

# PHÂN TÍCH VÀ TỔNG HỢP HỆ TRUYỀN ĐỘNG BÁM ĐIỆN THỦY LỰC PHÁO AK-176M TRÊN TÀU GEPARD

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF ELECTRO-HYDRAULIC TRACKING DRIVE SYSTEM  
FOR AK-176M CANNON ON THE GEPARD SHIP

Đỗ Sỹ Trung<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Huấn<sup>1</sup>,  
Phạm Tuấn Thành<sup>2,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2026.047>

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu và thiết kế hệ truyền động bám điện thủy lực cho pháo AK-176M. Nội dung chi tiết bài báo thể hiện quá trình nghiên cứu và xây dựng bộ điều chỉnh cho các vòng điều khiển hệ thống bám điện thủy lực pháo AK-176M trên cơ sở khiển modal kết hợp với bộ quan sát trạng thái hiệu chỉnh song song và bộ điều khiển PID hiệu chỉnh nối tiếp theo thuật toán di truyền GA đảm bảo theo tính năng chiến kỹ thuật của hệ bám và quá trình thiết kế bộ điều khiển trong thực tế khai thác sử dụng và hiệu chỉnh pháo. Thuật toán tổng hợp được kiểm chứng mô phỏng trên Matlab-Simulink. Các kết quả thiết kế và mô phỏng làm cơ sở để xây dựng các thiết bị kiểm tra, tổng hợp và hiệu chỉnh hệ thống điều khiển pháo AK-176M trên thực tế trong quá trình khai thác và vận hành hệ thống.

**Từ khóa:** Hệ truyền động bám điện - thủy lực, pháo AK-176M, bộ điều khiển modal, bộ quan sát trạng thái, bộ điều khiển PID, thuật toán di truyền GA.

## ABSTRACT

This paper presents the results of research and design of electro-hydraulic tracking drive system for AK-176M cannon. The detailed content of the paper shows the process of research and construction of a controller for the control loops of the electro-hydraulic tracking system of AK-176M cannon based on modal control combined with a parallel correction state observer and a serial correction PID controller according to the GA genetic algorithm to ensure the technical performance of the tracking system and the process of designing the controller in actual exploitation, use and calibration of the cannon. The synthesis algorithm is verified and simulated on Matlab-Simulink. The design and simulation results serve as the basis for building testing equipment, synthesizing and calibrating the AK-176M cannon control system in actual exploitation and operation of the system.

**Keywords:** Electro-hydraulic tracking drive system, AK-176M cannon, Modal controller, state observer, PID controller, genetic algorithm GA.

<sup>1</sup>Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

<sup>2</sup>Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự

\*Email: ptuanthanh1@yahoo.com

Ngày nhận bài: 21/10/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Pháo AK-176M được trang bị cho các tàu chiến Gepard 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.

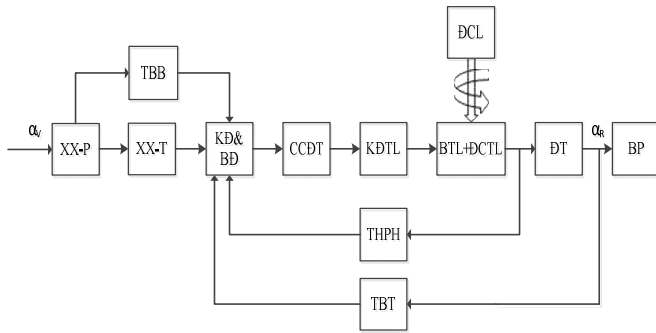
Tổ hợp pháo AK-176M có hai chế độ làm việc chính [2]:

- 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  $\varepsilon$  và góc phương vị  $\varphi$ . Các thông số này được đưa vào đầu vào của máy tính. 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  $\Delta q$ . 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  $\Delta r$  và hướng  $\Delta q$  do pháo thủ trực tiếp điều khiển ở bàn điều khiển tại bệ pháo. Các thông số về sai lệch tầm và hướng được đưa tới đầu vào thiết bị đo lường bao gồm các xen xin phát (XX-P) và xen xin thu (XX-T) của hệ truyền động bám như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối cấu trúc của hệ truyền động bám pháo AK-176M

Các thông số này được đưa tới khuếch đại và biến đổi điện tử (KĐ&BD), tại đây nó được kết hợp với các tín hiệu phản hồi (THPH), thiết bị thu (TBT) và thiết bị bù (TBB) 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 của cơ cấu điện từ (CCĐT) thuộc bộ phận điều khiển khuếch đại thủy lực (KĐTL), 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 xanh lục, cán của piston nằm trong xanh lục dịch chuyển (được gắn chặt với đĩa nghiêng) nên nó làm lệch giá lắc của bơm thủy lực (BTL). Bơm thủy lực được nối với động cơ điện lai bên ngoài (ĐCL), khi động cơ điện quay làm bơm thủy lực quay và cấp dầu cao áp đến mô tơ thủy lực (ĐCTL), làm mô tơ thủy lực quay, thông qua hộp đổi tốc (ĐT) làm bệ pháo (BP) 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.

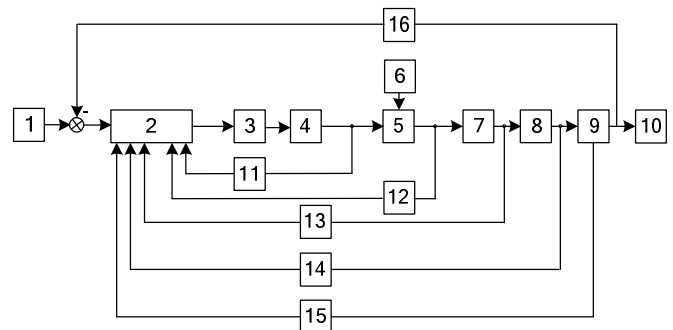
Sau thời gian làm việc, hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-176M sẽ xuất hiện các sai lệch tham số ảnh hưởng đến các chỉ tiêu chất lượng theo tính năng chiến kỹ thuật của hệ thống điều khiển pháo trong quá trình hoạt động. Để hiệu chỉnh hệ thống điều khiển pháo phải thông qua phần mềm hiệu chỉnh được kết nối với khối điều khiển BU của pháo với rất nhiều các bước và các

tham số khác nhau của hệ thống. Phần mềm hiệu chỉnh của Nga cung cấp được đóng gói, cũng như tài liệu về cấu trúc, sơ đồ nguyên lý hệ thống thực tế điều khiển pháo AK176M được nhà sản xuất bàn giao chủ yếu dạng khai thác theo sơ đồ khối chức năng. Chính vì vậy, để có thể xây dựng được các thiết bị kiểm tra, tổng hợp và hiệu chỉnh hệ thống điều khiển pháo AK-176M trên thực tế và tiến tới làm chủ công nghệ chế tạo, đòi hỏi phải và tổng hợp được cấu trúc và bộ điều khiển thực tế dựa trên cơ sở phân tích phần mềm hiệu chỉnh và trong quá trình khai thác vận hành hệ thống pháo AK-176M.

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 nghiên cứu gọi chung là hệ truyền động bám điện thủy lực pháo AK-176M.

## 2. PHÂN TÍCH MÔ HÌNH HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN THỦY LỰC PHÁO AK-176M

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 khối cấu trúc ở hình 1 và yêu cầu của bài toán ta mô hình hóa được sơ đồ cấu trúc cụ thể của hệ truyền động điện thủy lực pháo AK-176M như sau [2]:

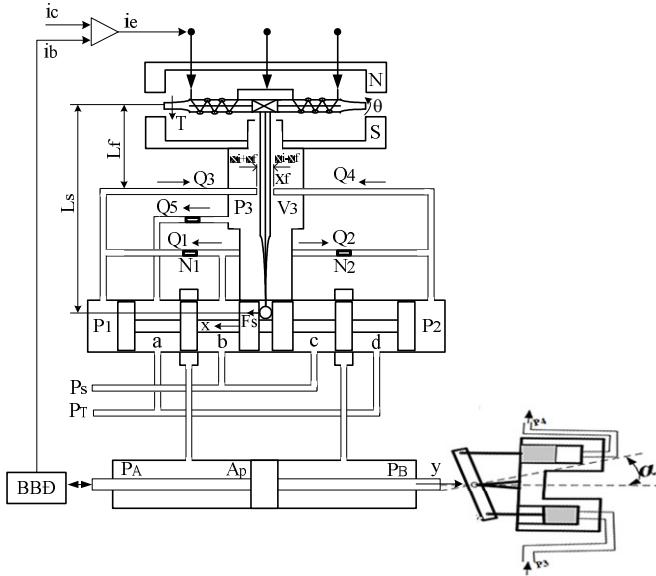


Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của hệ truyền động bám pháo AK-176M

Trong đó: 1. Tín hiệu đặt góc điều khiển; 2. Khối điều khiển (BU); 3. Khối khuếch đại vòi phun - bản chắn (VP-BC); 4. Khối xi lanh điều khiển; 5. Tổ hợp bơm thủy lực; 6. Động cơ lai; 7. Hộp van phân phối; 8. Mô tơ thủy lực; 9. Hộp đổi tốc; 10. Phần tử chấp hành (Bệ pháo); 11. Cảm biến dịch chuyển tuyến tính; 12. Cảm biến vị trí giá lắc bơm (góc lắc); 13. Cảm biến áp suất; 14. Cảm biến tốc độ mô tơ thủy lực; 15. Tín hiệu phản hồi tốc độ bệ pháo; 16. Cảm biến góc quay bệ pháo.

Sơ đồ cấu trúc trên hình 3 thể hiện rõ quá trình điều khiển hệ thống thủy lực của bệ pháo, sử dụng các tín hiệu phản hồi lấy từ các cảm biến. Có 6 tín hiệu phản hồi từ cảm biến, trong đó sử dụng 5 tín hiệu trong quá trình điều

khuyến (vòng phản hồi theo dịch chuyển của xi lanh thủy lực (11) được sử dụng cho bản thân hệ thống van servo thủy lực): Vòng 1: Tín hiệu phản hồi vị trí của giá lắc bơm (12); Vòng 2: Tín hiệu phản hồi tín hiệu độ chênh áp suất vào ra động cơ thủy lực (13); Vòng 3: Tín hiệu phản hồi tốc độ quay mô tơ thủy lực (14); Vòng 4: Tín hiệu phản hồi tốc độ góc quay bộ phận (15) thực hiện chức năng ổn định cùng với thiết bị bù từ máy phát tốc phát nối với trục của xen xin phát; Vòng 5: Tín hiệu phản hồi góc quay bộ phận (16).



Hình 3. Mô hình hệ chấp hành 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 từ  $\theta$ , độ dịch chuyển của piston xilanh điều khiển  $y$  và sự chênh lệch áp suất vào - ra mô tơ thủy lực như hình 3 [1].

\* Phương trình cân bằng momen trên phần ứng [3, 6]:

$$\ddot{\theta} = J^{-1}uK_RK_i - J^{-1}f_\theta\dot{\theta} - J^{-1}(K_T - K_\theta)\theta \quad (1)$$

Trong đó:  $\theta$  - Góc quay của cơ cấu điện từ;  $J$  - Mô men quán tính của phần quay;  $u$  - điện áp điều khiển cấp vào cuộn dây;  $K_i$  - Hệ số dòng điện;  $K_\theta$  - Hệ số góc quay phần ứng;  $f_\theta$  - Hệ số giảm chấn;  $K_R = \frac{1}{R}$  ( $R$  - 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 [4, 6]:

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

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 [3, 7]:

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

Trong đó:  $V_t$  - Thể tích thùng dầu;  $\beta_e$  - Hệ số đàn hồi của dầu thủy lực;  $\Delta P_B$  - Độ chênh lệch áp suất đầu vào - ra của bơm thủy lực;  $Q$  - Tổn 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 [4, 6]:

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

Trong đó:  $z_{pt}$  - số piston;  $D$  - đường kính của rôto trên có đặt các xilanh;  $\omega$  - tốc độ quay của động cơ lại;  $h$  - hành trình tối đa của piston trong xilanh.

Do góc lắc của bơm thủy lực  $\alpha_B$  có giá trị nhỏ, nên ta có thể xấp xỉ như sau:

$$\tan(\alpha_B) \approx \alpha_B; y \approx d_B \Rightarrow \alpha_B = \frac{y}{d_B} \quad (6)$$

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

Từ (4) - (6) ta có:

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

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

\* Thành phần mô men chính phát sinh do hoạt động của mô tơ thủy lực [3, 6]:

$$\tau_m = k_v \Delta P = J_t \ddot{\varphi} + f_t \dot{\varphi} \quad (8)$$

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;  $f_t$  - hệ số rò rỉ động cơ thủy lực;  $\varphi$  - góc quay của mô tơ thủy lực.

Từ (8) ta có phương trình vi phân:

$$\ddot{\varphi} = J_t^{-1} k_v \cdot \Delta P_B - J_t^{-1} f_t \dot{\varphi} \quad (9)$$

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

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

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:

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

Trong các phương trình (10) và (11),  $u$  là điện áp điều khiển cấp vào cuộn dây phần ứng của cơ cấu điện từ.

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

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

Để thuận tiện cho việc tính toán ta đặt:

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

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:

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

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

$$C = [c \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

### 3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN

Hệ thống truyền động tám điện thủy lực điều khiển pháo AK-176M trên thực tế có sơ đồ cấu trúc như hình 4.

Theo sơ đồ bao gồm bộ điều khiển phản hồi trạng thái modal cho hệ thống điều khiển thủy lực điều khiển tốc độ của mô tơ thủy lực. Trong vòng điều khiển này thực hiện với hiệu chỉnh song song với các phản hồi trạng thái bao gồm: tốc độ và góc quay của cơ cấu điện từ nam châm điện, hai trạng thái phản hồi này được thực hiện khi tổng hợp bằng bộ quan sát; dịch chuyển hay vị trí của xi lanh thủy lực và vị trí góc của giá lắc, hai tín hiệu này cơ bản là giống nhau chỉ khác về hệ số, trong đó dịch chuyển vị trí xi lanh được sử dụng cho van servo thủy lực, còn góc lắc được đưa vào vòng điều khiển; chênh lệch áp suất của mô tơ thủy lực và tốc độ mô tơ thủy lực. Phản hồi theo tốc độ pháo được sử dụng để ổn định pháo cùng với phản hồi dương tốc độ để tác động bù. Các đường phản hồi bằng nét đứt, được sử dụng cho van servo thủy lực (hình 4).

Vòng điều khiển ngoài cùng là vòng điều khiển vị trí theo sai lệch góc giữa xen xin phát và xen xin thu. Bộ điều khiển này được thực hiện theo nguyên tắc nối tiếp trên cơ sở bộ điều khiển PID.

#### 3.1. Tổng hợp bộ điều khiển modal

Hệ truyền động tám điện thủy lực pháo AK-176M được xây dựng theo phương trình trạng thái như sau:

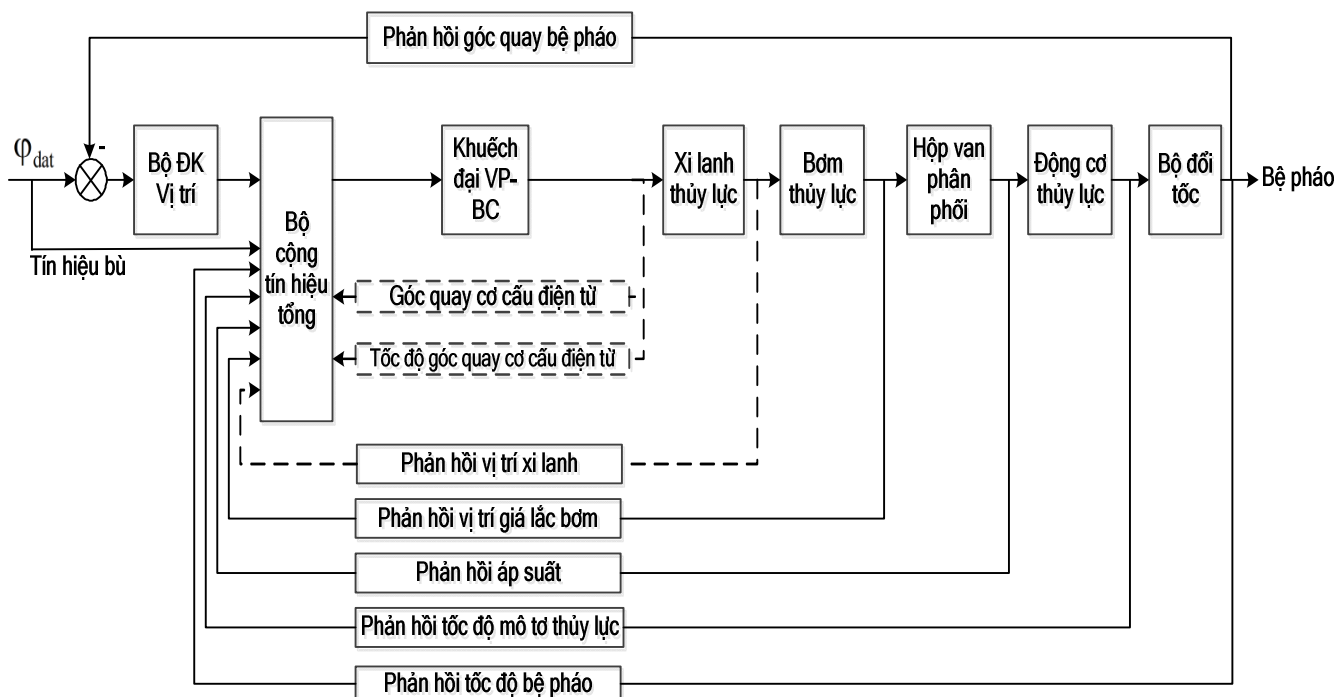
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó:

$x(t)$ : Vector các biến;  $A$ : Ma trận trạng thái đối tượng;

$B$ : Ma trận đầu vào điều khiển;  $C$ : Ma trận đo.

Ta có vector của biến trạng thái  $x$  và ma trận hệ số  $A, B, C$  các điểm cực nằm bên trái trục ảo trong mặt phẳng phức. Đặc tính của quá trình quá độ trong hệ phụ thuộc vào sự phân bố các điểm cực [12, 14].



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc điều khiển hệ bảm điện thủy lực pháo AK-176M thực tế

Sự phân bố mong muốn của các điểm cực có thể đạt được bằng cách đưa vào tín hiệu phản hồi theo trạng thái dạng [12]:

$$u(t) = u_0(t) + u_1(t) = u_0(t) + Kx(t) \tag{17}$$

Với  $u_0(t)$  là tác động đầu vào,  $K$  là ma trận có dạng  $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]$  các thành phần của nó là các hệ số của tín hiệu phản hồi theo các vector trạng thái  $\hat{x}$ .

Thay phương trình (17) vào phương trình (16) ta nhận được phương trình sau:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[u_0(t) + Kx(t)] = (A + BK)x(t) + Bu_0(t) \tag{18}$$

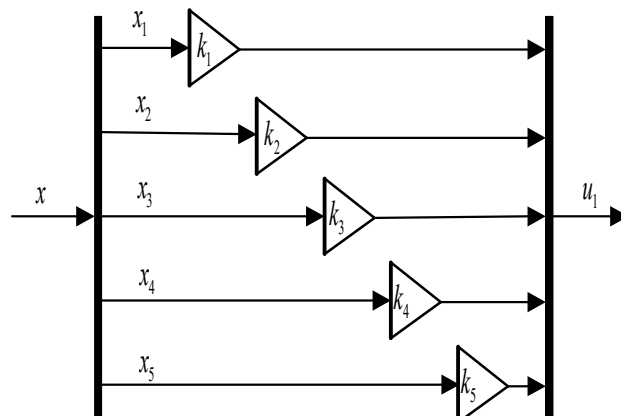
Trong hệ truyền động hở các tính chất động học của hệ được đặc trưng bởi ma trận  $A$ , thì các tính chất động học của hệ truyền động kín cũng sẽ được đặc trưng bởi ma trận tương ứng:  $\tilde{A} = (A + BK)$ .

Như vậy, để quá trình quá độ trong hệ được như mong muốn cần chọn ma trận hệ số của tín hiệu phản hồi  $K$  để  $\det(sI - \tilde{A}) = H_0$ , với  $H_0$  là đa thức đặc trưng mong muốn.

Để đạt được 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.

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển Modal như hình 6, phương trình điều khiển Modal viết ở dạng vô hướng như sau [8, 11]:

$$u_1 = Kx = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4 + k_5x_5 \tag{19}$$



Hình 5. Sơ đồ khối của bộ điều khiển Modal trong hệ thống

Đa thức đặc trưng:

$$H_0 = \det(sI - \tilde{A}) \tag{20}$$

$$\Rightarrow H_0 = \det \begin{bmatrix} s-a_1 & -a_2 & 0 & 0 & 0 \\ -a_3 & s-a_4 & -a_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s-a_6 & -a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & -1 \\ bk_1 & bk_2 & bk_3 & bk_4 - a_8 & s - a_9 + bk_5 \end{bmatrix} \tag{21}$$

Đa thức mẫu được chọn trong trường hợp này là đa thức ButterWorth bậc 5. Vì vậy ta có biểu thức sau [5, 8]:

$$H_0 = s^5 + \alpha_1\omega_0s^4 + \alpha_2\omega_0^2s^3 + \alpha_3\omega_0^3s^2 + \alpha_4\omega_0^4s + \omega_0^5 \tag{22}$$

Trong đó:  $\alpha_1=3,24; \alpha_2=15,24; \alpha_3=5,24; \alpha_4=3,24$ ;  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  là các điểm cực phân bố bên trái mặt phẳng phức của đa thức đặc trưng ButterWorth bậc 5;  $\omega_0=(0,5\dots 1,0)\omega_{op}; \omega_{op} = T_{\mu p}^{-1}$ .

Cân bằng đa thức  $H_0$  với  $\det(sl - \tilde{A}) = H_0$  ở các bậc s tương ứng ta thu được hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \omega_0 &= -a_4 - a_6 - a_9 - a_1 + bk_5 \\ \alpha_2 \omega_0^2 &= -a_8 - a_2 a_3 + a_4 a_6 \\ &\quad + a_1 a_9 + (a_4 + a_6)(a_1 + a_9) + bk_4 \\ &\quad - k_5 b(a_1 + a_4 + a_6) \\ \alpha_3 \omega_0^3 &= (a_8 - k_4 b)(a_1 + a_4 + a_6) - a_6(a_1 a_4 - a_2 a_3) \\ &\quad + (k_5 b - a_9)(a_1 a_4 - a_2 a_3 + a_1 a_6 + a_4 a_6) + a_7 bk_3 \\ \alpha_4 \omega_0^4 &= (k_4 b - a_8)(a_1 a_4 - a_2 a_3 + a_1 a_6 + a_4 a_6) \\ &\quad + (a_9 a_6 - k_5 a_6 b)(a_1 a_4 - a_2 a_3) \\ &\quad + a_5 a_7 bk_2 - k_3 a_7 b(a_1 + a_4) \\ \omega_0^5 &= a_6 a_8(a_1 a_4 - a_2 a_3) + a_2 a_5 a_7 bk_1 - a_1 a_5 a_7 bk_2 \\ &\quad + k_3 a_7 b(a_1 a_4 - a_2 a_3)(k_3 a_7 b - k_4 a_6 b) \end{aligned}$$

Giải hệ phương trình ta được các hệ số của ma trận điều khiển K.

*\* Xây dựng bộ quan sát trạng thái đủ bậc:*

Để điều khiển theo modal yêu cầu phải xác định được tất cả các trạng thái phản hồi, theo như hệ phương trình (19), các tham số cần phải đánh giá là góc quay của cơ cấu điện từ  $\theta$  và tốc độ góc của nó, còn lại độ dịch chuyển của piston trong xilanh điều khiển  $y$ , góc của giá lắc  $\alpha_b$ , độ chênh lệch áp suất vào - ra của mô tơ thủy lực  $\Delta P_B$  và tốc độ quay của mô tơ thủy lực  $\varphi$  là đo được. Để giải quyết vấn đề này, chúng ta xây dựng bộ quan sát trạng thái đủ bậc để có thể đánh giá được tất cả các trạng thái trên, kể cả trạng thái đo được bằng cảm biến.

Mô hình toán của bộ quan sát trạng thái được biểu diễn như sau [10, 13]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + LC[x(t) - \hat{x}(t)] \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (23)$$

Trong đó:

Với  $L = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5]^T$ ;

$\hat{x}(t)$ : Vector biến đánh giá; A: Ma trận trạng thái đối tượng; B: Ma trận đầu vào điều khiển; C: Ma trận đo; L: Ma trận hệ số bộ quan sát;  $\hat{y}$  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, sơ đồ cấu trúc bộ quan sát trạng thái như hình 7.

Đối với hệ tám truyền động điện thủy lực kênh hướng pháo AK-176M, vector trạng thái của hệ gồm năm biến, ở đây ta chỉ cần đo 1 biến là tốc độ quay của mô tơ thủy lực  $x_1$ , các biến còn lại có thể đánh giá chúng qua bộ quan sát trạng thái.

Vector biến đánh giá  $\hat{X}(t)$  và các ma trận A, B, C theo dạng (23). Ta có mối liên hệ ở dạng vô hướng như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + l_1 c \hat{e}_x \\ \dot{\hat{x}}_2 = a_3 x_1 + a_4 x_2 + a_5 x_3 + l_2 c \hat{e}_x \\ \dot{\hat{x}}_3 = a_6 x_3 + a_7 x_4 + l_3 c \hat{e}_x \\ \dot{\hat{x}}_4 = x_5 + l_4 c \hat{e}_x \\ \dot{\hat{x}}_5 = a_8 x_4 + a_9 x_5 + l_5 c \hat{e}_x + a_b u \end{cases} \quad (24)$$

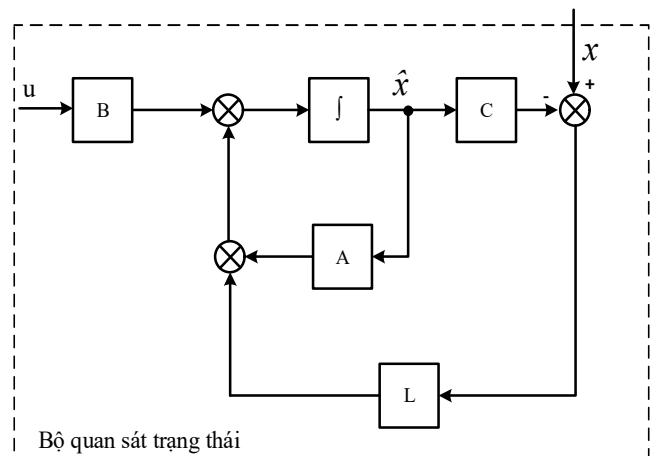
Trong đó:  $\hat{e}_x = x_1 - \hat{x}_1$

Bộ quan sát được thiết kế sao cho  $\hat{e}_x(t) \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$ . Nếu hệ quan sát được thì ta luôn tìm được ma trận L sao cho sai số ước lượng  $\hat{e}_x(t)$  ổn định tiệm cận. Sai số ước lượng  $\hat{e}_x(t)$  đóng vai trò là đáp ứng của bộ quan sát.

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 trạng thái có dạng [10]:

$$\Delta_H = \det(sl - A + LC)$$



Hình 6. Sơ đồ khối bộ quan sát trạng thái trong hệ thống

Thay các ma trận A, C, L vào ta được:

$$\Delta_H = \det \begin{pmatrix} s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_4 & a_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \end{pmatrix} \cdot [c \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (25)$$

$$\Rightarrow \Delta_H = \det \begin{pmatrix} s-a_1+l_1c & -a_2 & 0 & 0 & 0 \\ l_2c-a_3 & s-a_4 & -a_5 & 0 & 0 \\ l_3c & 0 & s-a_6 & -a_7 & 0 \\ l_4c & 0 & 0 & s & -1 \\ l_5c & 0 & 0 & -a_8 & s-a_9 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Ma trận hệ số L của bộ quan sát được chọn từ quá trình quá độ, do vậy cần phải lựa chọn các hệ số của ma trận L để phương trình đặc trưng của bộ quan sát bằng với đa thức mẫu. Đa thức mẫu được lựa chọn trong trường hợp này là đa thức ButterWorth bậc 5. Vì thế ta có biểu thức sau [5, 8]:

$$\Delta_H = s^5 + \alpha_1 \omega_H s^4 + \alpha_2 \omega_H^2 s^3 + \alpha_3 \omega_H^3 s^2 + \alpha_4 \omega_H^4 s + \omega_H^5 \quad (27)$$

Trong đó:  $\omega_H = q \cdot \omega_0$  là dải thông của bộ quan sát;  $q = 1 \dots 3$  là hệ số nhân;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  là các hệ số của đa thức ButterWorth bậc 5, với:

$$\alpha_1 = 3,24; \alpha_2 = 15,24; \alpha_3 = 5,24; \alpha_4 = 3,24 \quad (28)$$

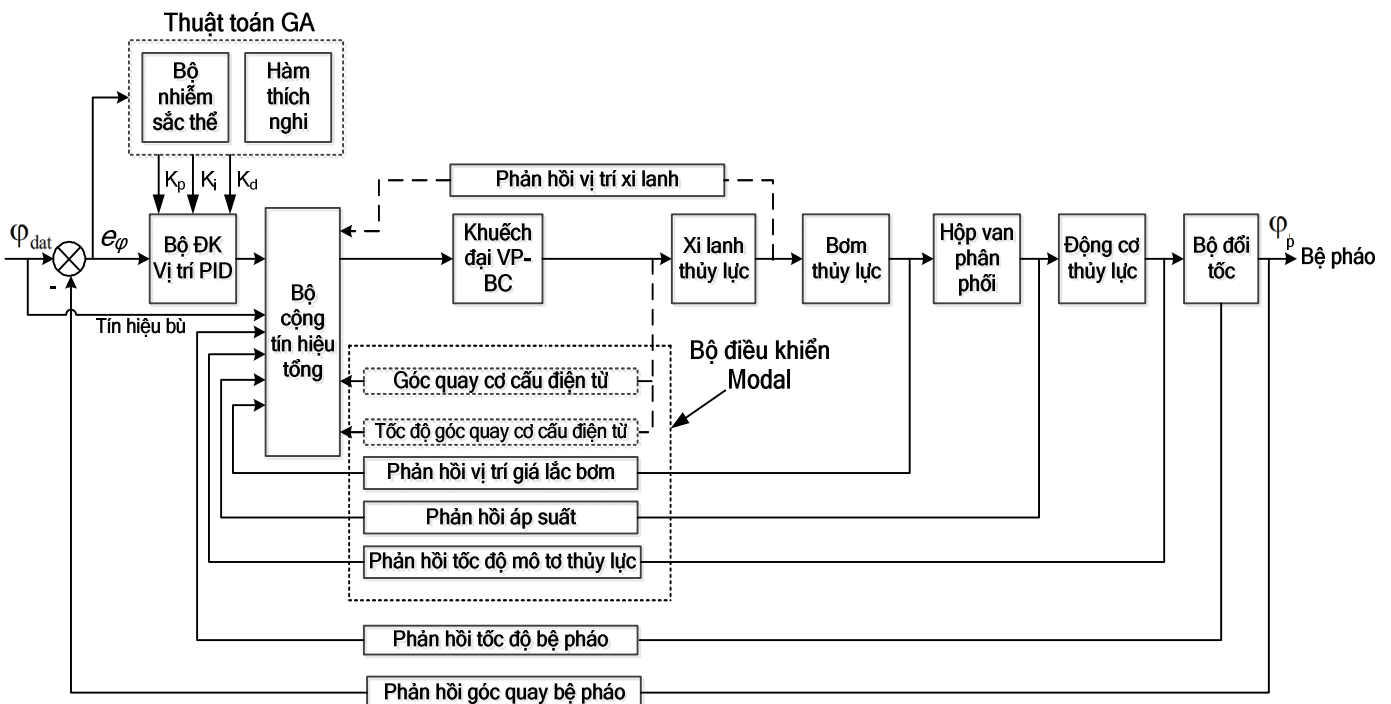
Cân bằng hệ số các bậc của s ta được hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \omega_H &= (l_1 c - a_4 - a_6 - a_9 - a_1) \\ \alpha_2 \omega_H^2 &= [-l_1 (a_4 c + a_6 c + a_9 c) + l_2 a_2 c - a_8 + a_1 a_4 - a_2 a_3 + a_1 a_6 + a_1 a_9 + a_4 a_6 + a_4 a_9 + a_6 a_9] \\ \alpha_3 \omega_H^3 &= [l_1 (a_4 a_6 c - a_8 c + a_4 a_9 c + a_6 a_9 c) - l_2 (a_2 a_6 c + a_2 a_9 c) + l_3 a_2 a_5 c + a_1 a_8 + a_4 a_8 + a_6 a_8 - a_1 a_4 a_6 + a_2 a_3 a_6 - a_1 a_4 a_9 + a_2 a_3 a_9 - a_1 a_6 a_9 - a_4 a_6 a_9] \\ \alpha_4 \omega_H^4 &= [l_1 (a_4 a_8 c + a_6 a_8 c - a_4 a_6 a_9 c) - l_2 (a_2 a_8 c - a_2 a_6 a_9 c) - l_3 a_2 a_5 a_9 c + l_4 a_2 a_5 a_7 c + a_1 a_4 a_6 a_9 - a_2 a_3 a_6 a_9 - a_1 a_4 a_8 + a_2 a_3 a_8 - a_1 a_6 a_8 - a_4 a_6 a_8] \\ \omega_H^5 &= [-l_1 a_4 a_6 a_8 c + l_2 a_2 a_6 a_8 c - l_3 a_2 a_5 a_8 c - l_4 a_2 a_5 a_7 a_9 c + l_5 a_2 a_5 a_7 c + a_1 a_4 a_6 a_8 - a_2 a_3 a_6 a_8] \end{aligned} \quad (29)$$

Giải hệ phương trình trên ta tìm được các hệ số của ma trận quan sát L.

### 3.2. Tổng hợp bộ điều khiển vị trí

Để tổng hợp bộ điều khiển vị trí với bộ điều khiển PID có nhiều phương pháp thiết kế với các ưu nhược điểm

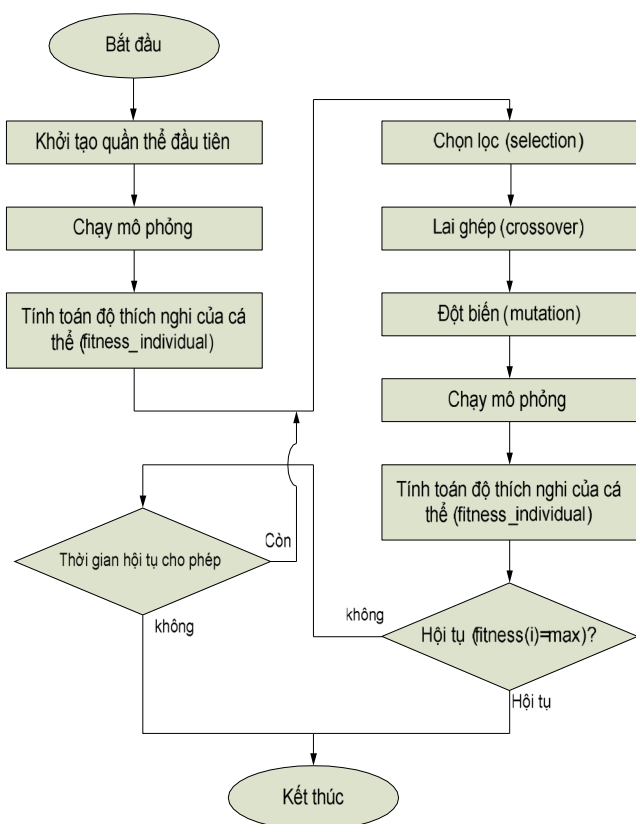


Hình 7. Cấu trúc bộ điều khiển vị trí GA\_PID

khác nhau. Đối với hệ truyền động bóm pháo AK-176M, đây là hệ bóm thống điện thủy lực với nhiều tham số và vòng điều chỉnh phức tạp, một trong những phương pháp thiết kế hiệu quả được sử dụng để xác định tham số bộ điều chỉnh vị trí PID đó là ứng dụng giải thuật di truyền GA [15, 16].

Bộ điều khiển vị trí PID trong hệ truyền động bóm điện thủy lực pháo AK-176M với 3 tham số  $K_p$ ,  $K_i$  và  $K_d$  được mã hóa thành chuỗi số thực đại diện cho một cá thể hay nhiễm sắc thể. Chọn hàm thích nghi là hàm sai số tích phân tuyệt đối ITAE theo công thức (30).

$$fitness = \int_0^{+\infty} t |e(t)| dt \tag{30}$$



Hình 8. Lưu đồ thuật toán xác định tham số bộ PID vị trí bằng GA

Cấu trúc bộ điều khiển vị trí PID theo GA cùng với bộ điều khiển modal ở vòng trong được thực hiện như hình 7.

Các cá thể có độ thích nghi được đánh giá thông qua cực tiểu của hàm thích nghi (30). Các thể nào làm cho cực tiểu của hàm là nhỏ nhất thì độ thích nghi của các thể đó là lớn nhất.

Tín hiệu sai lệch  $e_\varphi$  giữa góc đặt  $\varphi_{dat}$  và góc ra của bệ pháo  $\varphi_p$  được đưa vào bộ điều khiển PID, đầu ra của bộ điều khiển được đưa tới bộ cộng tín hiệu, cùng với bộ điều khiển modal và các tín hiệu bù, tín hiệu phản hồi để điều khiển tốc độ mô tơ thủy lực quay bệ pháo. Chương

trình xác định tham số bộ PID vị trí dựa vào lưu đồ giải thuật như hình 8 [16].

## 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

### 4.1. Tham số mô phỏng

Các thông số của hệ thống như thể hiện trong bảng 1 [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 <sup>2</sup>	0,0096
Hệ số rò rỉ động cơ thủy lực	$f_l$	m <sup>3</sup> /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	$\beta_e$	Pa	1,2.10 <sup>9</sup>
Thể tích thùng dầu	$V_t$	m <sup>3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>
Hệ số thể tích của động cơ	$k_M$		0,125.10 <sup>-9</sup>
Hệ số rò rỉ bơm thủy lực	$C_t$	m <sup>3</sup> /S.Pa	0,125.10 <sup>-9</sup>
Bán kính của đĩa nghiêng bơm thủy lực	$d_B$	m	0,025
Hệ số truyền của bơm	$K_B$		0,656.10 <sup>-13</sup>
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 <sup>2</sup>	3.10 <sup>-3</sup>
Hệ số giảm chấn	$f_\theta$	Nms/rad	0,576
Hệ số góc quay	$K_\theta$		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/Ω	5,48

### 4.2. Kết quả mô phỏng

Đối với hệ truyền động bóm pháo tàu AK-176M sử dụng xen xin 2 kênh để đo lường sai lệch góc giữa tín hiệu đặt và góc quay bệ pháo, trong đó kênh sơ sài của xen xin sẽ làm việc với góc sai lệch lớn, còn kênh chính xác làm việc với góc sai lệch nhỏ, tương ứng với 2 chế độ làm việc của hệ bóm. Khi góc sai lệch lớn, tương ứng với chế độ vượt, do đó cần phải quay bệ pháo đi một góc  $\varphi_p$  lớn, để nhanh chóng đưa nòng pháo về trùng với hướng của mục tiêu, sau đó chuyển sang chế độ bám sát với góc sai lệch nhỏ. Việc chuyển đổi giữa các kênh của xen xin được thực hiện bằng mạch phân kênh.

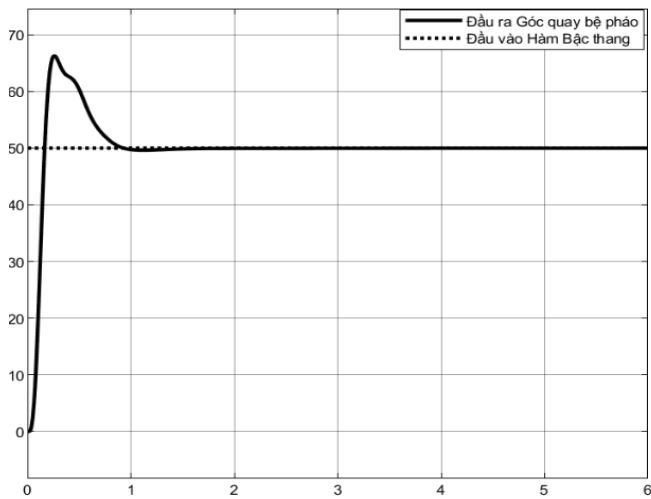
Khảo sát hệ truyền động CP-176M1 pháo AK-176M với các đầu vào khác nhau (hàm  $1(t)$ , hàm  $v.t$ , hàm hình sin) ở trong các chế độ làm việc bao gồm chế độ vượt (khi góc sai

lệch lớn) và chế độ bám (khi góc sai lệch nhỏ) và kể cả khi thay đổi mô men tải  $M_{ct}$ .

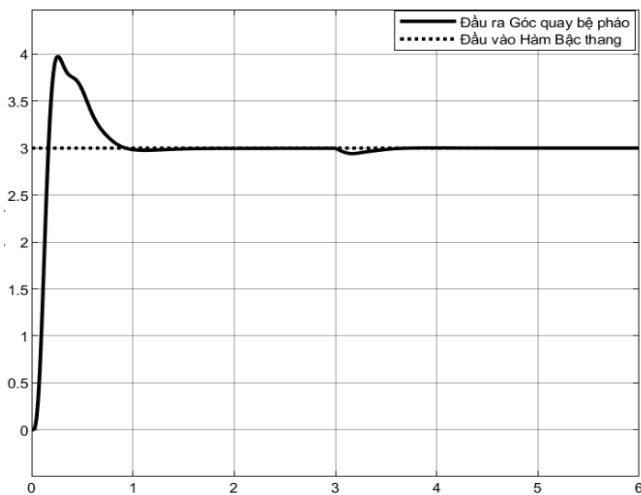
- Tác động đầu vào là hàm 1(t).

Ở chế độ vượt khi mục tiêu bay thẳng vào tàu với một hướng không đổi. Góc sai lệch tầm, hướng của pháo so với mục tiêu có  $\theta$  lớn. Do đó, ta cần phải quay bộ pháo đi một góc  $\varphi_p$  lớn, để nhanh chóng đưa nòng pháo về trùng với hướng của mục tiêu bay vào.

Để mô phỏng ta đưa đầu vào là hàm constant với góc  $50^\circ$ . Đặc tính đầu ra của hệ truyền động khi  $\varphi$  lớn và hướng  $V_{li}$  không đổi có dạng như hình 9. Sau thời gian quá độ 1,67s đặc tính đầu ra của hệ thống bám sát tác động đầu vào và đảm bảo được yêu cầu đề ra. Sai số lớn nhất của hệ thống khi góc sai lệch  $50^\circ$  là 32,2%.



Hình 9. Chế độ vượt với hàm 1(t)



Hình 10. Chế độ vượt với hàm 1(t)

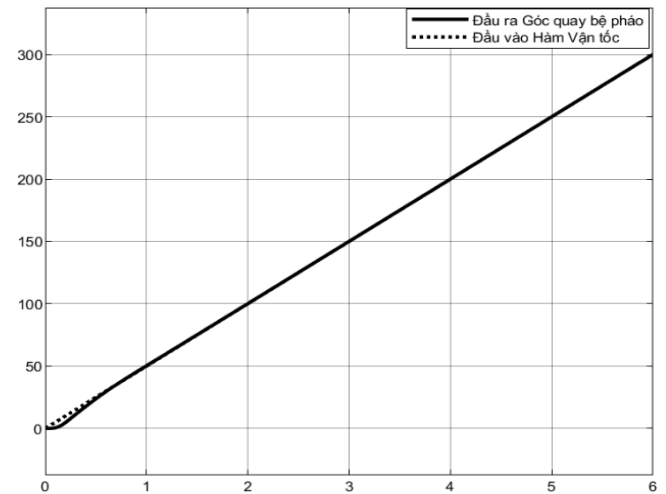
Ở chế độ bám khi góc sai lệch tầm, hướng của pháo so với mục tiêu  $\theta$  nhỏ (từ  $0^\circ \div 4.8^\circ$ ). Khi đó ta chỉ cần phải quay bộ pháo đi một góc  $\varphi$  nhỏ để pháo trùng với mục tiêu cần tiêu diệt.

Mô phỏng cho đầu vào là hàm constant với góc  $3^\circ$ , tại thời điểm 3 giây tác động với tải dạng va đập  $M_{ct} = 200N.m$ . Đặc tính đầu ra của hệ truyền động có dạng như hình 10.

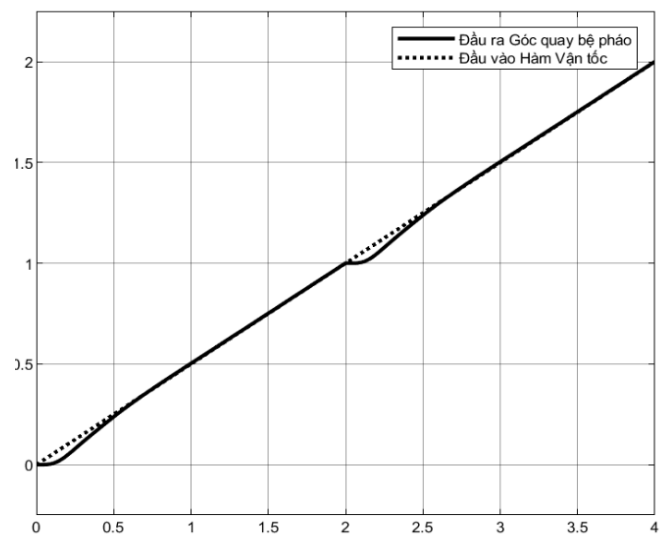
Đáp ứng đầu ra của hệ truyền động với độ quá chỉnh  $\delta = 32,5\%$ ; Thời gian quá độ  $t_{qd} = 1,67s$ ; Số lần dao động  $n = 1$ . Tại thời điểm 3 giây tác động tải va đập, hệ thống nhanh chóng bù lại tác động của tải và trở về ổn định theo sai số xác lập và thời gian quá độ yêu cầu.

- Tác động đầu vào là hàm v.t.

Ở chế độ vượt góc sai lệch giữa pháo và mục tiêu lớn, khi đó ta cần quay pháo với một vận tốc lớn để nhanh chóng đưa pháo vào hướng mục tiêu lao vào để tiêu diệt mục tiêu nguy hiểm. Trong mô phỏng cho đầu vào là một hàm ramp có độ dốc là 50 thì đáp ứng đầu ra của hệ truyền động có dạng như hình 11 và sau 0,53 giây thì đáp ứng đầu ra của hệ truyền động bám sát tác động đầu vào.



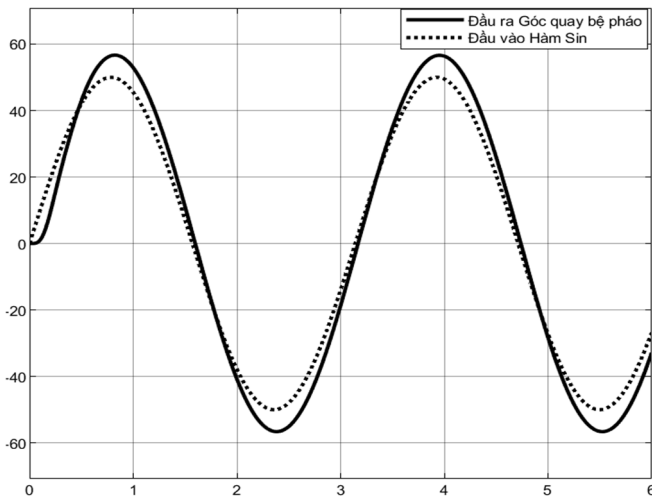
Hình 11. Đầu ra ở chế độ vượt với hàm ramp



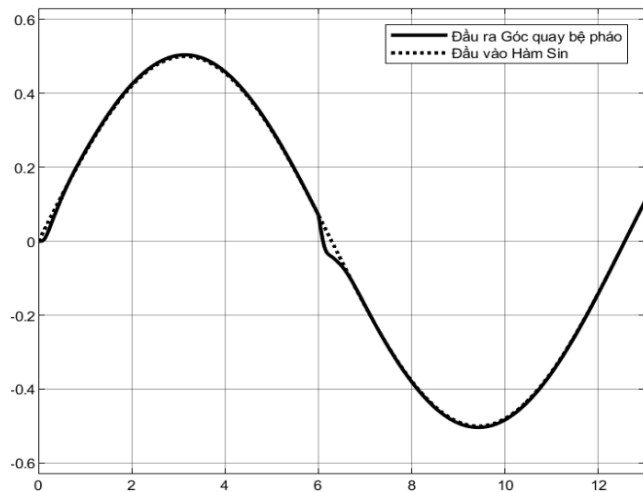
Hình 12. Đầu ra ở chế độ bám với hàm ramp

Ở chế độ bám sát, góc sai lệch của pháo so với mục tiêu nhỏ (từ  $0^\circ \div 4.8^\circ$ ). Khi đó chỉ cần quay bệ pháo với một vận tốc nhỏ thì pháo đã trùng với mục tiêu quan sát. Khảo sát hệ truyền động với đầu vào là hàm ramp có độ dốc là  $3^\circ$ , đặc tính của hệ truyền động có dạng như hình 12. Sau 0,58 giây thì đáp ứng đầu ra bám sát tác động đầu vào, Tại thời điểm 2 giây tác động tải va đập, hệ thống nhanh chóng bù lại tác động của tải và trở về ổn định theo sai số động học yêu cầu.

- Tác động đầu vào là hàm sin.



Hình 13. Chế độ vượt với hàm sine wave



Hình 14. Chế độ bám sát với hàm sine wave

Ở chế độ vượt, góc sai lệch giữa pháo và mục tiêu lớn. Do đó, khi điều khiển quay bệ pháo về phía mục tiêu ta cần quay bệ pháo với một gia tốc góc lớn. Trong mô phỏng hệ truyền động pháo tàu AK-176M cho tác động đầu vào là một hàm sin có tốc độ quay là  $2 \text{ rad/s}$ . Khi cho đầu vào hàm sine wave thì đường đặc tính đầu ra của hệ truyền động có dạng như hình 14 cũng có dạng hình sin nhưng có độ trễ sau 0,47s.

Ở chế độ bám, góc lệch giữa bệ pháo và mục tiêu nhỏ. Lúc này bệ pháo quay với gia tốc góc nhỏ. Trong mô phỏng ta cho tác động đầu vào là một hàm sin có tốc độ quay là  $0,5 \text{ rad/s}$ , đầu ra cũng là hình sin bám sát theo tác động đầu vào. Tương tự, tại thời điểm 6 giây, tác động tải va đập  $M_{ct} = 200 \text{ N.m}$ , hệ thống nhanh chóng bù lại tác động của tải và trở về ổn định theo sai số động học yêu cầu như hình 14.

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp các bộ điều khiển thực tế cho hệ thống bám điện thủy lực pháo AK-176M. Phần trình bày được bắt đầu từ việc phân tích quá trình làm việc và hiệu chỉnh pháo thực tế cho đến xây dựng các bộ điều modal, bộ quan sát trạng thái, bộ điều khiển PID 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, với nhiều tham số và nhiều vòng điều chỉnh. Bài báo sử dụng phương pháp điều khiển modal cùng với bộ quan sát trạng thái kết hợp với bộ điều khiển PID theo thuật toán GA để xây dựng các bộ điều chỉnh sát với thực tế khai thác sử dụng và hiệu chỉnh pháo AK-176M trên tàu. Trong kết quả đánh giá chất lượng làm việc hệ truyền động bám pháo AK-176M nhận thấy hệ thống đạt được các thông số tương ứng với yêu cầu tính năng kỹ chiến thuật.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Tuấn Thành, Hoàng Hải Sơn, Hoàng Mạnh Cường, "Nghiên cứu xây dựng hệ bám điện thủy lực kênh hướng cho pháo tàu AK-176M ứng dụng điều khiển thích nghi," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học công nghiệp Hà Nội*, 60, 6, 2024.
- [2]. Viện Kỹ thuật Hải quân, *Thuyết minh kỹ thuật pháo AK-176M*. 2011.
- [3]. Hoàng Đức Kiểm, Đào Hoa Việt, Nguyễn Thanh Tiên, Phùng Mạnh Hùng, *Cơ sở tính toán thiết kế các hệ thống điều khiển vũ khí*. Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, 2016
- [4]. Nguyễn Trọng Hiếu, *Thủy lực kỹ thuật máy và hệ thống khí nén trên tàu quân sự*. Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [5]. Tae-Chung Kim, *Analysis of clearance non-linearities and vibro-impacts in torsional systems*. The Ohio State University, 2003.
- [6]. Noah D Manring, Roger C Fales, *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons, 2019.
- [7]. Roger C. Fales Noah D. Manring, *Hydraulic Control System*. John Wiley & Sons, 2020.

- [8]. Putov V.V., *Adaptive control for dynamic systems: systems with reference models*. SPb: Publisher Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 92, 2001.
- [9]. Burakov, *Automatic Control Theory. Guidelines for Laboratory Work*. SPbGUAP. SPb: SPbGUAP Publishing House, 93, 2006.
- [10]. Putov V.V., *Adaptive and modal control of mechanical objects with elastic deformations*. 64, 2002.
- [11]. NT Kuzovkov, *Modal control and observing devices*. 1976.
- [12]. Jerome D Simon, Sanjoy Mitter, "A theory of modal control," *Information and Control*, 13(4), tr. 316-353, 1968.
- [13]. Artemy Vasilyevich Bashari, *Electric Drive Control*. Ripol Classic, 1983.
- [14]. Gang Tao, *Adaptive Control Design and Analysis*. University of Virginia, 2003.
- [15]. Ayman A. Aly, "PID Parameters Optimization Using Genetic Algorithm Technique for Electrohydraulic Servo Control System," *Intelligent Control and Automation*, 69-76, 2011.
- [16]. Trần Tấn Khang, Nguyễn Minh Tâm, "Ứng dụng thuật giải di truyền (GA) để xác định thông số bộ PID trong điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ 3 pha," *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh*, 2012

---

#### AUTHORS INFORMATION

**Do Sy Trung<sup>1</sup>, Nguyen Van Huan<sup>1</sup>, Pham Tuan Thanh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Technology, General Department of Defense Industry, Vietnam

<sup>2</sup>Institute of Missile and Control Engineering, Military Technical Academy, Vietnam