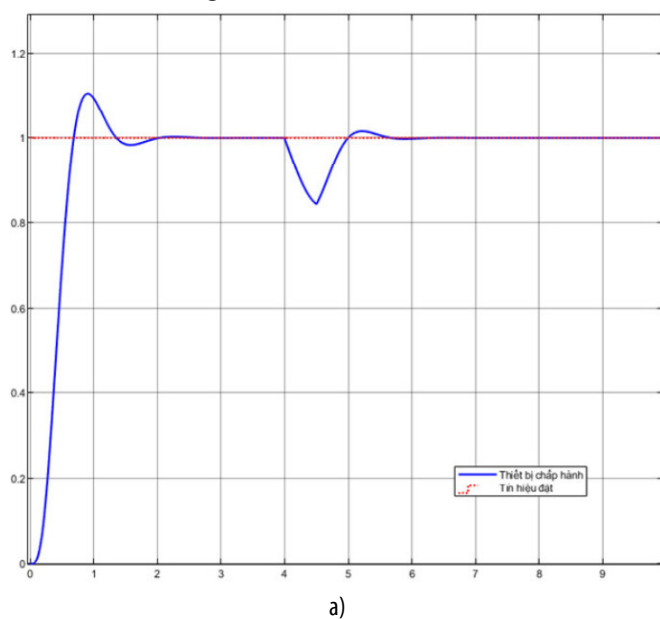
Bảng 1. Các thông số của hệ thống

Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Mômen tải quán tính của động cơ thủy lực	J_t	Nms^2	0,0096
Hệ số rò rỉ động cơ thủy lực	f_i	$m^3/S.Pa$	0,00727
Hệ số mô men phụ thuộc kết cấu của cơ cấu chấp hành	k_v		0,091
Hệ số đàn hồi của dầu thủy lực	β_e	Pa	$1,2 \cdot 10^9$
Thể tích thùng dầu	V_t	m^3	$3 \cdot 10^{-3}$
Hệ số thể tích của động cơ	k_M		$0,125 \cdot 10^{-9}$
Hệ số rò bơm thủy lực	C_t	$m^3/S.Pa$	$0,125 \cdot 10^{-9}$
Bán kính của đĩa nghiêng bơm thủy lực	d_B	m	0,025
Hệ số truyền của bơm	K_B		$0,656 \cdot 10^{-13}$
Hệ số thời gian của khuếch đại van trượt	T_{TP}		0,045
Hệ số khuếch đại	K_{dk}		0,47
Mô men quán tính của phần quay	J	Nms^2	$3 \cdot 10^{-3}$
Hệ số giảm chấn	f_θ	Nms/rad	0,576
Hệ số góc quay	K_θ		1,23
Mômen cản thủy lực	K_T		3,93
Hệ số dòng điện	K_i		1,67
Hệ số điện trở trong cuộn dây	K_R	$1/\Omega$	5,48

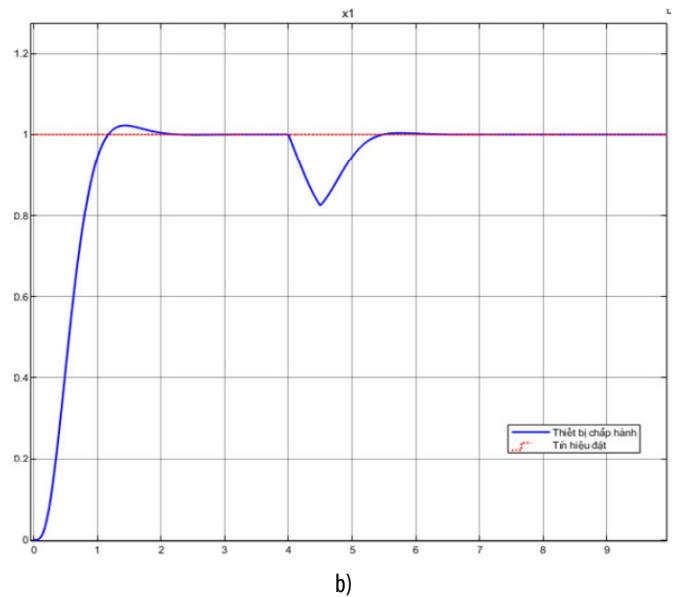
4.2. Kết quả mô phỏng

Mô phỏng hệ thống bơm điện thủy lực kênh hướng của pháo AK-176M với các trường hợp sau: hệ thống nguyên bản, hệ thống tuyến tính hóa, mô hình mẫu, hệ thống. Minh chứng hiệu quả của bộ điều khiển thích nghi, so sánh với hệ thống nguyên bản, ta đặt vào hệ thống những sự thay đổi về thông số hệ thống có thể xảy ra trong quá trình làm việc.

* Khi có tác động của tải $MT = 0,4$ tại $t = 4s$, đáp ứng đầu ra của hệ thống khi so sánh bộ điều khiển PID (a) và bộ bộ điều khiển thích nghi (b) (hình 7).

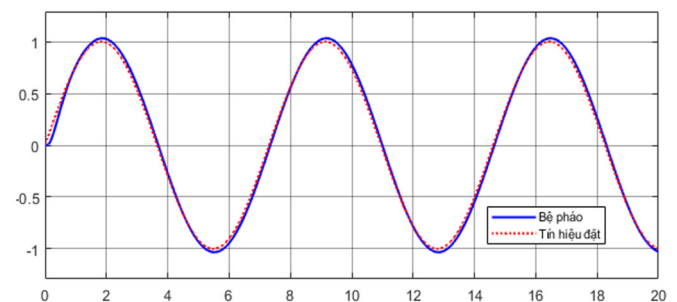


a)



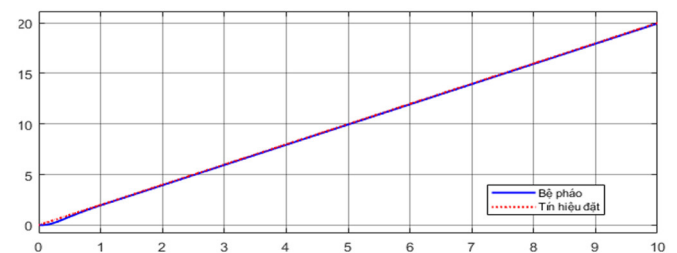
Hình 7. So sánh đáp ứng đầu ra khi có tải $MT = 0,4$ tại $t = 4s$

* Đáp ứng của hệ thống bơm điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M ở chế độ bám sát khi tác động đầu vào là hàm sine có tốc độ quay là $0,9$ (rad/s) như hình 8.



Hình 8. Đáp ứng đầu ra khi đầu vào là hàm sine

* Đáp ứng của hệ thống bơm điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M ở chế độ bám sát khi tác động đầu vào là hàm ramp có độ dốc là 2^0 như hình 9. Ta thấy sau $0,7(s)$ thì đáp ứng đầu ra bám sát tác động đầu vào.



Hình 9. Đáp ứng đầu ra khi đầu vào là hàm ramp

Trong điều kiện chịu ảnh hưởng của các yếu tố như: đàn hồi, ma sát và mô men quán tính trên tải hệ thống vẫn đảm bảo được độ chính xác trong cả chế độ động và chế độ tĩnh, sai số trong chế độ tĩnh luôn về 0 trong các trường hợp khác nhau. Với các thông số nhận được trong quá trình khảo sát ta thấy hệ thống đạt được chỉ tiêu chất lượng đề ra với độ ổn định cao, tần số dao động ít, thời gian chuyển về chế độ xác lập nhanh.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển thích nghi cho hệ thống bám điện thủy lực pháo AK-176M. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng bộ điều khiển thích nghi và xây dựng sơ đồ mô phỏng trên Simulink.

Hệ thống bám điện thủy lực của pháo AK-176M trên tàu là một hệ thống phức tạp, có nhiều yếu tố phi tuyến. Bài báo sử dụng phương pháp điều khiển thích nghi, thông qua những kết quả mô phỏng thể hiện hiệu quả của việc ứng dụng các phương pháp này. Trong kết quả đánh giá chất lượng làm việc hệ truyền động bám hướng pháo AK-176M nhận thấy hệ thống đạt được các thông số tương ứng với yêu cầu đã nêu trong nhiệm vụ kỹ thuật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Naval Technical Institute, *Thuyết minh kỹ thuật pháo AK-176M*. Haiphong, Vietnam, 2011.
- [2]. Hoang Duc Kiem, Dao Hoa Viet, Nguyen Thanh Tien, Phung Manh Hung, *Cơ sở tính toán thiết kế các hệ thống điều khiển vũ khí*. People's Army Publishing House, Hanoi, 2016.
- [3]. Nguyen Trong Hieu, *Thủy lực kỹ thuật máy và hệ thống khí nén trên tàu quan sát*. Military Technical Academy, Hanoi.
- [4]. Tae-Chung Kim, *Analysis of clearance non-linearities and vibro-impacts in torsional systems*. The Ohio State University, 2003.
- [5]. Noah D Manring, Roger C Fales, *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons, 2019.
- [6]. Roger C. Fales, Noah D. Manring, *Hydraulic Control System*. John Wiley & Sons, 2020.
- [7]. Putov V. V., *Adaptive control for dynamic systems: systems with reference models*. SPb: Publisher Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 92, 2001.
- [8]. Burakov, *Theory of automatic control. Guidelines for laboratory work*. SPbGUAP. SPb: Publishing house SPbGUAP, 93, 2006.
- [9]. Putov V. V., *Adaptive and modal control of mechanical objects with elastic deformations*. 64, 2002.
- [10]. NT Kuzovkov, *Modal control and observing devices*. 1976.

AUTHORS INFORMATION

Pham Tuan Thanh¹, Hoang Hai Son², Hoang Manh Cuong³

¹Department of Control Engineering, Military Technical Academy, Vietnam

²Department of Weapons, Military Technical Academy, Vietnam

³Naval Academy, Vietnam