BỘ ĐIỀU KHIỂN PI MỜ: TỪ THIẾT KẾ ĐẾN ỨNG DỤNG

Nguyễn Chí Ngôn[1]

ABSTRACT

The article presents an online fuzzy tuning technique for a PI controller (proportional–integral controller) with wide enough tuning ranges around parameters obtained from Ziegler-Nichols tuning method. A hybrid control structure combining a PI controller and a fuzzy controller is established, where the PI controller plays a role of main controller to generate control signal and the fuzzy controller acts as a supervisor for real-time providing parameters of the PI controller. Experiments on Gunt-Hamburg RT010, RT020 and RT030 process control units indicate that the proposed controller is effective. System responses have suitable rising and settling times with negligible overshoots and zero steady-state errors. Besides, this controller also satisfies the requirements of real-time response and stability under condition of disturbances on the control system.

Keywords: PI controller, Fuzzy controller, Ziegler-Nichols, Process Control

Title: Fuzzy PI Controller: from Design to Application

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một phương pháp tinh chỉnh online thông số của bộ điều khiển PI (Proportional–Integral controller), với khoảng tinh chỉnh đủ rộng xung quanh giá trị đạt được từ phương pháp thực nghiệm Ziegler-Nichols, bằng kỹ thuật logic mờ. Cấu trúc điều khiển lai bao gồm một bộ điều khiển PI và một bộ điều khiển mờ được thiết lập. Trong đó, bộ điều khiển PI giữ vai trò là bộ điều khiển chính, tạo tín hiệu điều khiển đối tượng và bộ điều khiển mờ giữ vai trò là bộ quan sát, cung cấp thông số phù hợp cho bộ điều khiển PI theo thời gian thực. Kết quả thực nghiệm trên các thiết bị RT010, RT020 và RT030 của hãng Gunt-Hamburg cho thấy bộ điều khiển được đề xuất tỏ ra hiệu quả; đáp ứng của các thiết bị có thời gian tăng và thời gian xác lập hợp lý, vọt lố không đáng kể và sai số xác lập được triệt tiêu. Ngoài ra, bộ điều khiển còn đáp ứng được yêu cầu về thời gian thực và sự ổn định trước tác động của nhiễu vào hệ thống.

Từ khóa: Bộ điều khiển PI, Bộ điều khiển mờ, Ziegler-Nichols, Điều khiển quá trình

1 GIỚI THIỆU

Ngày nay bộ điều khiển tích phân tỉ lệ, gọi tắt là bộ điều khiển PI (Proportional–Integral controller) được ứng dụng rất phổ biến trong điều khiển các quá trình công nghiệp, do khả năng điều khiển hiệu quả, cấu trúc đơn giản và phạm vi ứng dụng rộng (Salami, M. and G. Cain, 1995; Kanagaraj, N., P. Sivashanmugam, and S. Param-sivam, 2008). Trong lý thuyết điều khiển, có rất nhiều phương pháp để hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PI, phổ biến nhất là phương pháp Ziegler-Nichols (Kwok, D.P. & P. Wang, 1992). Tuy nhiên, đối với một số hệ thống, việc hiệu chỉnh bộ điều khiển PI bằng phương pháp này đòi hỏi một quá trình thực nghiệm khá mất thời gian (Jones A.H. & P.B.M. Oliveira, 1995). Thông thường, các thông số của bộ điều khiển được xác lập bằng phương pháp Ziegler-Nichols dựa trên kết quả đo đạc được từ đáp ứng của hệ thống. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của nhiễu và sai số của phép đo, dẫn đến

[1] Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

việc hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PI khó đạt được giá trị tốt. Vì vậy, một quá trình tinh chỉnh được thực hiện trước khi áp dụng bộ điều khiển vào hệ thống (Kwok, D.P. & P. Wang, 1992).

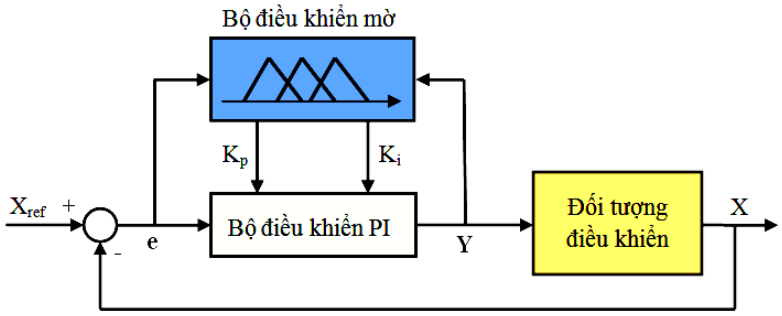
Về nguyên tắc, có hai kiểu tinh chỉnh bộ điều khiển PI đã được nghiên cứu và triển khai ứng dụng. Đó là, tinh chỉnh ngay trong quá trình hoạt động của hệ thống (gọi tắt là tinh chỉnh *online*) và tinh chỉnh trong lúc tắt hệ thống hoặc chỉ cho hệ thống vận hành một thời gian nhất định (gọi tắt là tinh chỉnh *off-line*). Trong đó, áp dụng giải thuật di truyền được xem là một phương pháp hiệu quả để tinh chỉnh *off-line* bộ điều khiển (Singh, R. & I. Sen, 2004; Salami *et al.,* 1995; Kwok *et al.,* 1992). Tuy nhiên, việc tìm kiếm trực tiếp các giá trị tối ưu của các thông số bộ điều khiển trong miền xác định của chúng đòi hỏi rất nhiều thời gian, cũng như có thể phải cần đến mô hình toán của đối tượng (Nguyễn Chí Ngôn, 2008; Mitsukura *et al.,* 1997). Trong khuynh hướng phát triển công nghiệp ngày nay, các quá trình thiết bị đòi hỏi việc tự động điều chỉnh một cách hiệu quả, trong phạm vị hoạt động rộng, cùng với việc thiết kế và thi công bộ điều khiển đơn giản. Tinh chỉnh *online* bộ điều khiển PI bằng các giải thuật thông minh được xem là một trong nhiều cách thức để đạt được yêu cầu này (Kanagaraj *et al.,* 2008). Trong số các kỹ thuật điều khiển thông minh, logic mờ nổi lên như là một phương pháp thể hiện khả năng suy diễn của bộ óc con người và nó đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực với vai trò của một bộ quan sát (Er, M.J. and Y.L. Sun, 2001). Cơ chế suy diễn mờ được xem là một phương pháp đơn giản và hữu hiệu để tinh chỉnh các bộ điều khiển kinh điển (Kanagaraj *et al.,* 2008).

Bài báo mô tả phương pháp tinh chỉnh *online* thông số của bộ điều khiển PI xung quanh giá trị kinh điển đạt được từ phương pháp Ziegler-Nichols, bằng kỹ thuật logic mờ. Thông số của bộ điều khiển PI được quyết định bởi bộ điều khiển mờ, dựa trên điều kiện hoạt động hiện tại của đối tượng. Ở đây, cấu trúc hệ thống bao gồm hai bộ điều khiển, còn được gọi là cấu trúc điều khiển lai. Bộ điều khiển PI giữ vai trò là bộ điều khiển chính, tạo tín hiệu điều khiển đối tượng và bộ điều khiển mờ giữ vai trò là bộ quan sát, cung cấp thông số phù hợp cho bộ điều khiển PI theo thời gian thực. Vì thế, để đơn giản hai bộ điều khiển này được gọi là bộ điều khiển PI mờ. Hiệu quả của bộ điều khiển PI mờ đã được kiểm chứng thông qua các thực nghiệm tại Phòng thí nghiệm Điều khiển Quá trình, thuộc Bộ môn Tự Động Hoá, Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ.

2 PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1 Phương tiện nghiên cứu

Bộ điều khiển PI mờ trong nghiên cứu này được xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink, phiên bản sinh viên 2009b và công cụ logic mờ (The Math-Works, Inc., 2009). Bộ điều khiển được kiểm nghiệm trên các thiết bị RT010, RT020 và RT030 của hãng Gunt-Hamburg, Đức (GUNT Gerätebau GmbH, 2004), sẽ được trình bày trong phần kết quả thực nghiệm, với cấu trúc điều khiển được thiết lập như hình 1. Trong đó, đối tượng điều khiển được lần lượt thực nghiệm trên các thiết bị RT0x0, với X là đáp ứng thực tế của đối tượng; X_{ref} là tín hiệu tham khảo; e là sai biệt giữa đáp ứng thực tế và tín hiệu tham khảo và Y là tín hiệu điều khiển được xác lập bởi bộ điều khiển PI mờ.



Hình 1: Mô hình tổng quát của hệ thống điều khiển

2.2 Bộ điều khiển PI

Bộ điều khiển PI được thực hiện bởi (Johnson M. A. & M. H. Moradi, 2005):

$$Y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt$$
$$e(t) = X_{ref}(t) - X(t) \quad (1)$$

trong đó, K_p và K_i lần lượt là độ lợi tỉ lệ và độ lợi tích phân của bộ điều khiển. Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PI, là chọn lựa bộ giá trị $\{K_p, K_i\}$ thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng điều khiển.

Các thông số độ lợi K_p và K_i ảnh hưởng đến thời gian tăng (rise time), độ vọt lố (overshoot) và thời gian xác lập (settling time) của đáp ứng được cho trong bảng 1 (Kanagaraj *et. al.,* 2008). Các thông tin này được xem là cơ sở tri thức để xác định luật chỉnh định mờ bộ điều khiển PI.

Bảng 1: Ảnh hưởng của việc tăng các thông số độ lợi của bộ điều khiển PI

Độ lợi	Thời gian tăng	Độ vọt lố	Thời gian xác lập	Sai số xác lập
K_p	Giảm	Tăng	Thay đổi ít	Giảm
K_i	Giảm	Tăng	Tăng	Triệt tiêu

2.3 Xác định thông số bộ điều khiển PI theo phương pháp Ziegler-Nichols

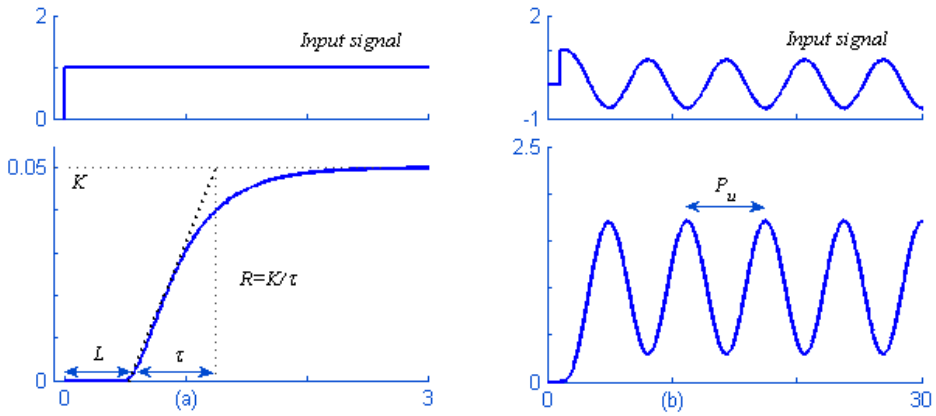
Ziegler và Nichols đã đề xuất hai phương pháp thực nghiệm dùng để xác định các thông số $\{K_p, K_i\}$ của bộ điều khiển PI (Åström, K.J. & T. Hägglund, 1988).

2.3.1 Phương pháp Ziegler-Nichols dựa trên đáp ứng vòng hở

Phương pháp này áp dụng cho các hệ ổn định vòng hở, với thủ tục như sau:

- Áp một hàm nấc đơn vị tại ngõ vào của hệ thống và xác định thời gian trễ L và độ dốc cực đại R của đường cong đáp ứng (Hình 2a);
- Thông số bộ điều khiển PI được xác định như (2):

$$K_{p_ZN} = \frac{0.9}{RL}; \qquad K_{i_ZN} = \frac{0.27}{RL^2} \quad (2)$$



Hình 2: Các thông số đo đạc từ phương pháp Ziegler-Nichols

2.3.2 Phương pháp Ziegler-Nichols dựa trên đáp ứng vòng kín

Một phương pháp khác để xác định bộ điều khiển PI có thủ tục như sau:

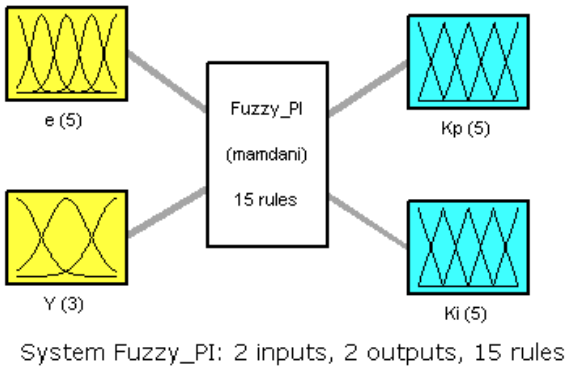
- Thiết lập vòng hồi tiếp âm đơn vị, với bộ điều khiển tỉ lệ có độ lợi K_p;
- Tăng độ lợi K_p đến giá trị K_u mà ở đó đáp ứng bắt đầu dao động và đo chu kỳ dao động P_u của đáp ứng (Hình 2b);
- Thông số bộ điều khiển PI được xác định như (3):

$$K_{p_ZN} = 0.5K_u; \qquad K_{i_ZN} = 0.54\frac{K_u}{P_u} \tag{3}$$

Các giá trị $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$ đạt được từ phương pháp Ziegler-Nichols cần được tinh chỉnh lại bằng thực nghiệm, mất khá nhiều thời gian, trước khí áp dụng (Jones A.H. & P.B.M. Oliveira, 1995). Mục tiêu của bài báo này nhằm hỗ trợ quá trình tinh chỉnh *online* các thông số trên bằng kỹ thuật logic mờ.

2.4 Tinh chỉnh mờ bộ điều khiển PI

Bộ điều khiển mờ được đưa vào cấu trúc điều khiển hình 1, nhằm mục tiêu cung cấp cặp giá trị $\{K_p, K_i\}$ cho bộ điều khiển PI, dựa theo điều kiện hiện tại của $\{e, Y\}$. Nghĩa là bộ điều khiển mờ sẽ có 2 ngõ vào và 2 ngõ ra, như hình 3.



Hình 3: Cấu trúc bộ điều khiển mờ

Ở cấu trúc hình 3, ngõ vào thứ nhất của bộ đều khiển mờ là *e,* được mờ hoá bởi 5 tập *{NB, NS, ZE, PS, PB}* và ngõ vào thứ hai là Y, được mờ hoá bởi 3 tập *{LOW, MED, HIG}* (Hình 4a và 4b). Các tập mờ ngõ vào được ký hiệu như sau: NB là Negative Big, NS là Negative Small, ZE là Zero, PS là Positive Small, PB là Positive Big, LOW là Low, MED là Medium và HIG là High. Hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ vào được sử dụng là hàm Gauss, xác định bởi (4):

$$\mu_{A^i}(x) = exp\left\{-\frac{(c_i - x)^2}{2\delta_i^2}\right\} \tag{4}$$

trong đó, c_i và δ_i hoành độ tâm và độ rộng của tập mờ A^i tương ứng.

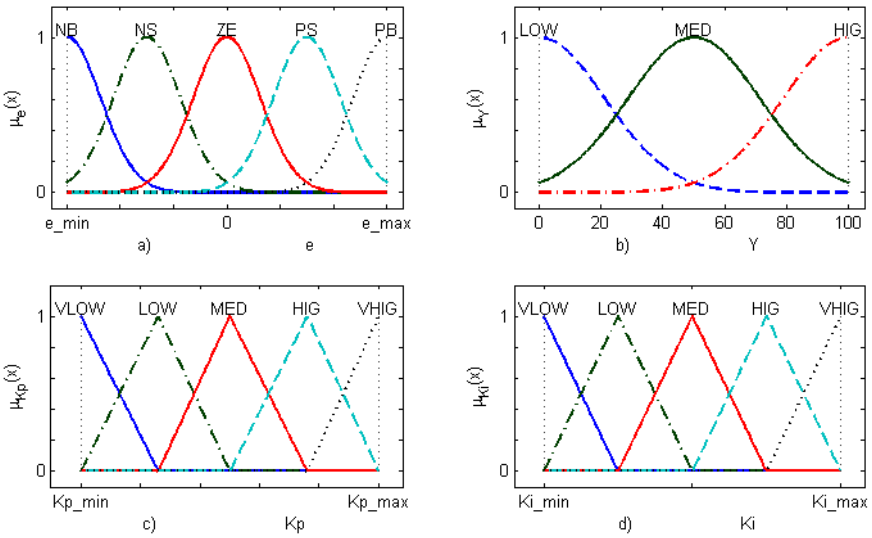
Miền xác định của các biến ngõ vào của bộ điều khiển mờ, được xác định tuỳ thuộc vào từng đối tượng cụ thể. Trong nghiên cứu này, các thực nghiệm dựa trên các hệ RT0x0 với *{e, Y}* xác định như (5), được xác lập tuỳ theo từng thiết bị:

$$\begin{aligned} &e \in [e_{min}, e_{max}] \\ &Y \in [0,100] \end{aligned} \tag{5}$$

Hai ngõ ra của bộ điều khiển mờ lần lượt là K_p và K_i, đều được mờ hoá bằng 5 tập *{VLOW, LOW, MED, HIG, VHIG}* (Hình 4c và 4d). Các tập mờ ngõ ra được ký hiệu như sau: VLOW là Very Low, LOW là Low, MED là Medium, HIG là High và VHIG là Very High. Hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ ra được sử dụng dạng tam giác, xác định bởi (6):

$$\mu_{A^i}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x < b \\ \dfrac{x-c}{b-c} & b \le x \le c \\ 0 & x > c \end{cases} \tag{6}$$

với a, b, c là hoành độ 3 đỉnh của tập mờ tam giác A^i tương ứng.



Hình 4: Hàm liên thuộc ngõ vào và ngõ ra của bộ điều khiển mờ

Miền xác định của các biến ngõ ra $\{K_p, K_i\}$ của bộ điều khiển mờ được xác định xung quanh giá trị $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$ đạt được từ phương pháp Ziegler-Nichols, cho bởi (7):

$$\begin{aligned} \alpha K_{p_ZN} \le K_p \le \beta K_{p_ZN} \\ \alpha K_{i_ZN} \le K_i \le \beta K_{i_ZN} \end{aligned} \quad (7)$$

trong đó, (α, β) là các hệ số được xác định tuỳ thuộc vào từng đối tượng điều khiển, và được chọn sao cho khoảng tinh chỉnh đủ rộng để tìm được giá trị tối ưu cho $\{K_p, K_i\}$ xung quanh giá trị $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$. Đối với các thiết bị RT0x0 dùng trong các thực nghiệm của nghiên cứu này, $\alpha=0.1$ và $\beta=5$ là thỏa mãn.

Từ cơ sở tri thức về bộ điều khiển PI ở bảng 1, luật điều khiển của bộ điều khiển mờ được thiết kế thông qua thực nghiệm và cho trên bảng 2. Nguyên tắc xây dựng bộ luật điều khiển được mô tả như sau: nếu thời gian tăng của đáp ứng lớn, tức đáp ứng của hệ thống chậm *(E=NB)*, thì $K_{p,i}$ được hiệu chỉnh tăng bởi *{HIG, VHIG} và ngược lại bởi {MED, LOW}*; nếu đáp ứng bị vọt lố *(E=PS, PB)* thì $K_{p,i}$ được giảm xuống bởi *{LOW, VLOW}*,… Một luật điều khiển cụ thể được phát biểu như (8), bộ luật điều khiển được áp dụng để tạo ra tín hiệu điều khiển tại mỗi thời điểm lấy mẫu, ở đây sử dụng thời gian lấy mẫu T_s=0.5 giây:

$$\textit{If}\ \ e = NS\ \ and\ \ Y = MED\ \ \textbf{\textit{Then}}\ \ K_p = MED\ \ and\ \ K_i = LOW \quad (8)$$

Cơ chế suy diễn mờ được chọn là MAX-MIN và giải mờ theo nguyên lý trung bình của phương pháp cực đại, xác định bởi (9):

$$\{K_p, K_i\} = \frac{\sum_{i=1}^{R} b_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i} \quad (9)$$

với $\{K_p, K_i\}$ là thông số bộ điều khiển PI sẽ đạt được; b_i và μ_i lần lượt là hoành độ điểm trung bình và giá trị của hàm liên thuộc ngõ ra xác định bởi luật thứ *i* trong R luật tác động tại thời điểm xem xét.

Bảng 2: Luật điều khiển

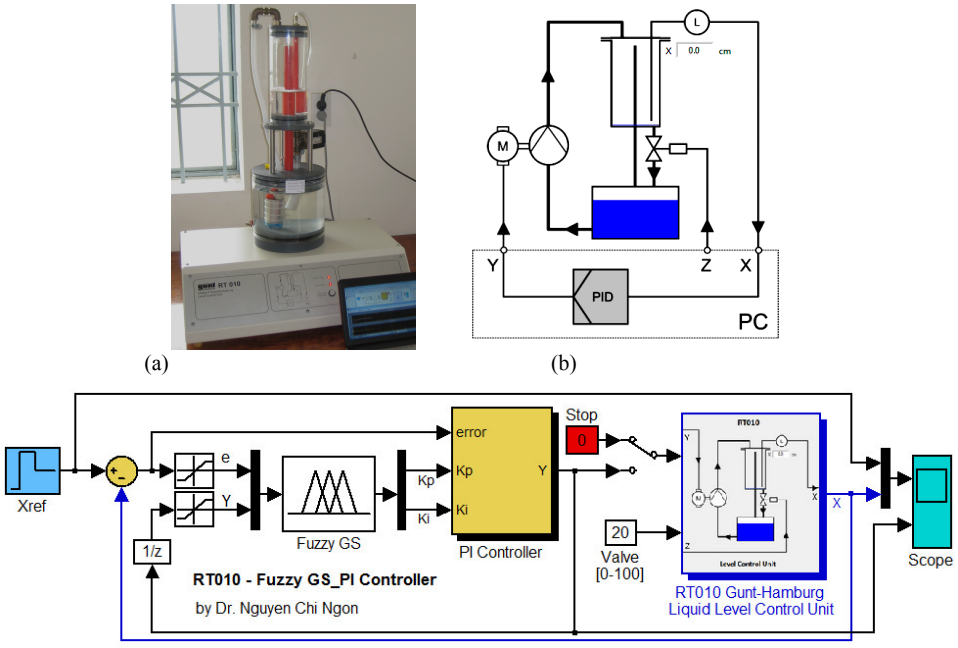
K_p/K_i		**Y**		
		LOW	**MED**	**HIG**
e	**NB**	VHIG/HIG	HIG/MED	MED/MED
	NS	HIG/MED	MED/LOW	LOW/VLOW
	ZE	MED/LOW	LOW/LOW	LOW/VLOW
	PS	MED/VLOW	MED/MED	HIG/HIG
	PB	MED/VLOW	HIG/VLOW	HIG/MED

3 KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

3.1 Thực nghiệm 1 - Điều khiển mực chất lỏng

Hệ điều khiển mực chất lỏng RT010 (RT010 Liquid Control Unit; Hình 5a, G.U.N.T Gerätebau GmbH, 2004) được áp dụng cho thực nghiệm thứ nhất. Hệ này gồm có các ngõ vào-ra như sau: X là chiều cao cột nước trong bồn kiểm soát (0-18cm, đối tượng điều khiển), Z là công suất valve xả tự do (0-100%), tượng trưng cho nhiễu của tác động vào hệ thống và Y là công suất máy bơm chất lỏng (0-100%, tín hiệu điều khiển) từ bồn chứa lên bồn kiểm soát, như hình 5b. Bộ điều khiển PI mờ được áp dụng cho hệ này được bố trí theo sơ đồ điều khiển hình 5c. Với giá trị mặc định $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$ của hệ RT010, miền xác định của các biến vào-ra ở (5) và (7) được thiết lập như sau:

$$e \in [-18,18]; Y \in [0,100]; K_p \in [1,50]; K_i \in [0.01,0.5]$$

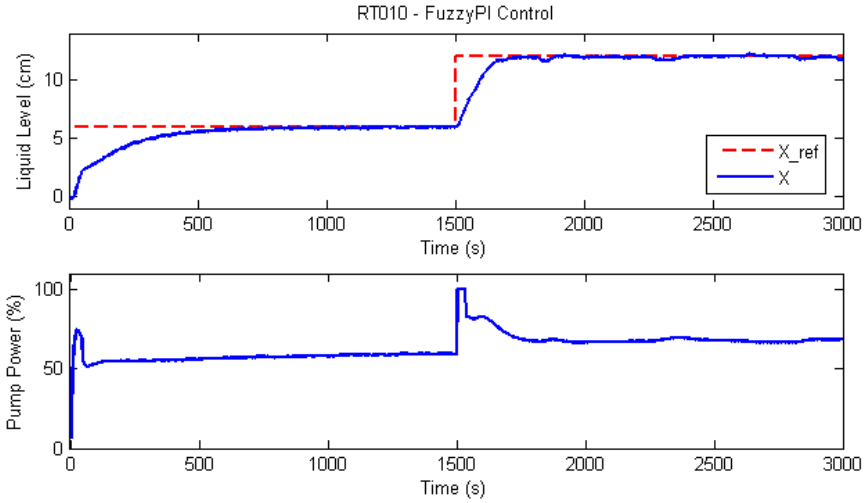


Hình 5: Điều khiển PI mờ hệ ổn định mực chất lỏng RT010

(a): Hệ điều khiển mực chất lỏng RT010, (b): Tín hiệu vào-ra hệ RT010, (c): Điều khiển PI mờ hệ RT010

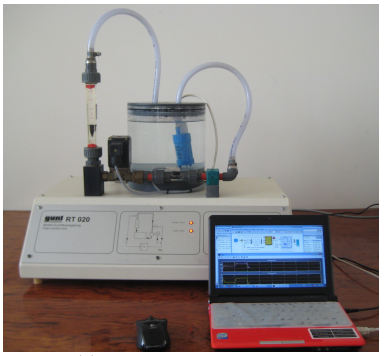
Với công suất valve xả Z (nhiễu tác động) được đặt ở 20%, kết quả điều khiển mực nước bằng bộ điều khiển PI mờ cho trên hình 6. Kết quả thực nghiệm cho thấy ngõ ra X của thiết bị RT010 bám rất tốt tín hiệu tham khảo X_ref với thời gian tăng và thời gian xác lập hợp lý, tương ứng là 180±10 giây và 270±20 giây; đáp ứng không xảy ra vọt lố, cũng như sai số xác lập.

Đối với hệ RT010, chiều cao mực chất lỏng được đo thông qua áp lực cột nước. Vì vậy, nếu chúng ta xả cạn hoàn toàn bồn kiểm soát thì tại thời điểm bộ điều khiển tác động sẽ có một thời gian trễ nhất định cho đến khi nước trong bồn đủ cao thì cảm biến áp lực mới tác động. Thời gian trễ này dễ làm cho người quan sát hiểu lầm là đáp ứng của bộ điều khiển chậm.

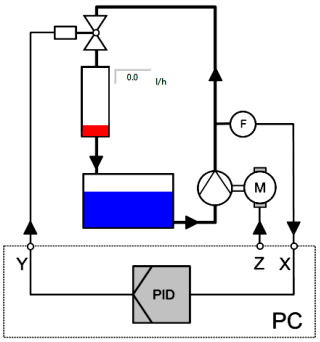


Hình 6: Kết quả điều khiển PI mờ hệ ổn định mực chất lỏng RT010

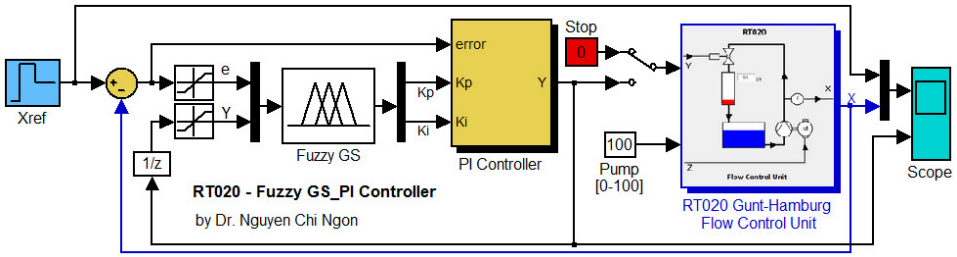
3.2 Thực nghiệm 2 - Điều khiển lưu lượng



(a)



(b)



(c)

Hình 7: Điều khiển PI mờ hệ ổn định lưu lượng RT020

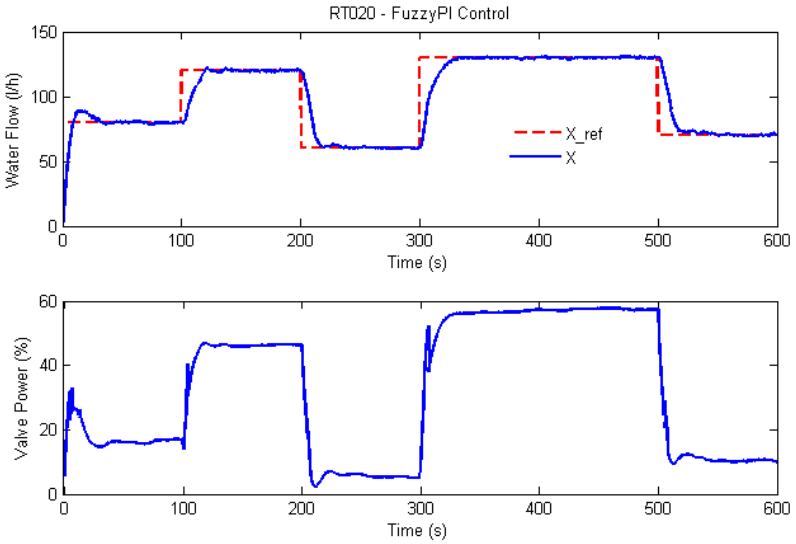
(a): Hệ điều khiển lưu lượng RT020, (b): Tín hiệu vào-ra hệ RT020, (c): Điều khiển PI mờ hệ RT020

Hệ điều khiển lưu lượng RT020 (RT020 Flow Control Unit; Hình 7a, G.U.N.T Gerätebau GmbH, 2004) được áp dụng cho thực nghiệm thứ hai. Hệ này gồm có các ngõ vào-ra như sau: X là lưu lượng nước thực tế trong ống kiểm soát (0-160 l/h, đối tượng điều khiển), Z là công suất máy bơm nước (0-100%) vào ống dẫn – công suất này có thể thay đổi tự do để giả lập nhiễu của tác động vào hệ

thống và Y là công suất valve điều tiết lưu lượng trong ống kiểm soát (0-100%, tín hiệu điều khiển), như hình 7b. Bộ điều khiển PI mờ được áp dụng cho hệ này được bố trí theo sơ đồ điều khiển hình 7c. Với giá trị mặc định $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$ của hệ RT020, miền xác định của các biến vào-ra ở (5) và (7) được thiết lập như sau:

$$e \in [-160,160]; Y \in [0,100]; K_p \in [0.02,1]; K_i \in [0.003,0.15]$$

Với công suất máy bơm Z (nhiễu tác động) được đặt thay đổi trong khoảng 80-100%, kết quả điều khiển lưu lượng nước bằng bộ điều khiển PI mờ đạt được trên hình 8. Thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển PI mờ hoạt động tốt trên thiết bị RT020. Ngõ ra *X* của hệ bám rất tốt tín hiệu tham khảo *X_ref* với thời gian tăng và thời gian xác lập hợp lý, tương ứng là 14±2 giây và 20±3 giây; đáp ứng có độ vọt lố không đáng kể và sai số xác lập được triệt tiêu.



Hình 8: Kết quả điều khiển PI mờ hệ ổn định lưu lượng RT020

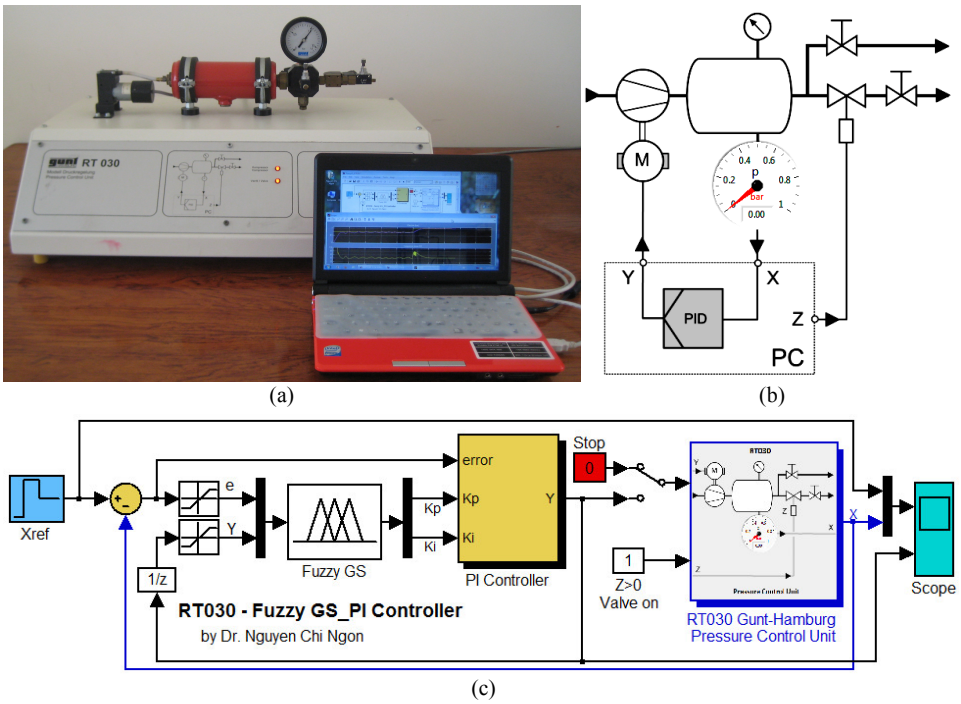
3.3 Thực nghiệm 3 - Điều khiển áp suất

Hệ điều khiển áp suất RT030 (RT030 Pressure Control Unit; hình 9a, G.U.N.T Gerätebau GmbH, 2004) được áp dụng cho thực nghiệm thứ ba. Hệ này gồm có các ngõ vào-ra như sau: X là áp suất không khí thực tế trong bình kiểm soát (0-1 bar, đối tượng điều khiển), Z valve xả không khí tự do (điều chỉnh được bằng tay), tượng trưng cho nhiễu của tác động vào hệ thống và Y là công suất máy nén không khí vào bình kiểm soát (0-100%, tín hiệu điều khiển), như hình 9b. Bộ điều khiển PI mờ được áp dụng cho hệ này được bố trí theo sơ đồ hình 9c. Với giá trị mặc định $\{K_{p_ZN}, K_{i_ZN}\}$ của hệ RT030, miền xác định của các biến vào ra ở (5) và (7) được thiết lập như sau:

$$e \in [-1,1]; Y \in [0,100]; K_p \in [6,300]; K_i \in [0.1,5]$$

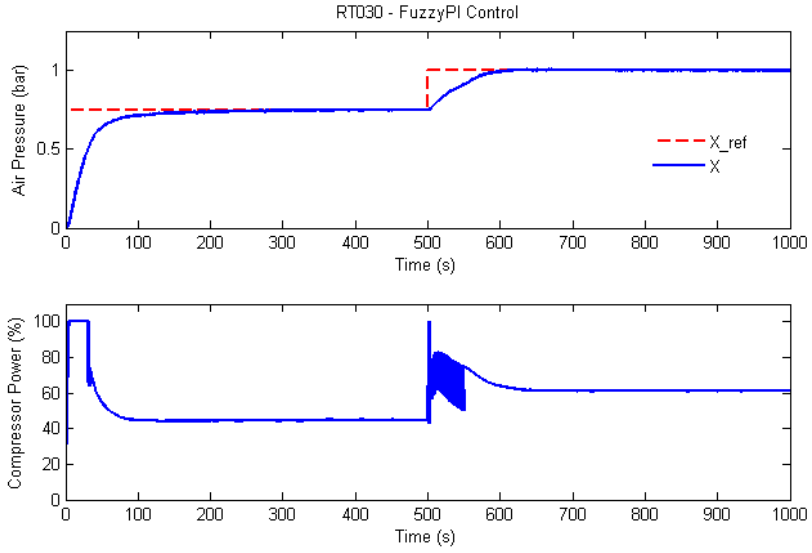
Với công suất valve xả Z (nhiễu tác động) được điều chỉnh ở khoảng 10-20%, kết quả điều khiển áp suất không khí bằng bộ điều khiển PI mờ cho trên hình 10. Thực

nghiệm cho thấy bộ điều khiển PI mờ hoạt động tốt trên thiết bị RT030. Ngõ ra *X* của hệ bám rất tốt tín hiệu tham khảo *X_ref* với thời gian tăng và thời gian xác lập phù hợp, tương ứng là 98±2 giây 150±5 giây; đáp ứng không xuất hiện vọt lố cũng như sai số xác lập.



Hình 9: Điều khiển PI mờ hệ ổn định áp suất RT030

(a): Hệ điều khiển áp suất RT030, (b): Tín hiệu vào-ra hệ RT030, (c): Điều khiển PI mờ hệ RT030



Hình 10: Kết quả điều khiển PI mờ hệ ổn định áp suất RT030

4 KẾT LUẬN

Bài báo mô tả phương pháp tự động tinh chỉnh *online* thông số của bộ điều khiển PI bằng logic mờ. Ưu điểm của phương pháp này là thiết kế và thực hiện bộ quan sát mờ rất đơn giản mà không cần quan tâm đến cấu trúc bên trong của đối tượng điều khiển. Khoảng tinh chỉnh các thông số của bộ điều khiển PI được thiết lập đủ rộng xung quanh giá trị đạt được từ phương pháp thực nghiệm Ziegler-Nichols. Kết quả kiểm nghiệm trên các thiết bị RT010, RT020 và RT030 của hãng Gunt-Hamburg, CHLB Đức cho thấy bộ điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu này tỏ ra hiệu quả; đáp ứng của các thiết bị có thời gian tăng và thời gian xác lập phù hợp, độ vọt lố không đáng kể và sai số xác lập được triệt tiêu. Ngoài ra, bộ điều khiển còn đáp ứng được yêu cầu về thời gian thực, cũng như sự ổn định trước tác động của nhiễu vào hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Åström, K.J. and T. Hägglund, 1988. Automatic Tuning of PID Controllers. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC.

Er, M.J. and Y.L. Sun, 2001. Hybird fuzzy proportional-intergral plus conventional derivative control of linear and nonlinear systems. *IEEE Transacions on Industrial Electronics,* vol. 48, no. 6, pp. 1109-1117.

Johnson M.A. and M.H. Moradi, 2005. Chapter 8, in: PID Control - New Identification and Design Methods, pp. 297-337. Springer-Verlag London Limited. ISBN-10: 1-85233-702-8.

Jones A.H. and P.B.M. Oliveira, 1995. Genetic Auto-tuning of PID Controllers. IEEE Conf. Publ. No. 414, 12-14 Sep 1995, pp. 141-145.

G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 2004. *Experiment Instructions - RT 010 - RT 060 Principles of Control Engineering*. Barsbüttel Germany, Publication-no.: 918.000 00 A 0X0 02 (A).

Kanagaraj, N., P. Sivashanmugam, and S.Paramsivam, 2008. Fuzzy coordinated PI controller: application to the real-time pressure control process. *Journal Advances in Fuzzy Systems,* Vol.8, pp.1-9.

Kwok, D.P. and P. Wang, 1992. Fine-tuning of classical PID Controllers based on Genetic Algorithms. IEEE Inter. Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 37-43.

Mitsukura Y., T. Yamamoto and M. Kaneda.1997. A Genetic Tuning Algorithm of PID Parameters, Proc. IEEE Confer. Syst, Man and Cyber., Orlando, Oct. 1997, pp. 923-928.

Nguyễn Chí Ngôn, 2008. Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền. *Tạp chí Khoa học Đại Học Cần Thơ,* số 2008:9, trang 241-248.

Salami, M. and G. Cain, 1995. An adaptive PID controller based on genetic algorithm processor. IEEE Conf. Publ. No. 414, 12-14 Sep 1995, pp. 88-93.

Singh, R. and I. Sen, 2004. Tuning of PID Controller Based AGC System Using Genetic Algorithms. TENCON 2004. IEEE Region 10th Confer., pp. 531-534.

The MathWorks, Inc., 2009. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, Ver. 2.2.10.