

TỐI ƯU THÔNG SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN - THỦY LỰC DÙNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN

Hà Xuân Vinh^{1*}, Hoàng Việt Phong², Lê Tiến Dũng³

¹ Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

² Công ty Điện lực Huế

³ Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

* Email: hxvinh@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 3/9/2025; ngày hoàn thành phản biện: 21/9/2025; ngày duyệt đăng: 01/10/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất giải thuật tối ưu thông số bộ điều khiển PID cho hệ thống truyền động điện – thủy lực (Electro-Hydraulic Actuators - EHA) sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Hệ thống EHA, sau thời gian vận hành, sẽ phát sinh các lỗi như lỗi cảm biến vị trí, lỗi cơ cấu chấp hành, ... khiến hệ thống hoạt động không chính xác, không tin cậy. Khi sử dụng các bộ điều khiển PID, Fuzzy – PID hoặc một số bộ điều khiển lai PID, việc lựa chọn các tham số tham số K_p , K_i và K_d trong hệ thống phi tuyến như EHA là rất khó khăn và tốn nhiều thời gian. Do đó, thuật toán GA được áp dụng để tối ưu các giá trị K_p , K_i và K_d của bộ điều khiển PID, đảm bảo hoạt động chất lượng, ổn định và hiệu quả của EHA, gọi là giải thuật GA_PID. Kết quả mô phỏng so sánh với bộ điều khiển PID cho thấy các đáp ứng đầu ra được cải thiện rõ rệt.

Từ khóa: Bộ truyền động điện–thủy lực (Electro-Hydraulic Actuators - EHA); Bộ điều khiển PID; Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm).

1. MỞ ĐẦU

Gần đây, các hệ thống truyền động cơ điện (EMA) đã dần thay thế các hệ thống truyền động thủy lực (HA) truyền thống vì các hệ thống EMA nổi trội về trọng lượng nhẹ và tính linh hoạt vượt trội. Tuy nhiên, các hệ thống này cũng phải đối mặt với những thách thức đáng kể liên quan đến hiệu quả năng lượng do cơ cấu trục vít. Để khắc phục những hạn chế của hệ thống HA và tận dụng những ưu điểm của hệ thống điện, một hệ thống thủy lực và điện lai, được gọi là bộ truyền động điện - thủy lực (EHA), đã được phát triển [1]. Các hệ thống EHA nổi bật với tỷ lệ công suất trên trọng lượng tuyệt vời,

phản ứng nhanh và mượt mà, độ cứng cao và định vị chính xác; do đó, các hệ thống này đã trở thành một phần không thể thiếu của các bộ truyền động trong các ứng dụng công nghiệp hiện đại, bao gồm máy bay, rô-bốt, phẫu thuật, xây dựng và nhiều loại máy móc công nghiệp khác [2, 3].

Trong các ứng dụng robot, hệ thống EHA được sử dụng để tạo ra các hệ thống truyền động có khả năng chịu tải cao và tỷ lệ mật độ công suất lớn [4]. Các tác giả [5] đã tận dụng EHA để phát triển một robot có chân sử dụng điều khiển theo dõi quỹ đạo dự đoán mô hình với một bộ ước lượng trực tuyến đa thang đo. Tương tự, các tác giả trong [6] đã phát triển một hệ thống EHA cho một robot khung xương ngoài. Một đặc điểm nổi bật của hệ thống cánh tay robot khi sử dụng micro-EHA là những robot này có trọng lượng nhẹ và khả năng xử lý tải trọng cao. Tận dụng những ưu điểm trên, Yong-Kwun Lee và cộng sự, [7] đã phát triển một cánh tay robot mô phỏng sinh học có trọng lượng 2,2 kg và có thể nâng một vật nặng khoảng 5 kg. Hệ thống này đã chứng minh rằng cánh tay robot với hệ thống mini-EHA có thể đạt được công suất cao hơn trọng lượng của chúng. Nhìn chung, cánh tay robot có kích thước nhỏ và khả năng chịu tải nhẹ có thể sử dụng bộ truyền động điện [8, 9]. Ngược lại, EHA được sử dụng để phát triển nhiều ứng dụng hạng nặng vì nó có thể mang tải nặng với độ chính xác cao và chi phí thấp.

Một trong những vấn đề phức tạp khi thiết kế các ứng dụng EHA là phát triển và tối ưu hóa các thuật toán điều khiển để cải thiện hiệu suất điều khiển. Để đạt được đồng thời độ chính xác cao và hiệu suất cao, bộ điều khiển tỷ lệ-tích phân-đạo hàm (PID) được áp dụng đầu tiên. Trong [10], Skarpetis và cộng sự đã triển khai một bộ điều khiển PID mạnh mẽ để điều khiển vị trí của EHA dưới tác động bất lợi của các bất định vật lý và nhiễu loạn bên ngoài. Trên thực tế, việc lựa chọn các tham số tham số K_p , K_i và K_d trong các hệ thống phi tuyến tính mà không có đủ kiến thức về hệ thống là rất khó khăn. Do đó, các nhà nghiên cứu cũng sử dụng thuật toán mờ và PID để thực hiện quá trình tự điều chỉnh. Thông qua quá trình tinh chỉnh này, kết quả đã thu được các giá trị PID phù hợp nhất [11, 12, 13]. Ngoài ra, Shern và cộng sự đã tiến hành một nghiên cứu để so sánh việc lựa chọn tham số PID dựa trên một số kỹ thuật như phương pháp điều chỉnh Ziegler-Nichols, kỹ thuật tối ưu hóa bầy hạt thông thường (PSO) và tối ưu hóa bầy hạt phù hợp dựa trên ưu tiên (PFPSO). Kết quả thu được cho thấy tất cả các phương pháp đều đạt được các hiệu ứng cụ thể, trong đó PFPSO vượt trội hơn các phương pháp còn lại [14].

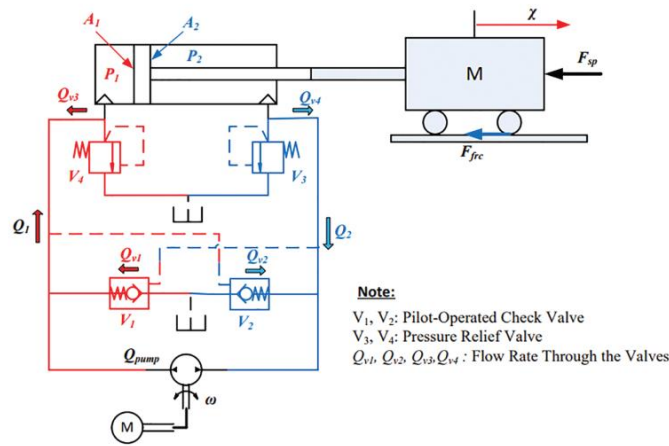
Trong những trường hợp như vậy, các phương pháp điều khiển thích nghi xem xét động lực học hệ thống thay đổi theo thời gian hoặc các phương pháp điều khiển dựa trên PID lai sử dụng mạng nơ-ron, thuật toán GA hoặc thuật toán PSO có thể tối ưu hóa khả năng điều khiển trong khi vẫn duy trì tính ổn định và hiệu suất. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất áp dụng thuật toán GA để tối ưu các tham số của bộ điều khiển PID cho hệ thống EHA, nhằm khắc phục những hạn chế của các phương pháp thử sai truyền thống vốn dựa trên kinh nghiệm dày dặn và các lần lặp lại tốn thời gian. GA_PID

được phát triển để lựa chọn các giá trị K_p , K_i và K_d tối ưu, đảm bảo hoạt động ổn định và hiệu quả tốt nhất cho hệ EHA. Dựa trên kết quả mô phỏng và so sánh với các kết quả của bộ điều khiển PID thông thường, thuật toán được đề xuất linh hoạt hơn và cải thiện rõ rệt về kết quả.

Bài báo này được tổ chức như sau. Cơ sở lý thuyết và đề xuất giải thuật được mô tả trong Phần 2. Phần 3 trình bày kết quả và thảo luận. Cuối cùng, kết luận được đưa ra trong Phần 4.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI THUẬT

2.1. Mô hình toán học hệ thống EHA



Hình 1: Sơ đồ mô hình hoá hệ thống EHA

Mô hình hóa hệ thống EHA được thể hiện trong Hình 1 [13]. Trong đó, M : động cơ bơm, Q_{pump} : lưu lượng từ thùng dầu chính, Q_1 , Q_2 : lưu lượng vào xi lanh, Q_{v3} , Q_{v4} : lưu lượng qua van giảm áp, Q_{v1} , Q_{v2} : lưu lượng qua van một chiều V_1 và V_2 , V_1 , V_2 : van một chiều điều khiển được hướng chặn, V_3 , V_4 : van giảm áp, M_p : khối lượng tĩnh của pít-tông và tải điều khiển, \dot{x}_p và \ddot{x}_p : lần lượt là vận tốc và gia tốc của pít-tông, A_1 , A_2 : lần lượt là diện tích bề mặt của pít-tông, F_{sp} : lực tải bên ngoài của lò xo, F_{frc} : lực ma sát, d : nhiễu chưa biết, P_1 và P_2 : lần lượt là áp suất trong hai buồng xi lanh, β_v : hệ số suy giảm độ nhớt, C_{leak} : hệ số rò rỉ bên trong xi lanh và C_d : hệ số van. Giải thiết các ảnh hưởng lực ma sát giữa các thành phần, yếu tố khối lượng/vật chất cấu tạo các thành phần, ... được lược bỏ trong quá trình xây dựng phương trình động học, mô hình hóa mô phỏng hệ EHA.

Phương trình động lực học của vị trí Pít-tông có thể được viết như sau:

$$m_p \ddot{x}_p + \beta_v \dot{x}_p + F_{sp} + F_{frc} + d = A_1 P_L \quad (1)$$

Trong đó $P_L = (P_1 - \varepsilon P_2)$; $A_2 = \varepsilon A_1$, P_L : là chênh lệch áp suất của 2 phía xi lanh. Các phương trình liên tục của hệ thống thủy lực của EHA có thể được biểu thị bằng:

$$\dot{P}_1 = \Delta_1(Q_1 - Q_i - \dot{\chi}_p A_1) \quad (2)$$

$$\dot{P}_2 = \Delta_2(Q_2 + Q_i + \dot{\chi}_p A_2) \quad (3)$$

Với $\Delta_1 = \frac{\phi_e}{(V_{01} + \chi_p A_1)}$; $\Delta_2 = \frac{\phi_e}{(V_{02} - \chi_p A_2)}$; V_{01}, V_{02} : thể tích ban đầu của 2 phía buồng xi lanh. F_{sp} : Lực tải bên ngoài có thể tính bằng:

$$F_{sp} = K_{sp} \chi_p \quad (4)$$

Với K_{sp} và χ_p lần lượt là độ cứng của lò xo và vị trí Pit-tông.

F_{frc} : Lực ma sát có thể tính bằng công thức:

$$F_{frc} = \sqrt{2e} (F_{brk} - F_c) e^{e^{-\left(\frac{v_p}{v_{st}}\right)^2}} \frac{v_p}{v_{st}} + F_c \tanh \tanh \left(\frac{v_p}{v_{st}} \right) \quad (5)$$

Trong đó F_{brk}, F_c lần lượt là ma sát trượt và ma sát Coulomb; v_p, v_{st} là vận tốc và ngưỡng vận tốc Stribek tương ứng.

Các phương trình liên tục của hệ thống thủy lực EHA có thể được biểu thị bằng:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\phi_e}{V_{01} + \chi_p A_1} (Q_1 - Q_i - \dot{\chi}_p A_1) \quad (6)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\phi_e}{V_{02} - \chi_p A_2} (Q_2 + Q_i + \dot{\chi}_p A_2) \quad (7)$$

Với $Q_i = C_{leak}(P_1 - P_2)$; $Q_1 = Q_{pump} + Q_{v1} - Q_{v3}$; $Q_2 = -Q_{pump} + Q_{v2} - Q_{v4}$; và $Q_{pump} = \sigma_p \omega$. Trong đó: Q_i : lưu lượng rò rỉ bên trong xi lanh, ω : tốc độ quay của động cơ servo, σ_p : độ dịch chuyển của bơm.

Trong quá trình điều khiển vị trí, hệ thống máy bơm và động cơ servo là những thiết bị đầu cuối thực hiện thuật toán điều khiển, là thành phần cốt lõi. Động cơ servo chuyển đổi điện áp đầu vào điều khiển thành tốc độ đầu ra của động cơ. Với yêu cầu tốc độ phản hồi cao kết hợp độ chính xác điều khiển vị trí của động cơ servo, mối quan hệ giữa tốc độ đầu ra của mô tơ (ω) và tín hiệu điều khiển đầu vào (u) có thể coi là một vòng tỷ lệ, được biểu thị như sau:

$$\omega = K_m u \quad (8)$$

Với K_m : là độ lợi điều khiển. Do đó: $Q_{pump} = \sigma_p \omega = \sigma_p K_m u$.

Tốc độ dòng chảy qua van một chiều vận hành có thể được mô tả trong hai trường hợp. Trong trường hợp van một chiều vận hành bên trái (V1):

$$Q_{v1} = C_d A_{1p} \sqrt{\frac{2|P_1|}{\rho}} \left(\frac{P_1}{|P_1|} \right) \quad (9)$$

Tương tự, trường hợp van một chiều vận hành bên phải (V2)

$$Q_{v2} = C_d A_{2p} \sqrt{\frac{2|P_2|}{\rho}} \left(\frac{P_2}{|P_2|} \right) \quad (10)$$

Từ công thức (1) đến (10), hệ thống được biểu diễn bằng vector trạng thái $[\chi_1 \chi_2 \chi_3]^T = [\chi_p \dot{\chi}_p P_L]^T$ và được thể hiện theo công thức (11) như sau:

$$[\dot{\chi}_1 \dot{\chi}_2 \dot{\chi}_3] = \left[\chi_2 \frac{1}{m_p} [A_1 \chi_3 - \beta_v \chi_2 - K_{sp} \chi_1 - F_{frc} - d] \frac{\phi_e A_1}{v_{01} + \chi_1 A_1} \chi_2 + \frac{\phi_e}{v_{01} + \chi_1 A_1} (Q_1 - Q_i) - \frac{\phi_e A_2}{v_{02} - \chi_1 A_2} \chi_2 - \frac{\phi_e}{v_{02} - \chi_1 A_2} (Q_2 + Q_i) \right] \quad (11)$$

Để đơn giản cho việc điều khiển, lực ma sát được xem như khoảng cách dịch chuyển d . Hơn nữa, thay phương trình (3), (4) và (5) vào phương trình (1), và đạo hàm cả hai vế của phương trình (1), chúng ta có được kết quả như sau:

$$m_p \ddot{\chi}_p + \beta_v \dot{\chi}_p + K_{sp} \chi_p + \dot{F}_{frc} = (A_1 \dot{P}_1 - A_2 \dot{P}_2) \quad (12)$$

$$\ddot{\chi}_p = -\frac{\beta_v}{m_p} \dot{\chi}_p - \frac{K_{sp}}{m_p} \chi_p + \frac{(A_1 \Delta_1 + A_2 \Delta_2)}{m_p} \sigma_p u - \frac{(A_1^2 \Delta_1 + A_2^2 \Delta_2)}{m_p} \dot{\chi}_p + \frac{\Omega}{m_p}$$

Trong đó:

$$\Omega = -\frac{F_c}{v_{cl}} \tanh \tanh \left(\frac{v_p}{v_{xt}} \right)^2 + \frac{\sqrt{2e}(F_{brk} - F_c) e^{-\left(\frac{v_p}{v_{st}}\right)^2}}{v_{st}} - \frac{2\sqrt{2e} \dot{\chi}_p^2 (F_{brk} - F_c) e^{-\left(\frac{v_p}{v_{st}}\right)^2}}{v_{st}^3} + \frac{F_c}{v_{xt}} + A_1 \Delta_1 Q_{13i} - A_2 \Delta_2 Q_{24i}$$

Với $Q_{13i} = Q_{v1} - Q_{v3} - Q_i$; $Q_{24i} = Q_{v2} - Q_{v4} + Q_i$ hoặc

$$\ddot{\chi}_p = -\gamma_1 \dot{\chi}_p - \gamma_2 \chi_p + \gamma_3 + \gamma_4 u \quad (13)$$

Trong đó: u là tín hiệu điện áp điều khiển đầu vào động cơ servo và

$$\gamma_1 = \frac{\beta_v}{m_p}; \gamma_2 = \frac{K_{sp} + (A_1 \Delta_1^2 + A_2 \Delta_2^2)}{m_p}; \gamma_3 = \frac{\Omega}{m_p}; \gamma_4 = \frac{(A_1 \Delta_1 + A_2 \Delta_2) \sigma_p K_m}{m_p}$$

Phương trình (13) có thể mô tả trong phương trình không gian trạng thái:

$$\{\dot{\chi} = f(\chi) + g(\chi)u \quad y = r(\chi)\} \quad (14)$$

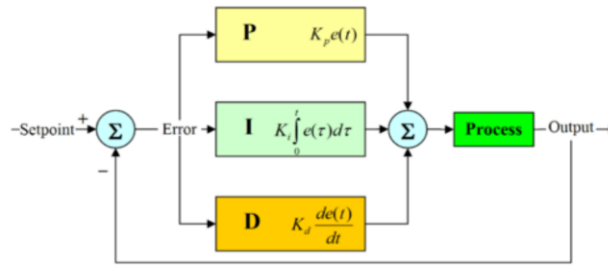
Với

$$\chi = [\chi_1 \chi_2 \chi_3]^T \in R; f(\chi) = A\chi + \gamma_3$$

$$A = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ -\gamma_2 \ -\gamma_1]; \quad g(\chi) = [0 \ 0 \ \gamma_4]; \quad u = \omega \quad \text{và} \quad \{\chi_1 = \chi_1; \chi_2 = \dot{\chi}_1; \chi_3 = \dot{\chi}_2 = \ddot{\chi}_1 \dot{\chi}_3 = -\gamma_1 \chi_3 - \gamma_2 \chi_2 + \gamma_3 + \gamma_4 u$$

2.2. Bộ điều khiển PID cho hệ thống EHA

Cấu trúc của bộ điều khiển PID như Hình 2, gồm có ba thành phần là khâu khuếch đại (P), khâu tích phân (I) và khâu vi phân (D).



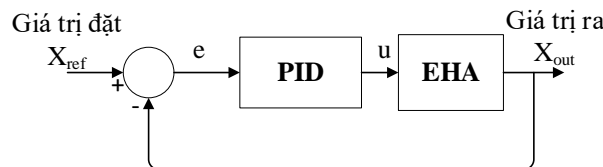
Hình 2: Cấu trúc bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID được mô tả bằng công thức (15):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

trong đó: $e(t)$: tín hiệu đầu vào, $u(t)$: tín hiệu đầu ra, K_p : hệ số khuếch đại, K_i : hệ số tích phân và K_d : hệ số vi phân.

Trong mục này, ta xây dựng cấu trúc điều khiển của bộ PID cho hệ EHA, với giá trị đặt là vị trí Pít-tông mong muốn, tín hiệu điều khiển (u) là tín hiệu điện áp điều khiển tốc độ động cơ servo và giá trị ra là vị trí Pít-tông của EHA thực tế. Sử dụng Phương pháp Ziegler-Nichols thứ nhất kết hợp với phương pháp dò tìm để xác định 3 hệ số $K_p = 7.00$, $K_i = 21.53$ và $K_d = 0.08$. Các giá trị đặt đầu vào được mô phỏng bởi hàm nấc và hàm sin. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển như Hình 3.



Hình 3: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID cho hệ EHA

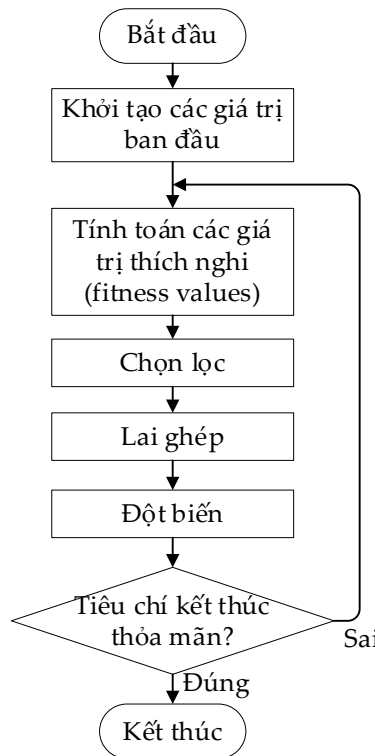
2.3. Tối ưu các thông số bộ điều khiển PID sử dụng thuật toán GA

Thuật toán GA được phát triển từ những năm thập niên 1960 và được phát triển áp dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu trong những thập niên vừa qua. Gần đây, Eka Widya Suseno và cộng sự đã áp dụng thuật toán GA tối ưu các thông số K_p , K_d và K_i của bộ điều khiển PID cho động cơ điện một chiều [15]. Trong bài báo trên, một quần thể nhiễm sắc thể đã được khởi tạo tương ứng với các tham số K_p , K_d và K_i của bộ điều khiển PID. Tác giả sử dụng hàm đánh giá độ thích nghi (*Fitness Evaluation*) để đánh giá bộ gene nào của tổ hợp các nhiễm sắc thể thích nghi tốt với môi trường. Thông qua việc lặp lại, các thao tác chọn lọc, lai ghép và đột biến được thực hiện để tinh chỉnh dần độ thích nghi của các nhiễm sắc thể và tính toán các tổ hợp tham số tạo mới cho bộ điều khiển PID. Sau mỗi vòng lặp, việc tính toán và đánh giá các giá trị đạt được của hàm *Fitness Evaluation* giữa thế hệ con và thế hệ tiền nhiệm, từ đó chỉ giữ lại những cá thể tiêu biểu nhất.

Quá trình này được thực hiện lặp lại cho đến khi xác định được số lượng thế hệ tối đa hoặc đạt được mức độ được xem là phù hợp. Kết quả của phương pháp này là một tập hợp các tham số điều khiển K_p , K_d và K_i tối ưu, vượt trội nhất cho bộ điều khiển PID, như Hình 4.

Trong phần này, thuật toán GA được sử dụng để tối ưu cho các giá trị tham số K_p , K_i và K_d của bộ điều khiển PID, đảm bảo các tiêu chí chất lượng điều khiển đầu ra được tốt nhất. Cụ thể, 3 tham số K_p , K_i và K_d được mã hóa thành một chuỗi số nhị phân biểu diễn trong mỗi nhiễm sắc thể của một quần thể. Kích thước quần thể (*population size*) được chọn là 20, miền giá trị của các tham số K_p , K_i và K_d là $[7.00, 8.00]$, $[21.00, 25.00]$ và $[0.00, 0.10]$ tương ứng, số lượng thế hệ thực hiện tiến hóa tối đa (*max no. of generations*) được chọn là 30. Một hàm *Fitness* được chọn là sai số tích phân bình phương chuẩn hóa (Standardized Squared Integral Error - SSIE) để xác định độ thích nghi của từng cá thể trong quần thể, như công thức (16), được thực hiện trong môi trường Matlab/Simulink, với e là sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị đáp ứng đầu ra của hệ thống EHA. Để đảm bảo các tiêu chí về chất lượng điều khiển, hàm *Fitness* được cực tiểu hóa trong các bước chọn lọc, lai ghép và đột biến để khám phá những cá thể mới có giá trị *Fitness* tốt hơn.

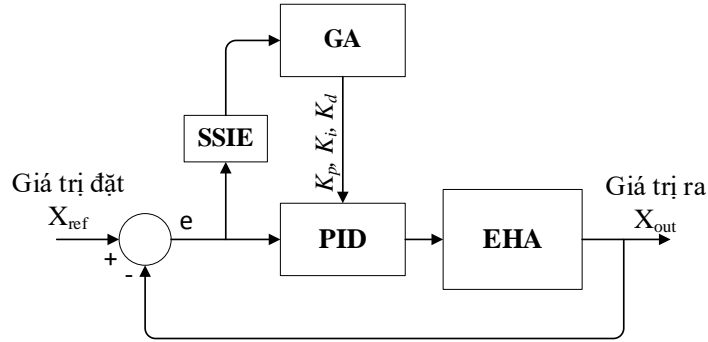
$$Fitness = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (16)$$



Hình 4: Lưu đồ thuật toán GA

Dựa vào các giá trị thích nghi của 20 cá thể trong quần thể, bước chọn lọc sẽ tiến hành đánh giá, chọn hai cá thể (cặp parent) nào cho giá trị thích nghi tốt nhất (có giá trị

SSIE nhỏ nhất) sẽ được giữ lại mà không thay đổi. Các cặp cá thể còn lại tiếp tục tham gia các quá trình lai ghép và đột biến với thông số xác suất lai ghép (*Crossover probability*) được chọn bằng 0.8 và xác suất đột biến (*Crossover probability*) là 0.5. Sơ đồ khối của thuật toán GA_PID được thể hiện trong Hình 5.

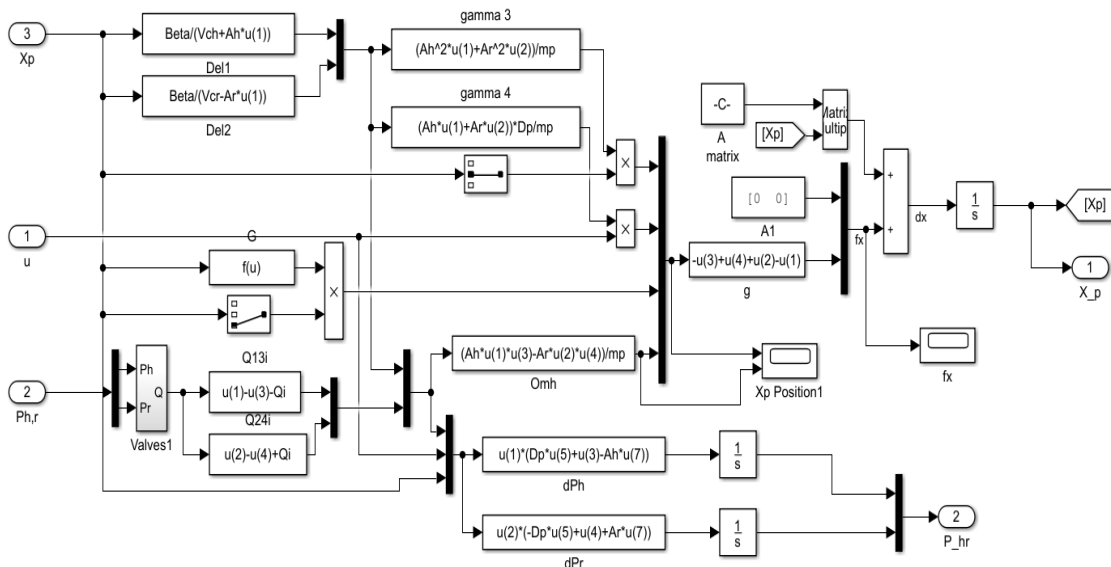


Hình 5: Sơ đồ khối quá trình tối ưu bộ tham số PID sử dụng GA

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sơ đồ mô phỏng hệ thống EHA

Sơ đồ mô phỏng hệ thống EHA trên Simulink như Hình 6.



Hình 6: Sơ đồ mô phỏng hệ thống EHA

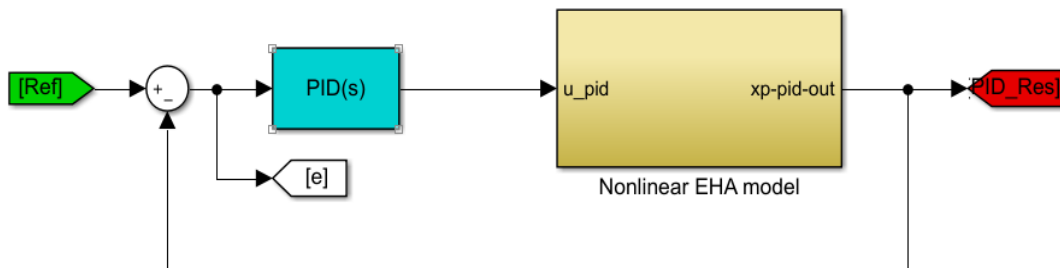
Bảng 1 mô tả các thông số của hệ thống EHA được chọn từ EHA Mini-Motion Package Type 4 [14].

Bảng 1. Bảng thông số bộ EHA MMP4

STT	Model	Đvt	Thông số
1	Van giảm áp	Mpa	7.1
2	Nguồn	VDC	12
3	Kích thước xi lanh (mm)	mm	$\phi 40 - \phi 20$
4	Hành trình xi lanh (mm)	mm	300
5	Cổng Orifice A		$\Phi 8$
6	Cổng Orifice B		$\Phi 8$
7	Tùy chọn		Liên hệ với KYB

3.2. Sơ đồ mô phỏng điều khiển hệ thống EHA

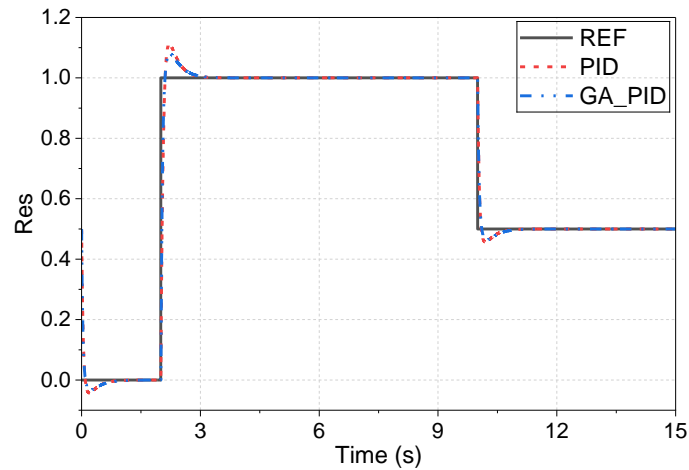
Sơ đồ mô phỏng điều khiển hệ thống EHA dùng PID trên Simulink như **Hình 7**.



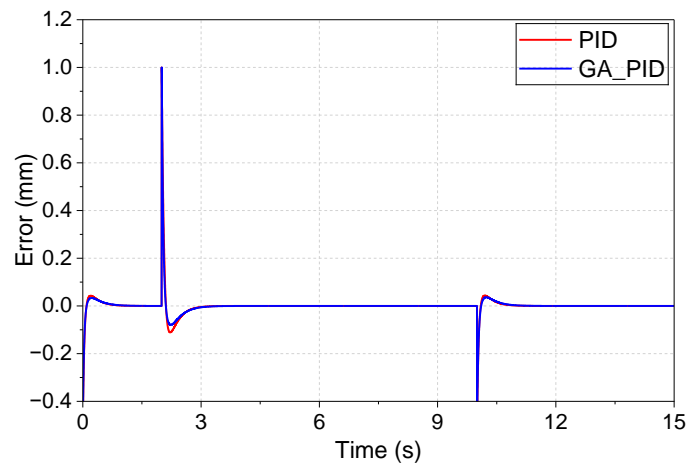
Hình 7: Sơ đồ mô phỏng điều khiển hệ thống EHA dùng PID

3.3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Trong phần này, để so sánh về độ vọt lố, thời gian tăng và thời gian xác lập giữa hai bộ điều khiển PID và GA_PID trong hệ điều khiển EHA, tín hiệu hàm nấc ngõ vào được sử dụng, với bộ thông số K_p , K_i và K_d sau khi tối ưu dùng GA_PID lần lượt là 7.4729, 23.3792 và 0.0654 tương ứng. Kết quả đáp ứng đầu ra so với tín hiệu đặt ngõ vào và sai lệch giữa PID và GA_PID được thể hiện theo như **Hình 8** và **Hình 9**.



Hình 8: Đáp ứng vị trí đầu ra trong trường hợp hàm nấc đầu vào.



Hình 9: Các sai lệch giữa đáp ứng vị trí trong trường hợp hàm nấc đầu vào.

Từ kết quả mô phỏng, các chỉ tiêu chất lượng điều khiển của bộ PID và GA_PID được thống kê trong Bảng 2. Kết quả so sánh cho thấy đáp ứng tín hiệu đầu ra dùng GA_PID tốt hơn PID với độ vọt lố thấp hơn (9,574%), thời gian tăng giảm (58,875ms), thời gian xác lập giảm (1,602s) và sai số xác lập không đáng kể.

Bảng 2. Bảng so sánh các chỉ tiêu chất lượng các bộ điều khiển PID và GA_PID

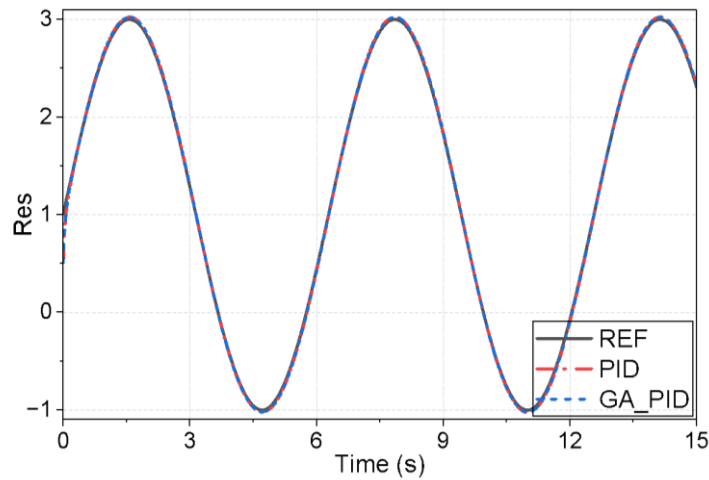
STT	Các chỉ tiêu chất lượng bộ điều khiển	PID	GA_PID
1	Độ vọt lố	14,130%	9,574%
2	Thời gian tăng (ms)	59,91	58,875
3	Thời gian xác lập (s)	1,744	1,602

Để đánh giá hiệu quả giữa các bộ điều khiển trên, đề tài áp dụng tín hiệu hình sin để khảo sát sai số cực đại của từng bộ điều khiển khi hệ thống đạt trạng thái ổn định. Kết quả đáp ứng đầu ra so với tín hiệu đặt của các bộ điều khiển PID, GA_PID được thể

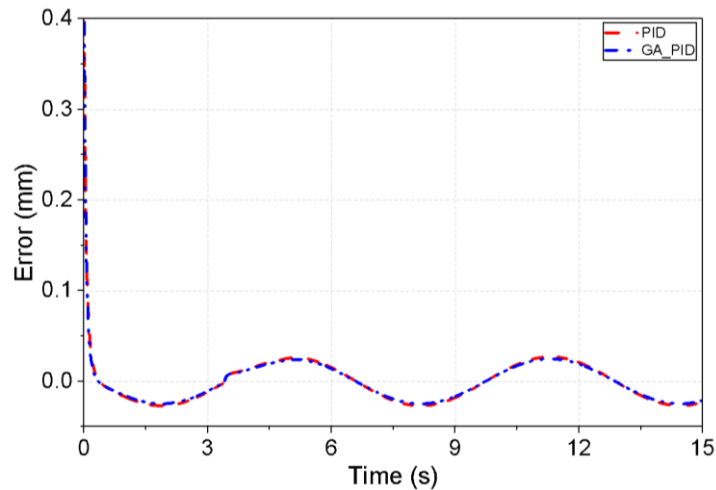
hiện theo như Hình 10 và Hình 11 với sai lệch lớn nhất lúc xác lập $e_{PID} = 0,0077$ (cm) và $e_{GA_PID} = 0,0033$ (cm). Bảng 3 cho thấy sai số tích phân bình phương chuẩn hóa (SSIE) của bộ GA_PID nhỏ hơn bộ PID.

Bảng 3. Kết quả sai số tích phân bình phương chuẩn hóa (SSIE) của PID và GA_PID

Thuật toán	Hàm nấc	Hàm sin
SSIE_PID	0.03693	0.01157
SSIE_GA_PID	0.03097	0.01046



Hình 10: Đáp ứng vị trí đầu ra trong trường hợp hàm sin đầu vào.



Hình 11: Các sai lệch giữa đáp ứng vị trí trong trường hợp hàm sin đầu vào.

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày áp dụng thuật toán GA tối ưu các tham số K_p , K_i và K_d cho bộ điều khiển PID trong điều khiển hệ thống truyền động điện – thủy lực EHA, giúp khắc

phục những hạn chế trong việc khó xác định tham số bộ điều khiển PID cho đối tượng có tính phi tuyến so với các phương pháp xác định tham số điều khiển truyền thống. Kết quả mô phỏng thuật toán GA_PID giúp điều khiển vị trí của EHA chính xác hơn với chất lượng điều khiển được cải thiện đáng kể, với độ vọt lố giảm, thời gian tăng và thời gian xác lập được rút ngắn cũng như sai số xác lập giảm. Đây là một đặc điểm giúp thuật toán này trở nên hữu dụng trong các bài toán áp dụng thực tế. Tuy nhiên giải thuật này vẫn tồn tại một số hạn chế, điển hình như việc mô phỏng chương trình matlab code kết hợp với mô phỏng hệ EHA trong môi trường Matlab/Simulink tốn khá nhiều thời gian hơn, thời gian thuật toán GA hội tụ vẫn còn chậm.

Nghiên cứu này không chỉ khẳng định tính phù hợp của GA_PID đối với hệ thống EHA và các đối tượng phi tuyến tương tự, mà còn cung cấp nền tảng kiến thức về tối ưu điều khiển cho các sinh viên đại học, học viên cao học và nghiên cứu sinh cùng lĩnh vực tham khảo, cũng như mở ra hướng nghiên cứu mới trong việc áp dụng các thuật toán học máy (machine learning), học sâu (deep learning) nhằm tối ưu các bộ điều khiển trên các hệ vật lý thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Altare and A. Vacca (2015). A design solution for efficient and compact electro-hydraulic actuators, *Procedia Engineering*, vol. 106, no. 2, pp. 8–16.
- [2]. S. Salleh, M. F. Rahmat, S. M. Othman and K. A. Danapalasingam (2015). Review on modelling and controller design of hydraulic actuator systems, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 338–367.
- [3]. N. Zainab and M. Hammad (2021). System identification and controller design for hydraulic actuator, *Technology Forces Journal of Engineering and Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 11–27.
- [4]. Y. Xia, Y. Nie, Z. Chen, L. Lyu and P. Hu (2022). Motion control of a hydraulic manipulator with adaptive nonlinear model compensation and comparative experiments, *Machines*, vol. 10, no. 3, pp. 214.
- [5]. J. Huang, H. An, Y. Yang, C. Wu, Q. Wei et al. (2020). Model predictive trajectory tracking control of electro-hydraulic actuator in legged robot with multi-scale online estimator, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 95918–95933.
- [6]. D. Lee, B. Song, S. Y. Park and Y. S. Baek (2019). Development and control of an electro-hydraulic actuator system for an exoskeleton robot, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, pp. 4295.
- [7]. Y. K. Lee and S. J. Lee (2013), A bio-mimetic robot arm actuated by micro EHA, in *Proc. URAI*, Jeju, Korea, pp. 39–44.
- [8]. W. Han, K. T. Chau, Z. Hua and H. Pang (2022). Compact wireless motor drive using orthogonal bipolar coils for coordinated operation of robotic arms, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, pp. 1–8.
- [9]. C. Y. Liu, J. J. Liang, T. H. S. Li and K. C. Chang (2019). Motion imitation and augmentation system for a six degrees of freedom dual-arm robot, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 153986–153998.

- [10]. M. G. Skarpetis and F. N. Koumboulis (2013). Robust PID controller for electro –hydraulic actuators, *in Proc. ETFA*, Cagliari, Italy, pp. 1–5.
- [11]. N. Ishak, M. Tajjudin, R. Adnan, H. Ismail and Y. M. Sam (2011). Real-time application of self-tuning PID in electrohydraulic actuator, *in Proc. ICCSCE*, Penang, Malaysia, pp. 364–368.
- [12]. R. Adnan, M. Tajjudin, N. Ishak, H. Ismail and M. H. F. Rahiman (2011). Self-tuning fuzzy PID controller for electrohydraulic cylinder, *in Proc. CSPA*, Penang, Malaysia, pp. 395–398.
- [13]. Tan Nguyen Van, Huy Q. Tran, Vinh Xuan Ha, Cheolkeun Ha and Phu Huynh Minh (2022). Fuzzy Feedback Control for Electro-Hydraulic Actuators, *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 36, no. 2, pp 2441 – 2456.
- [14]. C. M. Shern, R. Ghazali, C. S. Horng, C. Soon and H. I. Jaafar (2020). Optimization techniques in PID controller on a nonlinear electro-hydraulic actuator system, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 56, no. 2, pp. 296–303.
- [15]. Eka Widya Suseno, Alfian Ma'arif (2021). Tuning of PID Controller Parameters with Genetic Algorithm Method on DC Motor, *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol. 1, no. 1, pp 41 – 53.

OPTIMIZATION OF PID CONTROLLER PARAMETERS FOR ELECTRO-HYDRAULIC ACTUATORS USING GENETIC ALGORITHM

Ha Xuan Vinh^{1*}, Hoang Viet Phong², Le Tien Dung³

¹Faculty of Electricity, Electronics and Material Technology,
University of Sciences, Hue University

²Hue Electricity Company

³Faculty of Electricity, University of Science and Technology, The University of Da Nang

*Email: hxvinh@husc.edu.vn

ABSTRACT

This study proposes an optimization algorithm for PID controller parameters in electro-hydraulic actuators (EHAs) using a genetic algorithm (GA). During operation, EHA systems often experience faults such as position sensor errors and actuator errors, leading to inaccurate and unreliable performance. When applying PID, Fuzzy-PID or hybrid PID controllers, selecting the parameters K_p , K_i , and K_d in nonlinear systems such as EHA system is difficult and time-consuming. Therefore, the genetic algorithm is employed to optimize appropriate K_p , K_i , and K_d values of the PID controller, ensuring stable, efficient and high-quality operation of the EHA. This algorithm is called the GA_PID algorithm. Simulation results comparing the PID controller show a significant improvement in output responses.

Keywords: EHA system; PID controller; Genetic Algorithm