

ĐIỀU KHIỂN PID MỘT NƠ-RON HỒI QUY LƯU LƯỢNG CHẤT LỎNG RECURRENT SINGLE NEURAL PID CONTROL FOR LIQUID FLOW REGULATION

TRẦN HIẾU TRINH¹, NGUYỄN XUÂN VINH¹,
PHẠM THANH TÙNG^{1a}, NGUYỄN CHÍ NGÔN²

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

²Trường Đại học Cần Thơ

^aTác giả liên hệ: tungpt@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 03/4/2023; Phản biện (Reviewed): 14/4/2023; Chấp nhận đăng (Accepted): 13/5/2023

TÓM TẮT

Nghiên cứu này kiểm nghiệm bộ điều khiển PID một nơ-ron hồi quy trên thiết bị ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 của hãng Gunt-Hamburg. Bộ điều khiển PID số được tổ chức dưới dạng một nơ-ron tuyến tính hồi quy. Các trọng số kết nối của nơ-ron tương ứng với ba thông số K_p , K_d và K_i của bộ PID, có thể huấn luyện trực tuyến trong quá trình điều khiển. Giải thuật huấn luyện này cho phép tự điều chỉnh thông số của bộ điều khiển theo sự biến đổi của đối tượng, dựa theo thông tin về độ nhạy của đối tượng, gọi là thông tin Jacobian. Một mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF cũng được huấn luyện trực tuyến để nhận dạng không tham số mô hình đối tượng, nhằm xác định thông tin Jacobian này. Kết quả thực nghiệm trên thiết bị RT020 và so sánh với bộ PID do nhà sản xuất cung cấp, cho thấy bộ điều khiển PID một nơ-ron hồi quy có khả năng tự chỉnh trong quá trình điều khiển; đáp ứng quá độ của đối tượng được cải thiện với thời gian xác lập được rút ngắn, độ vọt lố thấp và sai số xác lập được triệt tiêu.

Từ khóa: Bộ điều khiển PID số, ổn định lưu lượng, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm, Jacobian

ABSTRACT

This study aims to experiment a recurrent single neural PID controller on RT020 liquid flow control system of the Gunt-Hamburg. The digital PID controller is organized as a recurrent single neuron. The weights of neuron correspond to three parameters K_p , K_d and K_i of the PID and can be trained online during the control process. This training algorithm allows the self-adjustment of the parameters of the PID according to the change of conditions, and based on the controlled plant's sensitivity, this is so called Jacobian information. A radial basis function (RBF) neural network is also trained online for non-parametric model identification, in order to estimate the Jacobian information. Experimental results on the RT020 device and in comparison with the PID controller provided by the manufacturer show that the recurrent single neural PID controller can be self-tuning during the control process; the transient response is improved with reducing setting time, low overshoot and eliminated steady-state error.

Keywords: digital PID controller, flow control, radial basis function neural network, Jacobian

1. Giới thiệu

Mặc dù được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, nhưng bộ điều khiển PID [1] với các thông số cài đặt cố định khó thích ứng với sự biến đổi đặc tính động của đối tượng [2]. Việc tự chỉnh định thông số của bộ PID thích nghi được nhiều nhà khoa học quan tâm. Thông thường, để thích nghi các thông số bộ điều khiển, một bộ quan sát cần được thiết lập dựa trên mô hình toán của đối tượng. Điều này trong thực tế không phải lúc nào cũng đạt được. Vì vậy, nhiều nghiên cứu chọn giải pháp nhận dạng mô hình không tham số của đối tượng, thay vì phải xây dựng mô hình toán của nó. Trong [2, 3], các tác giả sử dụng mạng nơ-ron mờ hồi quy (recurrent fuzzy neural network) để nhận dạng mô hình của đối tượng, nhằm cung cấp thông tin Jacobian cho giải thuật cập nhật trực tuyến (online) trọng số kết nối của bộ điều khiển PID thích nghi. Trong các nghiên cứu [4, 5], các tác giả đã áp dụng thành công giải thuật huấn luyện trực tuyến bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo. Tuy nhiên, với giải thuật gradient descent, việc huấn luyện trực tuyến bộ nhận dạng đòi hỏi thời gian để giải thuật hội tụ. Điều này ảnh hưởng đến thời gian quá độ của hệ thống, cụ thể là làm kéo dài thời gian xác lập của đáp ứng. Để đơn giản hóa cấu trúc mạng, nhằm cải thiện tốc độ hội tụ của giải thuật huấn luyện bộ nhận dạng, trong [6-8], các tác giả sử dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF - radial basis function) thay vì sử dụng mạng nơ-ron mờ hồi quy. Các nghiên cứu gần đây đã phát triển thành công bộ điều khiển PID thích nghi một nơ-ron có khả năng huấn luyện trực tuyến, với bộ nhận dạng thông tin Jacobian bằng mạng nơ-ron RBF [9-12]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào việc phát triển giải thuật và minh họa kết quả thông qua mô phỏng trên máy tính. Các nghiên cứu

[13-16] đã tổng hợp và hoàn thiện về mặt lý thuyết kỹ thuật xây dựng bộ điều khiển PID dùng mạng nơ-ron. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở mức độ mô phỏng. Ở nghiên cứu [13], bộ điều khiển PID nơ-ron được thực nghiệm trên mô hình con lắc ngược quay, nhưng kết quả cho thấy thời gian hội tụ của các thông số của bộ PID cần đến 25 giây mới đạt giá trị cần thiết. Trong [17, 18], bộ PID một nơ-ron được áp dụng trên hệ ổn định áp suất với thời gian hội tụ của các thông số của bộ điều khiển nhanh hơn. Tuy nhiên, đáp ứng tổng thể của hệ ổn định áp suất còn chậm, cần khoảng 10 giây mới xác lập được.

Đối với hệ điều khiển ổn định lưu lượng chất lỏng vốn được ứng dụng nhiều trong công nghiệp dược phẩm, giải khát hiện nay, ở nghiên cứu [19], tác giả dùng bộ điều khiển tích phân tỷ lệ mờ (Fuzzy PI) để kiểm soát thiết bị RT020. Ở nghiên cứu [20], các tác giả đã thực hiện điều khiển thực nghiệm hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020. Tuy nhiên, bộ điều khiển giám sát của nghiên cứu này dựa trên kỹ thuật điều khiển trượt thích nghi, vốn chậm và tiềm ẩn nguy cơ dao động ở tín hiệu điều khiển, gây nóng bộ chuyển mạch công suất điều khiển.

Nghiên cứu này nhằm phát triển bộ điều khiển PID một nơ-ron theo cấu trúc hồi quy kết hợp với kỹ thuật nhận dạng mô hình đối tượng dùng mạng nơ-ron RBF cho đối tượng chưa xác định được tham số.

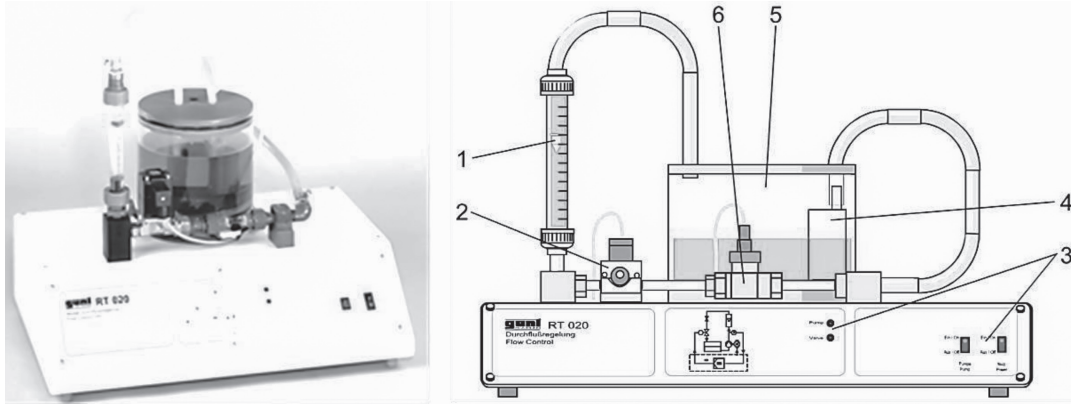
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng điều khiển

Cấu trúc của hệ ổn định lưu lượng RT020 được trình bày trên Hình 1. Chất lỏng trong bồn chứa (5) được bơm vào mạng điều tiết bằng máy bơm (4). Lưu lượng chất lỏng ở trong mạng có thể tăng hay giảm được bằng valve tiết lưu (2) hoặc thay đổi công suất

máy bơm (4). Tình trạng hoạt động và các công tắc điều khiển được bố trí trên bảng (3). Lưu lượng chất lỏng trong mạng được đo bởi cảm biến (6), đồng thời biểu kiến bởi lưu lượng kế kiểu phao (1). Nhiệm vụ

của bộ điều khiển là kiểm soát công suất của valve tiết lưu (2) để lưu lượng chất lỏng trong mạng được duy trì ở trạng thái ổn định mà người vận hành đặt trước, bù trừ được với biến đổi của tốc độ bơm.



1: lưu lượng kế kiểu phao, 2: valve tiết lưu, 3: bảng hiển thị và điều khiển, 4: bơm, 5: bồn chứa, 6: cảm biến lưu lượng

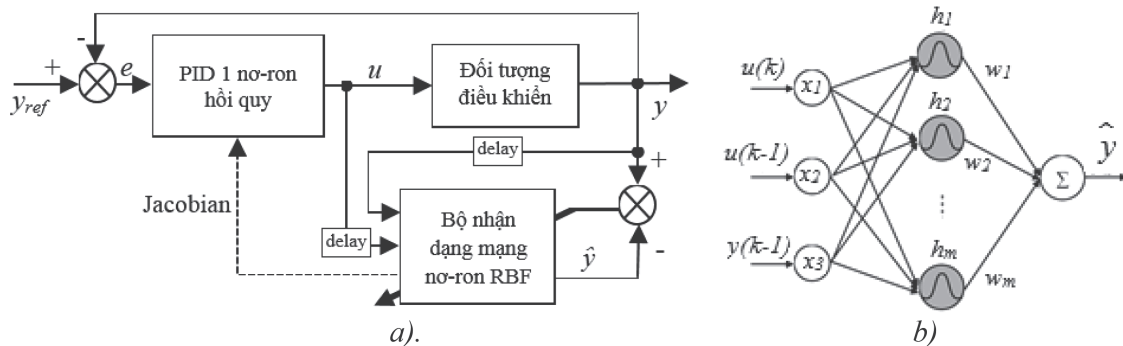
Hình 1. Cấu trúc hệ ổn định lưu lượng RT020

RT020 là một hệ điều khiển MISO có 2 ngõ vào và 1 ngõ ra. Trong đó, ngõ vào Y là công suất valve tiết lưu, có giá trị nằm trong $[0, 100\%]$; Z là công suất máy bơm, có giá trị nằm trong $[0, 100\%]$; X là lưu lượng chất lỏng, có giá trị nằm trong $[0, 200 \text{ l/h}]$.

2.2. Nguyên lý điều khiển

Cấu trúc bộ điều khiển PID một nơ-

ron hồi quy dựa trên bộ nhận dạng mạng nơ-ron RBF được thiết kế như Hình 2a, phát triển dựa theo các nghiên cứu [7, 9, 11-12, 14-16]. Trong đó, mạng nơ-ron RBF dùng để ước lượng được thông tin Jacobian của đối tượng, làm cơ sở để cập nhật trực tuyến bộ điều khiển PID một nơ-ron hồi quy.



Hình 2. a) Cấu trúc điều khiển; b) Bộ nhận dạng mạng nơ-ron RBF

2.3. Bộ nhận dạng đối tượng điều khiển

Bộ nhận dạng dùng mạng nơ-ron RBF với cấu trúc [3-6-1], được xây dựng như Hình 2b [6, 12, 15]. Vector xuyên tâm RBF thông

qua hàm Gauss được xác định bởi [4-7]:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (1)$$

với $x=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ là vector ngõ vào; $c_j=[c_1, c_2, \dots, c_m]$ và $b_j=[b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ lần lượt là các là vector tâm và độ rộng của các hàm Gaussian.

Gọi vector trọng số của mạng là $w_j=[w_1, w_2, \dots, w_m]^T$, thì ngõ ra y_m của mạng được viết:

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m = \sum_{j=1}^m w_j^T h_j \quad (2)$$

Hiệu suất huấn luyện được đánh giá thông qua hàm chi phí (cost function) sau:

$$Err = \frac{1}{2} (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (3)$$

Giải thuật cập nhật w_j , c_j và b_j có thể xem chi tiết tại [4-6]. Thông tin Jacobian (độ nhạy của đầu ra thiết bị với đầu vào được điều khiển) được xác định như sau [7, 9-11]:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{ji} - u(k)}{b_j^2} \quad (4)$$

2.3 Bộ điều khiển PID một nơ-ron hồi quy

Bộ điều khiển PID rời rạc được xác định bởi [7-16]:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \\ = u(k-1) + K_p e(k) + K_d ce(k) + K_i ie(k) \quad (5)$$

trong đó, $e(k)=r(k)-y(k)$ là sai biệt giữa tín hiệu tham chiếu $r(k)$ và đáp ứng $y(k)$ và $ce(k)$, $ie(k)$ đạo hàm và tích phân tương ứng của $e(k)$.

Nghiên cứu này đề xuất tín hiệu điều khiển có dạng:

$$u(k) = w_1 u(k-1) + w_2 e(k) + w_3 ce(k) + w_4 ie(k) \quad (6)$$

với $w=[w_1, w_2, w_3, w_4]$ là bộ trọng số của một cấu trúc nơ-ron 4 ngõ vào như Hình 3.

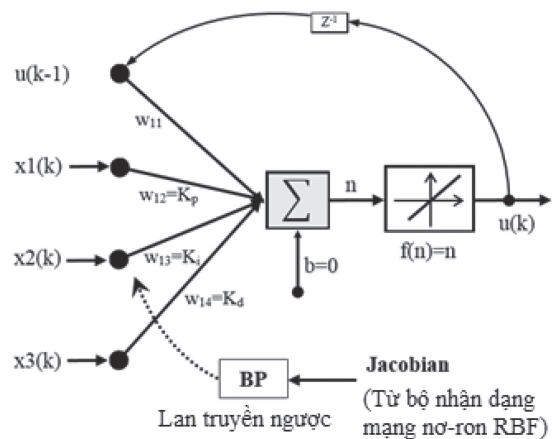
Bốn ngõ vào $[u(k-1) \ x_1(k) \ x_2(k) \ x_3(k)]^T$

tương ứng của nơ-ron PID hồi quy Hình 3, với thành phần đạo hàm $ce(k)$ và tích phân $ie(k)$ của $e(k)$ được xác định theo [11]:

$$\begin{bmatrix} x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(k) - e(k-1) \\ e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bộ trọng số của nơ-ron PID gồm:

$$w = [w_{11} \ w_{12} \ w_{13} \ w_{14}]^T \\ = [w_{11} \ K_p \ K_d \ K_i]^T \quad (8)$$



Hình 3. Cấu trúc bộ điều khiển PID một nơ-ron hồi quy

Vì vậy ngõ ra điều khiển như sau:

$$u(k) = w_{11} u(k-1) + w_{12} x_1(k) + w_{13} x_2(k) + w_{14} x_3(k) \\ = w_{11} u(k-1) + K_p x_1(k) + K_d x_2(k) + K_i x_3(k) \\ = w^T \cdot x \quad (9)$$

Để huấn luyện trực tuyến nơ-ron PID này, ta định nghĩa hàm mục tiêu là trung bình của bình phương sai số:

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (10)$$

Bộ trọng số của nơ-ron PID được cập nhật trực tuyến theo giải thuật Hebb [7-8, 11, 14-16], với $\partial y/\partial u$ là thông tin Jacobian của đối tượng điều khiển. Thông tin về mức độ biến thiên của đáp ứng đối với sự thay đổi của tín hiệu điều khiển, hay độ nhạy của đáp ứng, gọi là thông tin Jacobian được ước lượng bởi (4).

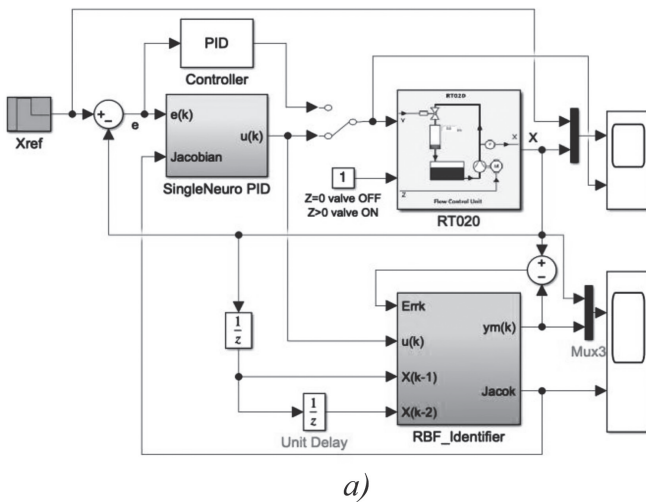
$$w_{11}(k) = w_{11}(k) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} u(k-1) \quad (11)$$

$$w_{12}(k) = w_{12}(k) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_1(k) \quad (12)$$

$$w_{13}(k) = w_{13}(k) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_3(k) \quad (13)$$

2.4. Kết quả thực nghiệm

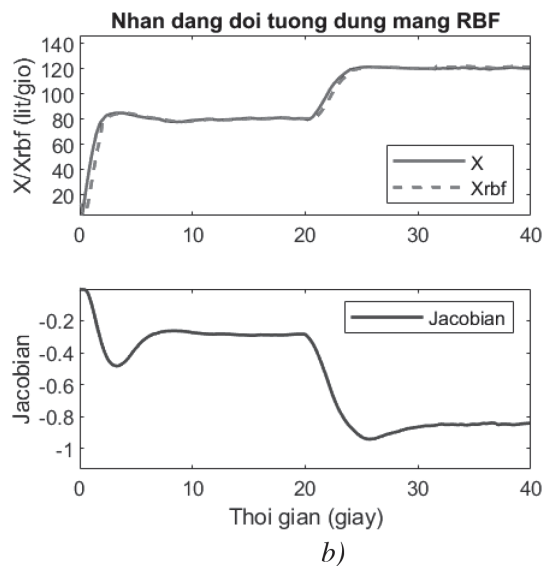
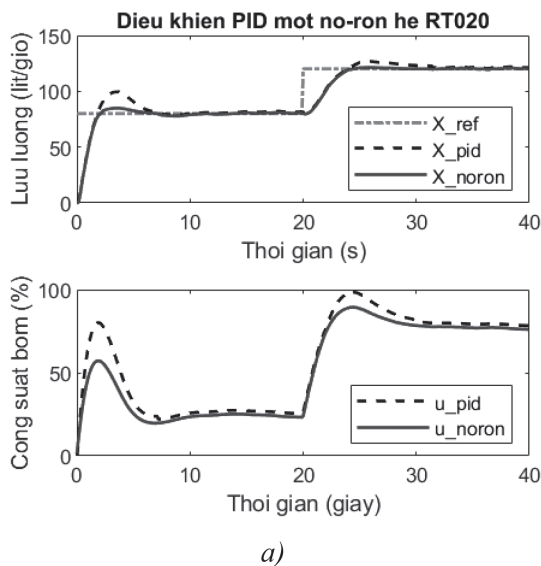
Hệ thống thực nghiệm thiết lập như Hình 4, có so sánh với bộ điều khiển PI ($K_p = 0.01$ và $K_i = 0.5$) được hãng Gunt-Hamburg cung cấp và kế thừa công cụ giao tiếp giữa MATLAB và thiết bị được nghiên cứu [19] xây dựng sẵn.



Hình 4. a) Sơ đồ thực nghiệm, b) Bố trí thực nghiệm

Đáp ứng lưu lượng tương ứng của hai kiểu điều khiển thể hiện trên Hình 5a. Kết quả cho thấy bộ điều khiển PID của [21] cho độ vọt lố cao (~30%), nhưng khi kết hợp nó với bộ điều khiển PID một nơ-ron

thì độ vọt lố đã giảm đáng kể, với thời gian xác lập khoảng 5 - 6 giây, phù hợp thực tiễn. Trong khi bộ điều khiển PID ở 20 giây thực nghiệm sau cho thời gian xác lập khoảng 12 giây.



Hình 5. a) So sánh đáp ứng lưu lượng, b) Kết quả ước lượng thông tin Jacobian

Hình 5b trình bày kết quả nhận dạng ngõ ra lưu lượng chất lỏng của hệ RT020 và thông tin Jacobian tương ứng. Kết quả thực nghiệm cho thấy mạng RBF đã cho tín hiệu nhận dạng lưu lượng nước gần như trùng với ngõ ra thực tế của hệ RT020. Trên thực tế, việc nhận dạng ngõ ra của đối tượng không sử dụng trực tiếp cho hoạt động điều khiển mà nó dùng để xác định thông tin Jacobian, cung cấp cho giải thuật cập nhật các tham số của bộ điều khiển.

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất một bộ điều khiển thông minh, mà ở đó đối tượng điều khiển được nhận dạng trực tuyến bởi mạng nơ-ron RBF. Các tham số của bộ điều khiển PID được tổ chức dưới dạng bộ

trọng số của một nơ-ron hồi quy tuyến tính bốn ngõ vào và được điều chỉnh thích nghi trong quá trình điều khiển. Giải thuật huấn luyện bộ PID một nơ-ron hồi quy cho phép tự chỉnh định tham số của điều khiển, thích ứng theo sự biến đổi của tối tượng thông qua thông tin Jacobian mà bộ nhận dạng cung cấp. Kiểm nghiệm giải thuật điều khiển này trên thiết bị RT020 của hãng Gunt Hamburg cho đáp ứng lưu lượng chất lỏng bám tốt tín hiệu tham chiếu với thời gian xác lập được rút ngắn, độ vọt lố không đáng kể và sai số xác lập được triệt tiêu. Hướng phát triển của nghiên cứu này là tiến đến áp dụng bộ điều khiển đã đề xuất lên các hệ có độ phi tuyến mạnh và cấu trúc phức tạp hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. J. Åström and T. Hägglund. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- [2]. J. Chen and T.-C. Huang. (2004). *Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control*, Journal of Process Control, 14(2), 211-230.
- [3]. L. Ching-Hung, L. Yi-Hsiung, and T. Ching-Cheng. (2002). *A novel robust PID controllers design by fuzzy neural network*, in Proc. of the 2002 American Control Conference, 2, 1561-1566.
- [4]. L. M. Thanh, L. H. Thuong, P. T. Loc, and C.-N. Nguyen. (2020). *Delta Robot Control Using Single Neuron PID Algorithms Based on Recurrent Fuzzy Neural Network Identifiers*, Inter. J. of Mechanical Engineering and Robotics Research, 9(10), 1411-1418.
- [5]. L. M. Thanh, L. H. Thuong, P. T. Tung, and C.-N. Nguyen. (2021). *Improvement of PID Controllers by Recurrent Fuzzy Neural Networks for Delta Robot*, Springer, in Intelligent Commu., Control and Devices, 263-275.
- [6]. J. B. Gomm and D. L. Yu. (2000). *Selecting radial basis function network centers with recursive orthogonal least squares training*, IEEE Transactions on Neural Networks, 11(2), 306-314.
- [7]. Z. Ming-guang, W. Xing-gui, and L. Man-qiang. (2005). *Adaptive PID control based on RBF neural network identification*, in 17th IEEE Inter. Conf. on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'05), 1-3.

- [8]. C.-N. Nguyen and H. M. Nguyen. (2019). *Improvement of power output of the wind turbine by pitch angle control using RBF neural network*, Inter. J. of Mechanical Engineering and Technology, 10(10), 64-74.
- [9]. J. Jiao, J. Chen, Y. Qiao, W. Wang, C. Wang, and L. Gu. (2018). *Single Neuron PID Control of Agricultural Robot Steering System Based on Online Identification*, in 2018 IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), 193-199.
- [10]. J. Liu. (2016). *On a method of single neural PID feedback compensation control*, in 2016 Third International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition (AIPR), 1-4.
- [11]. M. Rif'an, F. Yusivar, and B. Kusumoputro. (2017). *Adaptive PID controller based on additional error of an inversed-control signal for improved performance of brushless DC motor*, in 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR) : Inter. Sym. on Electrical and Computer Engineering, 315-320.
- [12]. C. Rosales, C.M. Soria, and F.G. Rossomando. (2019). *Identification and adaptive PID Control of a hexacopter UAV based on neural networks*, Inter. J. of Adaptive Control and Signal Processing, 33(1), 74-91.
- [13]. N. V. Đ. Hải and N. V. Thuyên. (2012). *Xây dựng bộ điều khiển PID-neuron cho hệ con lắc ngược quay*, Tạp chí Giáo dục Kỹ thuật, Đại học Sư phạm kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh, 23, 37-45.
- [14]. H. T. Hiền, H. M. Vũ, and N. H. Dũng, "Bộ điều khiển PID dựa trên mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, vol. 54, no. 7, pp. 9-19, 2018.
- [15]. N. P. Hưng, P. K. Quang, and V. H. Hải. (2015). *Bộ điều khiển PID chỉnh tham số bằng mạng nơ-ron dùng cho máy lái tự động tàu thủy*, Giao thông Vận tải, 9, 67-70.
- [16]. N. C. Ngôn and Đ. Tín. (2011). *Điều khiển PID một nơ-ron thích nghi dựa trên bộ nhận dạng mạng nơ-ron mờ hồi qui áp dụng cho hệ thanh và bóng*, Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, 20a-2011, 169-175.
- [17]. N. C. Ngôn and T. T. Tú. (2012). *Điều khiển PID thích nghi cho hệ ổn định áp suất dựa trên bộ nhận dạng dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm*, Tạp chí Khoa học và Công Nghệ, Đại học Đà Nẵng, 60, 6-12.
- [18]. N. Nguyễn Chí and N. Lê Thị. (2021). *Recurrent single-neural PID control for Gunt-RT030 pressure control unit*, Journal of Technical Education Science, 63, 57-64.
- [19]. N. C. Ngôn. (2011). *Bộ điều khiển PI mờ: Từ thiết kế đến ứng dụng*, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 18a(2011), 82-92.
- [20]. L. T. Mỹ, T. n. X. Lil, T. T. Hùng, and N. C. Ngôn. (2021). *Kiểm nghiệm khả năng kết hợp giữa điều khiển PI và trượt thích nghi trên thiết bị GUNT-RT020*, Tạp chí Khoa học Trường ĐH Cần Thơ, 57(6), 1-10.
- [21]. G. G. GmbH. (2004). *Experiment Instructions - RT010- RT060 Principles of Control Engineering*. Barsbüttel Germany.