

DESIGN OF PID CONTROLLER, FLC-SUGENO FOR FAN AND PLATE SYSTEM USING PSO OPTIMIZATION ALGORITHM

Nguyen Huu Cong^{1*}, Nguyen Tien Duy², Le Viet Duc¹

¹Thai Nguyen University, ² TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 03/10/2022	In this paper, we present the design of PID controllers and fuzzy controllers (Fuzzy Logic Controller - FLC) according to the Sugeno model (FLC) optimal based on the Particle Swarm Optimization algorithm (PSO). The controlling object is the Fan and Plate System (F&P). This is a strong non-linearity object. PID controller is originally designed by Ziegler-Nichols experimental method. The FLC controller is a manual design with membership functions evenly distributed over a defined domain of variables. Next, optimization PSO is used to optimize K_p , K_i , K_d coefficients of the PID controller and optimize the membership function of the FLC. Through simulation showed, the controller after optimizing for the quality of control increased significantly. In particular, the FLC controller produces better control results. Through research, the design of the FLC controller with the PSO optimization algorithm is an effective method.
Revised: 31/10/2022	
Published: 01/11/2022	
KEYWORDS	
PID Controller	
Sugeno Fuzzy Logic Controller	
Fuzzy Logic Controller	
Fan and Plate System	
PSO algorithm	

THIẾT KẾ CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ FLC-SUGENO TỐI ƯU CHO HỆ THỐNG QUẠT GIÓ - CÁNH PHẪNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN PSO

Nguyễn Hữu Công^{1*}, Nguyễn Tiến Duy², Lê Việt Đức¹

¹Đại học Thái Nguyên, ²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTT Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 03/10/2022	Trong bài báo này, chúng tôi trình bày việc thiết kế bộ điều khiển mờ (Fuzzy Logic Controller – FLC) tối ưu dựa trên thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO). Bộ điều khiển FLC được thiết kế với các hàm thuộc được phân bố đều và đối xứng trên miền xác định của các biến. Hệ luật điều khiển được xây dựng dựa trên mối quan hệ biến thiên đơn điệu tăng giữa biến đầu ra với các biến đầu vào, sử dụng thuật toán PSO để tối ưu hoá trọng số mỗi luật mờ của hệ luật. Để so sánh và đánh giá tính hiệu quả của phương pháp thiết kế được đề xuất, bộ điều khiển PID cũng được thiết kế tối ưu, trong đó các hệ số K_p , K_i , K_d và hệ số lọc (Filter coefficient, ký hiệu là KN) được tìm kiếm bằng thuật toán PSO. Đối tượng điều khiển là hệ thống quạt gió – cánh phẳng (Fan and Plate System - F&P). Đây là một đối tượng có tính phi tuyến mạnh và khó điều khiển. Kết quả mô phỏng cho thấy các bộ điều khiển sau khi tối ưu cho chất lượng điều khiển tăng lên đáng kể. Đặc biệt, bộ điều khiển FLC với trọng số luật tối ưu cho kết quả điều khiển là tốt hơn cả. Qua nghiên cứu thấy rằng, việc thiết kế bộ điều khiển FLC với thuật toán tối ưu PSO là một phương pháp rất hiệu quả.
Ngày hoàn thiện: 31/10/2022	
Ngày đăng: 01/11/2022	
TỪ KHÓA	
Bộ điều khiển PID	
Bộ điều khiển mờ	
Thuật toán PSO	
Quạt gió cánh phẳng	
Bộ điều khiển mờ Sugeno	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6580>

* Corresponding author. Email: conghn@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Các bộ điều khiển PI, PD, PID được sử dụng một cách rộng rãi trong công nghiệp đối với các đối tượng điều khiển tuyến tính vì tính đơn giản và hiệu quả của nó. Các bộ điều khiển này thường cho chất lượng điều khiển tốt, việc thiết kế và khả năng chỉnh định các hệ số là khá đơn giản, đặc biệt đối với các đối tượng ít phi tuyến. Khi đối tượng có tính phi tuyến mạnh, bộ điều khiển PID trở nên kém hiệu quả. Để giải quyết vấn đề này nhiều nhà nghiên cứu đề xuất sử dụng các phương pháp hiệu chỉnh thông số bộ điều khiển PID bằng cách kết hợp với bộ chỉnh định mờ [1] - [4], tuy nhiên cấu trúc hệ thống thường khá phức tạp. Bộ điều khiển mờ đã được nhiều nhà khoa học quan tâm và được ứng dụng khá rộng rãi. Nó có nhiều ưu điểm đó là mềm dẻo trong điều khiển bởi điều chỉnh luật điều khiển. Mô hình bộ điều khiển mờ theo mô hình kiểu Sugeno (hoặc Takagi, Sugeno – TS, giới thiệu vào năm 1985) [5]. Theo mô hình này, vế phải của các luật điều khiển được mô tả bởi các hàm, vì vậy cho phép mô tả động học hệ thống một cách mềm dẻo và sát với đối tượng. FLC-sugeno có ưu điểm thực hiện kết nhập đầu ra đơn giản, đáp ứng tốt với yêu cầu thời gian thực trong điều khiển. Tuy nhiên có một khó khăn khi thiết kế bộ điều khiển mờ là có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến mối quan hệ vào/ra của bộ điều khiển như dạng của hàm thuộc, lựa chọn các phép toán kết nhập, kéo theo, v.v. Sự lựa chọn này không có một quy tắc cụ thể mà phụ thuộc nhiều vào tri thức mang tính chuyên gia của người thiết kế. Một cách khác để giải quyết khó khăn này đó là sử dụng các thuật toán tối ưu. PSO là thuật toán tối ưu được nhiều nhà khoa học quan tâm và ứng dụng trong nhiều bài toán tối ưu khác nhau [6], [7]. Trong nghiên cứu này, thuật toán được PSO được sử dụng để tối ưu trọng số luật mờ của bộ điều khiển FLC và các hệ số của bộ điều khiển PID. Đối tượng điều khiển được lựa chọn là hệ thống F&P có tính phi tuyến mạnh [8]. Thông qua kết quả mô phỏng, so sánh chất lượng điều khiển của các bộ điều khiển tối ưu thấy rằng bộ điều khiển mờ tối ưu opFLC cho chất lượng điều khiển là tốt hơn so với các bộ điều khiển PID và FLC khi chưa tối ưu. Điều đó cho thấy hiệu quả của phương pháp thiết kế tối ưu bộ điều khiển FLC sử dụng thuật toán PSO.

2. Thiết kế các bộ điều khiển cho hệ quạt gió – cánh phẳng

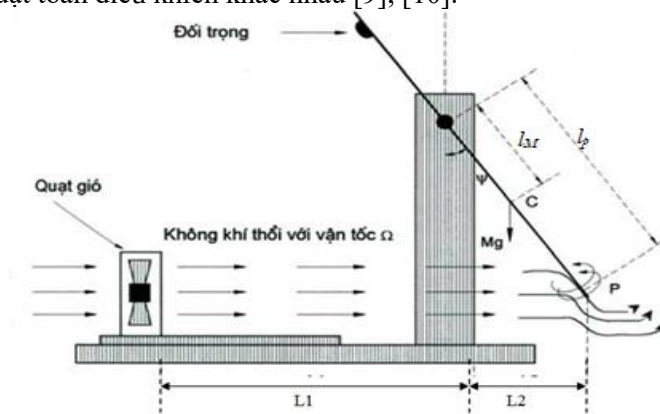
Trong phần này, nội dung trình bày về việc thiết kế các bộ điều khiển FLC và PID và tối ưu bằng thuật toán PSO.

2.1. Giới thiệu mô hình hệ Quạt gió – Cánh phẳng

Hệ thống quạt gió cánh phẳng (Fan and Plate System - F&P) là một mô hình hệ thống khí động học được sử dụng rất nhiều trong công nghiệp như van khí nén, thông gió và điều hòa không khí, v.v. [8]. Mô hình động học của hệ thống F&P có tính phi tuyến và chịu ảnh hưởng của nhiễu cao tác động, nhất là khi có sai lệch về giá trị đo. Vì thế nó được sử dụng nhiều trong phòng thí nghiệm để thử nghiệm các thuật toán điều khiển khác nhau [9], [10].



Hình 1. Mô hình thí nghiệm hệ quạt gió – cánh phẳng (F&P)



Hình 2. Sơ đồ hệ thống F&P

Mô hình thí nghiệm hệ thống F&P bao gồm tấm phẳng và quạt gió. Vị trí cánh phẳng được điều chỉnh bằng luồng không khí thổi từ quạt gió (Hình 1).

Ψ : Góc giữa cánh phẳng và trục thẳng đứng.

Mg : Trọng lượng của cánh phẳng (kể cả đối trọng).

C : Trọng tâm của hệ.

P : Áp suất tác động lên cánh phẳng.

Ω : Vận tốc luồng gió.

Sơ đồ hệ thống F&P (Hình 2) bao gồm ba phần chính: khối quạt gió, khối động học dòng khí và khối cánh phẳng.

Khối quạt gió được biểu diễn dưới dạng:

$$T_1 \frac{d\Omega(t)}{dt} + \Omega(t) = K_1 V(t) + D_1 \quad (1)$$

Trong đó: T_1 : Hằng số thời gian.

K_1 : Hệ số khuếch đại ở trạng thái xác lập.

D_1 : Hằng số điều kiện đầu.

Khối động học dòng khí: Diễn tả quan hệ giữa vận tốc dòng khí Ω và áp suất khí đập lên cánh phẳng. Khi Ω thay đổi, có hai yếu tố cần tính đến: Sự trễ chuyển động của cánh phẳng, dòng khí chuyển động xoáy bên dưới và xung quanh cánh phẳng. Ta coi khâu này gồm trễ dịch chuyển, một dạng phi tuyến căn bậc hai và động lực học phụ thuộc hướng.

Khối cánh phẳng: biểu thị quan hệ giữa Ψ và P . Xem cánh phẳng là con lắc vật lý. Mô hình động lực học cánh phẳng:

$$J \frac{d^2\Psi}{dt^2} = -Mgl_M \sin \Psi - b \frac{d\Psi}{dt} + PA l_p \cos \Psi \quad (2)$$

Trong đó: J : Quán tính quay của bản lề.

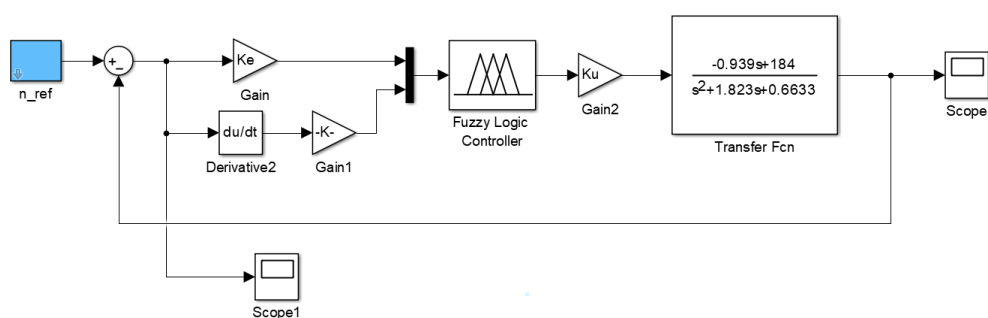
A : Diện tích hữu ích trên của cánh.

b : Hệ số suy giảm.

Có thể thấy mô hình toán của hệ F&P rất phức tạp với các thành phần động học khác nhau. Để thiết kế bộ điều khiển PID, cần thiết phải xác định mô hình xấp xỉ tuyến tính của đối tượng. Sử dụng công cụ System Identification Toolbox của Matlab, ta nhận được hàm truyền của hệ F&P như sau:

$$G(S) = \frac{-0.939S + 1.84}{S^2 + 1.823S + 0.6633} \quad (3)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển FLC



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng điều khiển hệ F&P dùng FLC

Bộ điều khiển FLC được thiết kế gồm 2 biến đầu vào là e , ce và biến điều khiển đầu ra là u (Hình 3). Miền biến thiên của các đầu vào/ra này đều được xác định trong miền chuẩn đối xứng là $[-1, 1]$. Khi “lắp” bộ điều khiển vào hệ thống, miền biến thiên thực sẽ được hiệu chỉnh về miền chuẩn đối xứng bằng các hệ số Ke , Kce và Ku . Giá trị của các hệ số này ban đầu được xác định

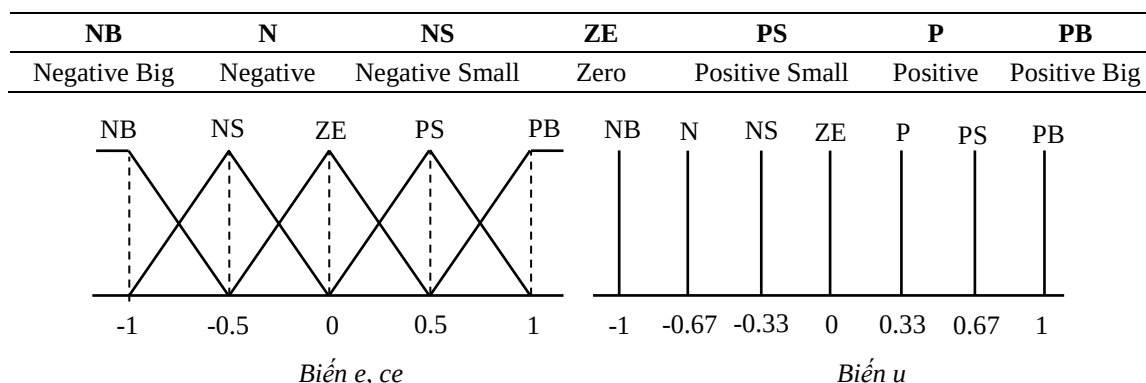
thông qua khảo sát miền biến thiên của chúng tương ứng trên hệ thống với bộ điều khiển PID, sau đó sẽ được hiệu chỉnh bằng PSO.

Các tập mờ với các nhãn ngôn ngữ như trên Bảng 1, được thiết kế đối xứng và phân bố đều trên miền xác định của các biến như trên Hình 4.

- 5 tập mờ dạng hình tam giác cho các biến vào e , ce gồm NB, NS, ZE, PS, PB. Các tập mờ được thiết kế là phân hoạch mờ mạnh, có nghĩa là với giá trị thực x bất kỳ, tổng độ thuộc của x vào các tập mờ là bằng 1.

- 7 tập mờ cho biến đầu ra u dạng singleton gồm NB, N, NS, ZE, PS, P, PB.

Bảng 1. Ký hiệu nhãn ngôn ngữ cho các tập mờ



Hình 4. Tập mờ cho các biến vào/ra của bộ điều khiển FLC

Hệ luật điều khiển được thiết kế như trong Bảng 2.

Bảng 2. Hệ luật điều khiển của FLC

$\begin{matrix} & ce \\ e \end{matrix}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB w_1	NB w_2	N w_3	NS w_4	ZE w_5
NS	NB w_4	N w_5	NS w_6	ZE w_7	PS w_8
ZE	N w_7	NS w_8	ZE w_9	PS w_8	P w_7
PS	NS w_8	ZE w_7	PS w_6	P w_5	PB w_4
PB	ZE w_5	PS w_4	P w_3	PB w_2	PB w_1

Trong Bảng 2, ta có 25 luật với w_i ($i=1, 9$) là trọng số của mỗi luật. Phát hiện ra rằng theo tính chất của hệ thống điều khiển này thì hệ luật có tính đối xứng qua tâm của bảng luật, vì vậy các luật ở vị trí đối xứng sẽ có trọng số bằng nhau. Cụ thể, các luật “if $e=NB$ and $ce=NB$ then $u=NB$ ” và luật “if $e=PB$ and $ce=PB$ then $u=PB$ ” có cùng trọng số là w_1 , luật “if $e=NB$ and $ce=NS$ then $u=NB$ ” và luật “if $e=PB$ and $ce=PS$ then $u=PB$ ” có cùng trọng số là w_2 , v.v. Với tính chất đối xứng đó giúp ta giảm được số biến cần tối ưu từ 25 xuống còn 9.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID kinh điển cho hệ F&P được mô tả bởi phương trình (4). Trong đó, $u(t)$ là tín hiệu đầu ra bộ điều khiển, $e(t)$ là sai lệch giữa góc đặt thực của cánh phẳng và lượng đặt. Bài toán đặt ra là cần phải tìm các hệ số K_P , K_I và K_D sao cho hệ thống nhanh đạt đến lượng đặt và ổn định theo thời gian.

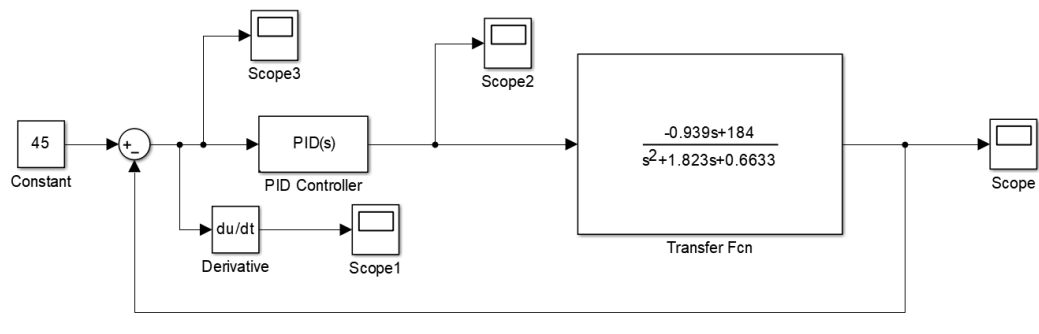
$$u(t) = K_P d(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

Có rất nhiều phương pháp để hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PID, phổ biến nhất là phương pháp Ziegler-Nichols (Z-N) [11]. Tuy nhiên đối với một số hệ thống việc hiệu chỉnh bộ

điều khiển PID bằng phương pháp này đòi hỏi một quá trình thực nghiệm khá mất thời gian do ảnh hưởng của nhiễu và sai số của các thiết bị lên tín hiệu đo dẫn đến việc hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PID khó đạt được giá trị như mong muốn.

Một cách khác để chỉnh định các hệ số K_P , K_I và K_D của bộ điều khiển đó là sử dụng các thuật toán tối ưu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng PSO để tối ưu các tham số của bộ điều khiển.

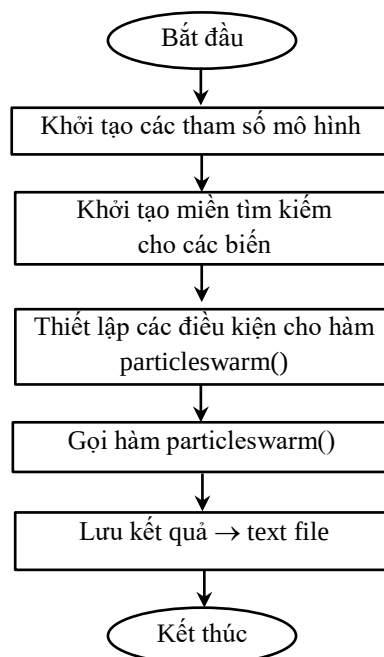
Hình 5 là sơ đồ mô phỏng của hệ F&P với bộ điều khiển PID trên Matlab simulink.



Hình 5. Sơ đồ mô phỏng điều khiển hệ F&P dùng bộ điều khiển PID

3. Tối ưu hoá các bộ điều khiển bằng PSO

3.1. Thuật toán PSO



Hình 6. Lưu đồ thực hiện tối ưu theo PSO

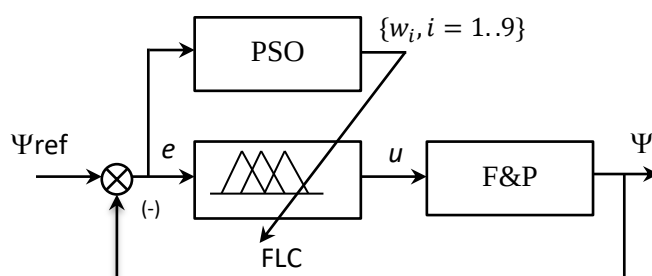
Thuật toán tối ưu PSO được Kennedy và Eberhart đề xuất năm 1995 [6], là thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên dựa trên việc mô phỏng hành vi và sự tương tác của bầy chim khi tìm nguồn thức ăn. Mỗi con chim (hay cá thể, phần tử) trong đàn (quần thể) được đặc trưng bởi hai thành phần là vector vị trí và vector vận tốc (dịch chuyển). Đồng thời mỗi cá thể có một giá trị thích nghi (fitness value), được đánh giá bằng hàm đo độ thích nghi (fitness function). Ban đầu PSO được khởi tạo với vector vị trí và vector vận tốc một cách ngẫu nhiên. Sau đó trong mỗi bước lặp của thuật toán vector vận tốc và vị trí của mỗi cá thể sẽ được cập nhật. Tại mỗi bước lặp, mỗi cá thể chịu ảnh hưởng bởi hai thông tin: vị trí tốt nhất mà nó đạt được cho tới thời điểm hiện tại và

vị trí tốt nhất trong tất cả quá trình tìm kiếm của các cá thể trong quần thể từ trước cho tới thời điểm hiện tại.

Trong Toolbox của Matlab, hàm `particleswarm()` đã được hỗ trợ cho tối ưu theo thuật toán PSO. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng hàm `particleswarm()` sẵn có và thực hiện theo các bước như trên lưu đồ Hình 6.

3.2. Tối ưu hoá trong số luật của bộ điều khiển FLC

Vì hệ luật có tính đối xứng và trọng số của các luật ở vị trí đối xứng có giá trị bằng nhau (xem Bảng 2) nên ta có 9 biến cần tối ưu $w_i, i=1..9$. Các trọng số này sẽ được tìm kiếm trong miền $[0, 1]$ bằng thuật toán tối ưu PSO. Sơ đồ tối ưu bộ FLC bằng PSO được thể hiện trên Hình 7.



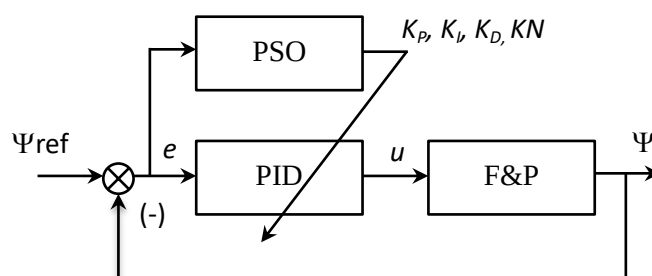
Hình 7. Sơ đồ tối ưu trọng số luật của bộ điều khiển FLC bằng PSO

$$fitness = \sum_{k=1}^n |e(k)| \rightarrow \min \quad (5)$$

Trong đó: $e(k)$ là mẫu dữ liệu sai lệch tại chu kỳ mô phỏng thứ k , n là tổng số mẫu dữ liệu của một lần chạy chương trình mô phỏng.

3.3. Tối ưu hoá bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID có 4 hệ số cần hiệu chỉnh là K_p , K_i , K_d và hệ số lọc KN . Các hệ số này là 4 thành phần của biến tối ưu thiết lập cho thuật toán PSO (Hình 8).



Hình 8. Sơ đồ tối ưu bộ điều khiển PID bằng PSO

4. Kết quả mô phỏng

Sau khi chạy tối ưu nhiều lần, ta nhận được các kết quả tối ưu như trên Bảng 3.

Bảng 3. Các biến tối ưu tìm được

PID	K_p		K_i		K_d		KN	
	0.032		0.012		0.014		4.437	
FLC	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8
	0.172	0.008	1	0.38	0.009	0.94	0.6	1
								w_9
								0.14

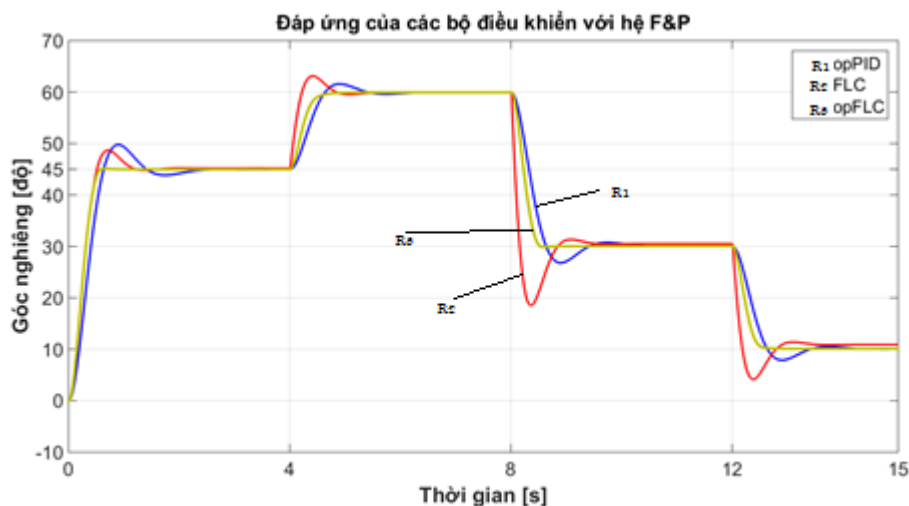
Hệ số hiệu chỉnh miền biến thiên tối ưu của các biến tìm được là $K_e = 0.0249965$, $K_{ce} = 0.00408416$ và $K_u = 10$.

Mô phỏng hệ thống với thời gian 15s và giá trị tham chiếu được thiết lập thay đổi như trong Bảng 4. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 9.

Bảng 4. Thiết lập giá trị tham chiếu cho mô phỏng

Thời gian [s]	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 15
Góc nghiêng [độ]	45	60	30	10

Trên Hình 9, đường opPID (R1) là đáp ứng của hệ F&P với bộ điều khiển PID có các hệ số tối ưu, các đường FLC (R2) và opFLC (R3) là đáp ứng tương ứng của hệ F&P tương ứng với các bộ điều khiển FLC có trọng số luật chưa tối ưu và đã tối ưu được tìm kiếm bằng PSO.



Hình 9. Đáp ứng của hệ F&P với các bộ điều khiển

Quan sát trên Hình 9, thấy rằng bộ điều khiển FLC với thiết kế ban đầu cho đáp ứng điều khiển có chất lượng kém. Tại thời điểm 0s, cho giá trị tham chiếu $\Psi_{ref} = 45^\circ$, đáp ứng của bộ điều khiển FLC là tốt hơn bộ điều khiển PID tối ưu cả về thời gian đáp ứng và độ vọt lố. Tuy nhiên, tại các thời điểm thay đổi giá trị tham chiếu còn lại thì đáp ứng với FLC là khá kém vì độ vọt lố lớn, mặc dù thời gian đáp ứng nhanh hơn. Khi bộ điều khiển FLC được tối ưu hoá các trọng số luật của hệ luật thì đáp ứng opFLC là tốt hơn hẳn opPID cả về thời gian đáp ứng, thời gian xác lập, lượng quá điều chỉnh. Khi giá trị tham chiếu là 45° , lượng quá điều chỉnh đối với opPID đạt giá trị 50° (trên 11%) trong khi đó, lượng quá điều chỉnh đối với opFLC là không đáng kể ($\approx 0\%$). Tương tự, khi thay đổi giá trị tham chiếu tại các thời điểm 4s, 8s và 12s thì opPID luôn có thời gian đáp ứng, thời gian xác lập và độ quá điều chỉnh lớn hơn so với opFLC.

5. Kết luận

Trong bài báo này, các bộ điều khiển PID kinh điển, FLC đã được thiết kế và tối ưu bằng thuật toán PSO. Đối tượng điều khiển là hệ thống F&P, là một mô hình động học có độ phi tuyến cao. Bộ điều khiển PID được tối ưu thông qua tìm kiếm các hệ số K_p , K_I , K_D và KN còn việc tối ưu bộ điều khiển FLC được thực hiện qua việc hiệu chỉnh trọng số mỗi luật của hệ luật điều khiển. Để hạn chế số lượng các biến tìm kiếm, trong nghiên cứu này có đưa thêm các ràng buộc về tính đối xứng của hệ luật. Sau quá trình chạy thuật toán tối ưu nhiều lần và mô phỏng kết quả với các bộ điều khiển trên Matlab simulink, các kết quả đã được so sánh đánh giá thông qua các chỉ tiêu về thời gian đáp ứng, thời gian xác lập và độ quá điều chỉnh. Kết quả chỉ ra rằng bộ điều khiển FLC có trọng số luật tối ưu cho chất lượng điều khiển là rất tốt. Kết quả mô phỏng đã cho thấy hiệu quả của phương pháp được đề xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. M. H. Baygi, A. Karsaz, and A. Elahi, "A hybrid optimal PID-Fuzzy control design for seismic excited structural system against earthquake: A salp swarm algorithm," in *6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS)*, 2018, pp. 220-225, doi: 10.1109/CFIS.2018.8336659.
- [2] C. Wu, J. Liu, X. Jing, H. Li, and L. Wu, "Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Networked Control Systems," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 8, pp. 2420-2430, Aug. 2017, doi: 10.1109/TSMC.2017.2678760.
- [3] L. Xing, C. Wen, Z. Liu, H. Su, and J. Cai, "Event-Triggered Adaptive Control for a Class of Uncertain Nonlinear Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 4, pp. 2071-2076, April 2017, doi: 10.1109/TAC.2016.2594204.
- [4] H. Moradi, H. Setayesh, and A. Alasty, "PID-Fuzzy control of air handling units in the presence of uncertainty," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 109, pp. 123-135, 2016.
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, Jan.-Feb. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [6] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, Perth, WA. Australia, 1995, pp.1942-1948.
- [7] I-H. Kuo *et al.*, "An improved method for forecasting enrolments based on fuzzy time series and particle swarm optimization," *Expert systems with applications*, vol. 36, pp. 6108-6117, 2009.
- [8] H. K. Chiang, R. W. Syu, and W. B. Lin, "The sliding mode controller design of a fan-plate system," in *Proceedings of the 5th intelligent living technology conference*, vol. 1, pp. 882-888, 2010.
- [9] A. Numsomran and V. Tipsuwanporn, "The design of robust PID control for Fan and Plate process," in *Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Control and Applications*, CA, 2007, pp. 273-277.
- [10] P. Kungwalrut, M. Thumma, V. Tipsuwanporn, A. Numsomran, and P. Boonsrimuang, "Design MRAC PID control for fan and plate process," in *SICE Annual Conference (SICE)*, 13-18 Sept. 2011, pp. 2944-2948.
- [11] J. B. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *ASME Transactions*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.