

## EXPERIMENTS OF RECURRENT FUZZY NEURAL NETWORKS – BASED SUPERVISORY CONTROL ON AN LIQUID FLOW CONTROL SYSTEM

Su Hong Thanh<sup>1,2</sup>, Dao Huynh Dang Khoa<sup>1,2</sup>, Le Minh Thanh<sup>3</sup>, Nguyen Chi Ngon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Can Tho University, <sup>2</sup>VNPT Can Tho, <sup>3</sup>Vinh Long University of Technology Education

| ARTICLE INFO                   |            | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Received:                      | 18/5/2022  | Recurrent fuzzy neural networks (RFNNs) has been successfully verified by many studies on simulation. However, the experimental controls on actual devices are still limited. There exist even some opinions that with a slow online training algorithm, it is difficult for RFNNs to guarantee the signal communication. This study conducts and experiments with a RFNNs – based supervisory control technique on the RT020 liquid flow control system of the Gunt-Hamburg, Germany. The RFNN controller parameter updating algorithm uses Jacobian information provided from a non-parameter model identifier, also using another RFNN. Experiments on the RT020 show that the RFNN controller has contributed to reduce the settling time, from about 12 seconds down to $8 \pm 0.5$ seconds without steady-state error, and negligible overshoot. Besides, with external factor affected on the RT020 system by forcibly reducing the pump power, experiments have proven that the RFNN controller is effective in bring the system response back to the reference value quickly and stably. |
| Revised:                       | 31/10/2022 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Published:                     | 01/11/2022 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>KEYWORDS</b>                |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Flow control                   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| PID control                    |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Recurrent fuzzy neural network |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Supervisory control            |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| System identification          |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## THỰC NGHIỆM ĐIỀU KHIỂN GIÁM SÁT DÙNG MẠNG NƠ-RON MỜ HỒI QUY TRÊN HỆ ỔN ĐỊNH LƯU LƯỢNG CHẤT LỎNG

Sử Hồng Thanh<sup>1,2</sup>, Đào Huỳnh Đăng Khoa<sup>1,2</sup>, Lê Minh Thành<sup>3</sup>, Nguyễn Chí Ngôn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Cần Thơ, <sup>2</sup>VNPT Cần Thơ, <sup>3</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

| THÔNG TIN BÀI BÁO      |            | TÓM TẮT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ngày nhận bài:         | 18/5/2022  | Mạng nơ-ron mờ hồi quy (recurrent fuzzy neural networks - RFNNs) đã được nhiều nghiên cứu kiểm chứng thành công trên mô phỏng. Tuy nhiên, các thực nghiệm điều khiển thiết bị thực vẫn còn hạn chế. Thậm chí có quan điểm cho rằng với tốc độ huấn luyện trực tuyến chậm, RFNNs khó đảm bảo yêu cầu truyền thông tin hiệu. Nghiên cứu này tiến hành kiểm nghiệm kỹ thuật điều khiển giám sát dùng RFNNs trên hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 của hãng Gunt-Hamburg, Đức. Giải thuật cập nhật tham số bộ điều khiển RFNN có dùng thông tin Jacobian được cung cấp từ bộ nhận dạng mô hình không tham số của đối tượng, cũng dùng một RFNN khác. Các thực nghiệm trên hệ RT020 cho thấy bộ điều khiển dùng RFNNs đã làm giảm thời gian xác lập của đối tượng, từ khoảng 12 giây, giảm xuống còn $8 \pm 0,5$ giây, không xuất hiện sai số xác lập và độ vọt lố không đáng kể. Bên cạnh đó, khi giả lập sự tác động của yếu tố bên ngoài lên hệ RT020 bằng cách giảm cường độ công suất máy bơm, kết quả thực nghiệm cũng đã chứng minh được bộ điều khiển dùng RFNNs hoạt động hiệu quả trong việc đưa đáp ứng của đối tượng quay về giá trị tham khảo một cách nhanh chóng và ổn định. |
| Ngày hoàn thiện:       | 31/10/2022 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Ngày đăng:             | 01/11/2022 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>TỪ KHÓA</b>         |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Điều khiển giám sát    |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Điều khiển PID         |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Điều khiển lưu lượng   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Mạng nơ-ron mờ hồi quy |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Nhận dạng hệ thống     |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6003>

\* Corresponding author. Email: ncngon@ctu.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Ngày nay kỹ thuật điều khiển PID (proportional integral derivative control) đã được ứng dụng trong hầu hết các lĩnh vực công nghiệp [1]. Nhiều hãng thiết bị đã tích hợp kỹ thuật điều khiển này vào các mô-đun gọn nhẹ, dễ dàng lắp đặt và vận hành [2]. Việc hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển này chủ yếu vẫn dựa vào phương pháp gần đúng Ziegler-Nichols [1], [3]. Tuy nhiên, do các đối tượng điều khiển thường phi tuyến và bị tác động bởi nhiều yếu tố trong quá trình vận hành như sự thay đổi của tải, sự tác động của môi trường công nghiệp... mà các kiểu điều khiển, dù đơn giản, dễ bảo dưỡng nhưng lại không đáp ứng thật sự tốt [4]. Ngoài ra, như đã đề cập, do đối tượng bị tác động bởi nhiều yếu tố bên ngoài, làm cho tham số của đối tượng bị thay đổi trong quá trình vận hành. Điều này ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển, đối với các giải pháp thiết kế đòi hỏi phải biết trước mô hình toán của đối tượng, như kiểu điều khiển PID truyền thống [4], [5]. Trong trường hợp không xác định được mô hình toán của đối tượng, giải pháp hiệu chỉnh gần đúng Ziegler-Nichols đòi hỏi nhiều thời gian để tinh chỉnh [6]. Trong khi đó, việc xác định chính xác mô hình toán của đối tượng không phải lúc nào cũng đạt được. Điều này dẫn đến việc hình thành hai trường phái nghiên cứu. Trường phái thứ nhất tiếp cận theo hướng mô hình hóa đối tượng càng ngày càng tốt hơn để làm cơ sở cho thiết kế. Trường phái thứ hai không đặt nặng vấn đề độ chính xác của mô hình toán, mà phát triển các giải thuật điều khiển dựa trên tín hiệu vào, ra của đối tượng như điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo [7], [8] hay dựa vào kinh nghiệm chuyên gia như dùng kỹ thuật điều khiển mờ [9], [10]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Thật vậy, cho dù sử dụng bộ điều khiển PID truyền thống hay bộ điều khiển mờ hoặc bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo với cơ chế huấn luyện off-line, chúng chỉ có thể đáp ứng tốt ở thời điểm triển khai thiết bị. Theo thời gian, do điều kiện công nghiệp khắc nghiệt, động lực học của đối tượng thay đổi, trong khi đó các bộ điều khiển trên đều không có cơ chế tự chỉnh định lại tham số, dẫn đến kết quả điều khiển sẽ bị kém dần theo thời gian.

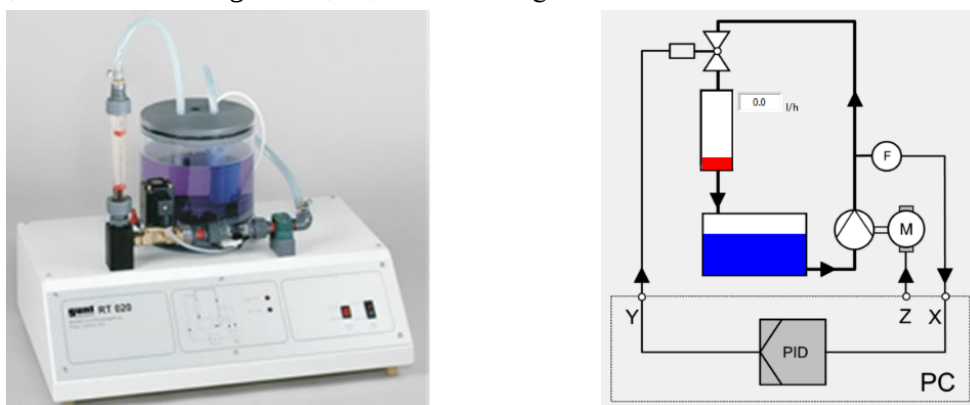
Những năm gần đây, mạng nơ-ron mờ hồi quy, gọi tắt là mạng RFNN (recurrent fuzzy neural network) tỏ ra có nhiều ưu thế vì khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến rất tốt [11] và cơ chế huấn luyện trực tuyến hiệu quả của nó. Mạng RFNN đã được ứng dụng thành công trong điều khiển robot Delta [12] – [14] và các hệ phi tuyến khác như hệ cầu cân bằng với thanh và bóng [11]. Ngoài ra, nhóm nghiên cứu đã xây dựng bộ điều khiển giám sát (supervisory control) [15] trên MATLAB/Simulink dựa trên mạng RFNN và mô phỏng thành công trong điều khiển động cơ không đồng bộ 3 pha [16]. Trong nghiên cứu này, nhóm tiếp tục kiểm nghiệm bộ điều khiển trên mô hình ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 của hãng Gunt-Hamburg, Đức [17]. Mô hình hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 đã được [6] hỗ trợ công cụ giao tiếp giữa MATLAB/Simulink và thiết bị thông qua card giao tiếp Labjack U12 [18], thuận lợi cho quá trình kiểm nghiệm thực tế. Việc kiểm soát lưu lượng chất lỏng có ý nghĩa quan trọng trong các ngành công nghiệp như thực phẩm – nước giải khát, dầu mỏ, hóa chất – dược phẩm, sản xuất giấy, điện... nên chủ đề này vẫn còn đang được tiếp tục nghiên cứu và phát triển.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mô hình thực nghiệm

Đối tượng thực nghiệm trong nghiên cứu này là hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 của hãng G.U.N.T Gerätebau GmbH [17], được minh họa trên Hình 1. Hệ này gồm có các ngõ vào-ra như sau: X là lưu lượng nước thực tế trong đường 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 van điều tiết lưu lượng trong đường ống kiểm soát (0-100%, tín hiệu điều khiển). Nhiệm vụ cơ bản của bộ điều khiển là kiểm soát góc công suất mở van tiết lưu Y, để giữ ổn định lưu lượng X của chất lỏng trong mạng, thích ứng với sự thay đổi của công suất Z của máy bơm.

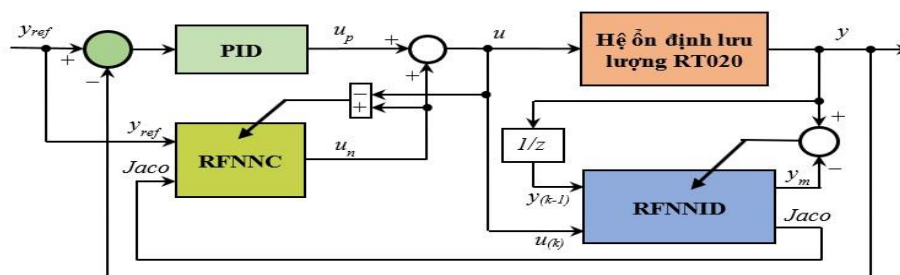
RT020 được xây dựng và đóng gói sẵn các bộ điều khiển P, PI, PID và ON-OFF trên Labview. Người vận hành chỉ có thể thay đổi các thông số như: tín hiệu tham khảo, tham số bộ điều khiển, một số thông số về chất lượng điều khiển và an toàn. Chương trình giao tiếp giữa MATLAB và thiết bị RT020 được xây dựng bởi [6], thông qua card LabJack [18], để đọc và hiển thị giá trị cảm biến, cũng như xuất các tín hiệu điều khiển các bộ phận chấp hành như: máy bơm, van tiết lưu... Nhờ cơ chế giao tiếp này, bộ điều khiển có thể thiết kế trên MATLAB và truyền tín hiệu điều khiển xuống thiết bị một cách dễ dàng.



Hình 1. Hệ thực nghiệm RT020 [6]

## 2.2. Nguyên lý điều khiển

Nguyên lý điều khiển đề xuất trong nghiên cứu này được kế thừa và kết hợp nhiều công trình đã công bố và đã xây dựng thành công trên MATLAB/Simulink [16]. Bộ điều khiển PID kết hợp với bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy (RFNNC) trở thành một kỹ thuật điều khiển giám sát (supervisory control), được xây dựng dựa theo [15]. Nguyên tắc nhận mô hình đối tượng dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy (RFNNID) để xác định độ nhạy của đối tượng, gọi là thông tin Jacobian được xây dựng dựa theo [11] – [13]. Hình 2 trình bày sơ đồ nguyên lý của hệ điều khiển được xây dựng trong nghiên cứu này.

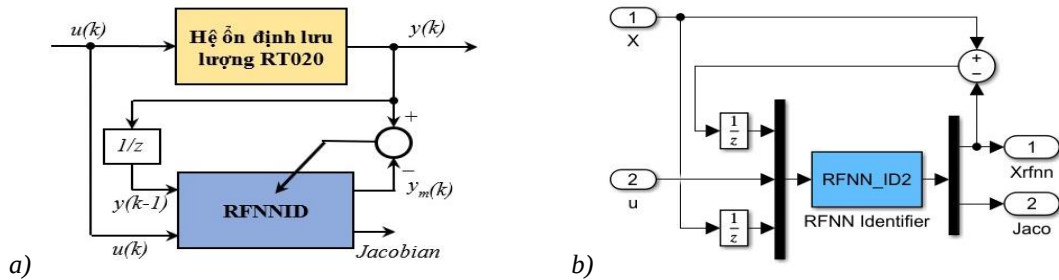


Hình 2. Nguyên lý điều khiển dùng mạng RFNN cho hệ RT020

Trong sơ đồ Hình 2, đối tượng điều khiển là hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020, được kiểm soát và giữ ổn định bởi bộ điều khiển PID mặc định của [17]. Tuy nhiên, các tham số cố định của bộ PID không đủ linh hoạt để thích ứng với sự biến thiên của đối tượng, ví dụ thay đổi công suất máy bơm. Vì vậy, bộ điều khiển RFNNC được tăng cường, để tinh chỉnh đáp ứng của đối tượng và thích nghi với sự biến đổi của đối tượng nhờ cơ chế huấn luyện trực tuyến của nó. Giải thuật cập nhật trọng số của bộ điều khiển RFNNC được triển khai theo [19] và các cải tiến trong [11] – [14]. Giải thuật này cần thông tin Jacobian, nên bộ nhận dạng mô hình đối tượng RFNNID cũng được xây dựng. Bộ nhận dạng RFNNID cũng được huấn luyện trực tuyến để cung cấp kịp thời thông tin về sự biến đổi của đối tượng cho bộ điều khiển.

### 2.3. Nhận dạng mô hình đối tượng dùng RFNN

Bộ nhận dạng đối tượng được sử dụng trong nghiên cứu này là một hệ suy diễn mờ được thực hiện bởi một mạng nơ-ron hồi quy nhiều lớp, gọi tắt là bộ nhận dạng RFNNID, được triển khai theo [19] và được minh họa trên Hình 3. Cấu trúc bộ nhận dạng RFNNID đã được nhóm nghiên cứu trình bày chi tiết trong [16]. Gọi  $u(k)$  và  $y(k)$  lần lượt là ngõ vào và ngõ ra của đối tượng điều khiển tại thời điểm lấy mẫu thứ  $k$ ; gọi  $y_m(k)$  là ngõ ra của bộ nhận dạng RFNNID. Bộ nhận dạng RFNNID sử dụng ngõ vào  $u(k)$  và  $y(k-1)$  để nhận dạng ngõ ra  $y_m(k)$ , gần nhất với ngõ ra  $y(k)$  của đối tượng. Bộ nhận dạng RFNNID được xây dựng gồm 4 lớp, với lớp vào có 2 nút, lớp mờ hóa có 10 nút, lớp luật mờ gồm 25 nút và lớp ra có 1 nút [16].



Hình 3. a) Nguyên tắc bộ nhận dạng RFNNID; b) Bộ nhận dạng RFNNID trong MATLAB

Gọi  $O_1^4(k)$  là ngõ ra của RFNN, thì ngõ ra của bộ nhận dạng RFNNID là:

$$y_m(k) = O_1^4(k) = \hat{f}[x_1(k), x_2(k)] = \hat{f}[u(k), y(k-1)] \quad (1)$$

Hàm mục tiêu của giải thuật huấn luyện được định nghĩa như (2):

$$E(k) = \frac{1}{2} [y(k) - y_m(k)]^2 = \frac{1}{2} [y(k) - O_1^4(k)]^2 \quad (2)$$

trong đó  $y(k)$  là đáp ứng của đối tượng,  $y_m(k)$  ngõ ra của bộ nhận dạng.

Sử dụng thuật toán lan truyền ngược (back propagation), bộ trọng số kết nối của RFNNID sẽ được điều chỉnh theo nguyên tắc sau:

$$W(k) = W(k-1) + \Delta W(k) = W(k-1) + \eta \left( -\frac{\partial E(k)}{\partial W} \right) \quad (3)$$

trong đó,  $\eta \in (0, 1)$  là hằng số tốc độ học và  $W$  là tham số cần điều chỉnh trong quá trình huấn luyện bộ nhận dạng RFNNID.

Gọi  $e(k) = y(k) - y_m(k)$  và  $W = [\theta, m, \sigma, w]^T$  là sai số huấn luyện và véc-tơ trọng số kết nối của RFNNID, thì gradient của  $E(.)$  trong (3) theo  $W$  được xác định như sau [11]-[13], [19]:

$$\frac{\partial E(k)}{\partial W} = -e(k) \frac{\partial y_m(k)}{\partial W} = -e(k) \frac{\partial O_1^4(k)}{\partial W} \quad (4)$$

Với nguyên tắc này, bộ trọng số của từng lớp mạng RFNN được cập nhật bởi [11] – [13], [19]:

$$w_{ij}^4(k+1) = w_{ij}^4(k) + \eta^w \left( -\frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}^4} \right) = w_{ij}^4(k) + \eta^w e(k) O_i^3 \quad (5)$$

$$m_{ij}(k+1) = m_{ij}(k) + \eta^m \left( -\frac{\partial E(k)}{\partial m_{ij}} \right) = m_{ij}(k) + \eta^m \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{2 [O_{ij}^1(k) - m_{ij}]}{(\sigma_{ij})^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) + \eta^\sigma \left( -\frac{\partial E(k)}{\partial \sigma_{ij}} \right) = \sigma_{ij}(k) + \eta^\sigma \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{2 [O_{ij}^1(k) - m_{ij}]^2}{(\sigma_{ij})^3} \quad (7)$$

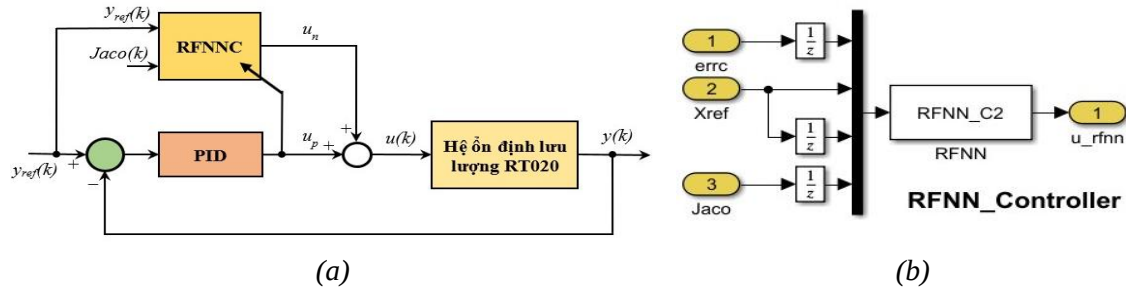
$$\theta_i^1(k+1) = \theta_i^1(k) + \eta^\theta \left( -\frac{\partial E(k)}{\partial \theta_i^1} \right) = \theta_i^1(k) + \eta^\theta \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{(-2) [O_{ij}^1(k) - m_{ij}] O_{ij}^1(k-1)}{(\sigma_{ij})^2} \quad (8)$$

Trong đó  $\eta_{|s=w,m,\sigma,\theta}^s$  là các hằng số tốc độ học tương ứng. Ngoài vai trò ước lượng ngõ ra của mô hình đối tượng  $y_m(k)$ , bộ nhận dạng RFNNID còn ước lượng thông tin Jacobian  $\partial y(k)/\partial u(k)$  để huấn luyện trực tuyến bộ điều khiển RFNNC. Thông tin Jacobian được xác định như (9) [11], [19]:

$$\begin{aligned} \text{Jaco}(k) &= \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} = \frac{\partial O_1^4}{\partial u} = \sum_{q=1}^{25} \left\{ \frac{\partial O_1^4}{\partial O_q^3} \frac{\partial O_q^3}{\partial u} \right\} = \sum_{q=1}^{25} w_{ij}^4 \left\{ \frac{\partial O_q^3}{\partial u} \right\} \\ &= \sum_q w_{ij}^4 \left\{ \sum_s \frac{\partial O_q^3}{\partial O_{qs}^2} \frac{\partial O_{qs}^2}{\partial u} \right\} \\ &= \sum_q w_{ij}^4 \left\{ \sum_s \frac{\partial O_q^3}{\partial O_{qs}^2} \frac{(-2) [O_{ij}^1(k) - m_{ij}]}{(\sigma_{ij})^2} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.4. Bộ điều khiển giám sát kết hợp PID-RFNN

Nguyên tắc điều khiển giám sát kết hợp giữa bộ điều khiển PID truyền thống và bộ điều khiển RFNNC được thực hiện dựa theo [15] và được minh họa trên Hình 4. Bộ điều khiển giám sát này được gọi tắt là bộ điều khiển PID-RFNNC. Tham số bộ điều khiển PID được giữ giá trị mặc định do hãng thiết bị cung cấp để thuận lợi cho việc so sánh chất lượng điều khiển giữa kiểu điều khiển PID kinh điển và kiểu điều khiển giám sát PID-RFNNC.



**Hình 4.** a) Nguyên lý điều khiển giám sát PID-RFNNC; b) Bộ PID-RFNNC trong MATLAB

Tín hiệu điều khiển giám sát trong sơ đồ Hình 4a được xác định như sau:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (10)$$

trong đó,  $u_p(k)$  tín hiệu điều khiển PID và là  $u_n(k)$  tín hiệu điều khiển giám sát RFNNC.

Tín hiệu điều khiển PID kinh điển  $u_p(k)$  dễ dàng xác định theo công thức. Nhưng tín hiệu điều khiển giám sát RFNNC được xác định thông qua mạng RFNN. Cấu trúc của mạng RFNNC được thực hiện giống như cấu trúc của bộ nhận dạng RFNNID. Tuy nhiên, ngõ vào của mạng RFNNC sử dụng trực tiếp tín hiệu tham khảo  $y_{ref}(k)$  và thông tin Jacobian (9) tại thời điểm  $k$  do bộ RFNNID cung cấp, dựa theo thiết kế của [19], [20]. Hàm hiệu suất huấn luyện mạng RFNNC được thực hiện theo [15], như sau:

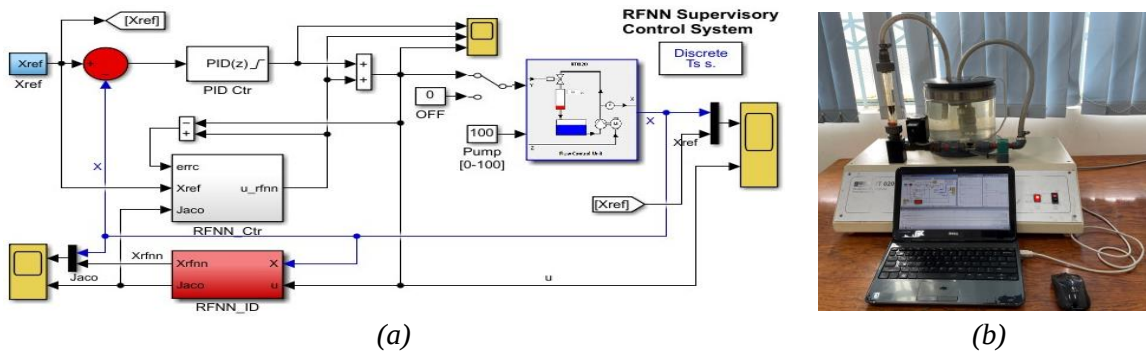
$$E(k) = \frac{1}{2} [u_n(k) - u(k)]^2 \quad (11)$$

## 3. Kết quả thực nghiệm

### 3.1. Bố trí thực nghiệm

Sơ đồ thực nghiệm điều khiển giám sát hệ RT020 của nghiên cứu này được xây dựng trên MATLAB/Simulink và minh họa bố trí thực nghiệm được thể hiện trên Hình 5. Trong đó, bộ

điều khiển PID được xác lập giá trị mặc định, với tham số bộ điều khiển  $K_p = 0,01$ ,  $K_i = 0,5$  và  $K_d = 0$ , được cung cấp bởi hãng Gunt [17].

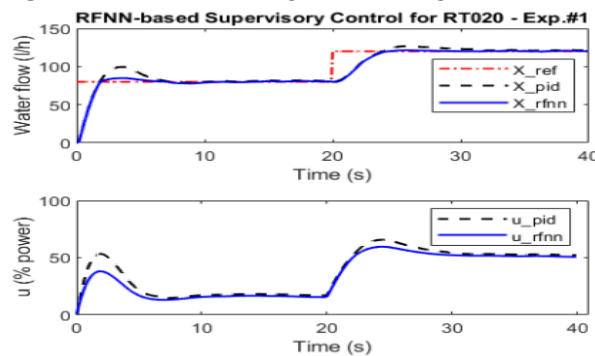


Hình 5. a) Sơ đồ điều khiển giám sát hệ RT020; b) Bố trí thực nghiệm

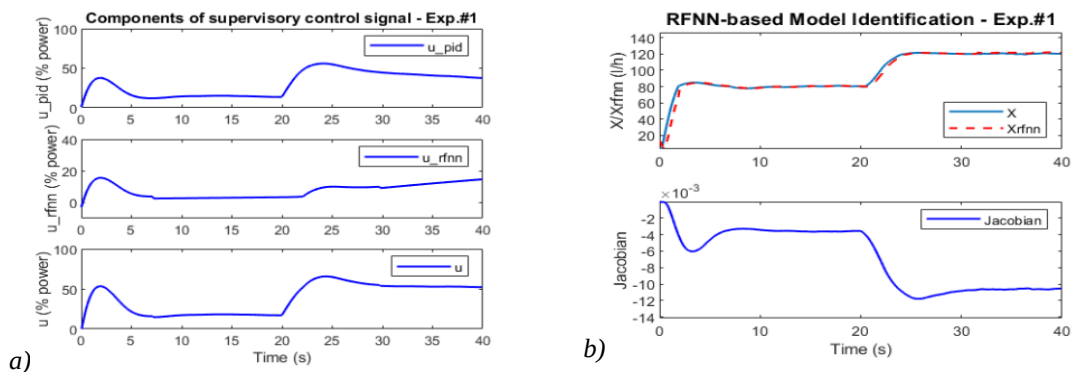
### 3.2. Một số kết quả thực nghiệm

#### 3.2.1. So sánh bộ điều khiển PID và bộ điều khiển giám sát PID-RFNN

Trong thực nghiệm này, lưu lượng tham khảo được đặt ở 80 lít/giờ trong 20 giây đầu tiên. Ở 20 giây tiếp theo, lưu lượng tham khảo được nâng lên 120 lít/giờ.



Hình 6. Kết quả thực nghiệm #1



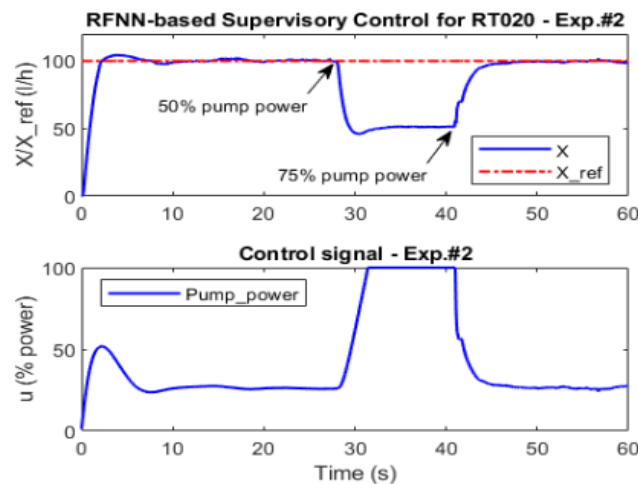
Hình 7. a) Tín hiệu điều khiển thực nghiệm #1; b) Kết quả nhận dạng thực nghiệm #1

Kết quả Hình 6 cho thấy bộ điều khiển dùng RFNNs đã cải thiện được chất lượng điều khiển PI. Cụ thể, bộ điều khiển PI của [17] cho độ vọt lố cao (~30%), nhưng khi kết hợp nó với bộ điều khiển RFNNC thì độ vọt lố đã giảm mạnh. Khi giải thuật huấn luyện các mạng RFNN đã ổn định thì độ vọt lố của đáp ứng không còn đáng kể nữa. Thời gian xác lập của đáp ứng đạt từ 7,5 đến 8,5 giây, phù hợp với thực tiễn. Trong khi đó, bộ điều khiển PI cho thời gian xác lập khoảng 12 giây.

Hình 7a trình bày các tín hiệu điều khiển thành phần của kỹ thuật điều khiển giám sát dùng RFNNs. Thành phần tín hiệu điều khiển do bộ RFNNC tạo ra đã giúp cải thiện chất lượng điều khiển khi mà thành phần điều khiển PI bắt đầu có tốc độ biến thiên chậm lại ở chế độ xác lập. Hình 7b trình bày kết quả nhận dạng ngõ ra của hệ RT020 và thông tin Jacobian của đối tượng. Kết quả cho thấy bộ RFNNID đã nhận dạng tốt lưu lượng chất lỏng. Thành phần Jacobian ước lượng được từ bộ nhận dạng RFNNID hỗ trợ tốt cho thuật cập nhật trực tuyến bộ điều khiển RFNNC.

### 3.2.2. Khảo sát chất lượng bộ điều khiển RFNN

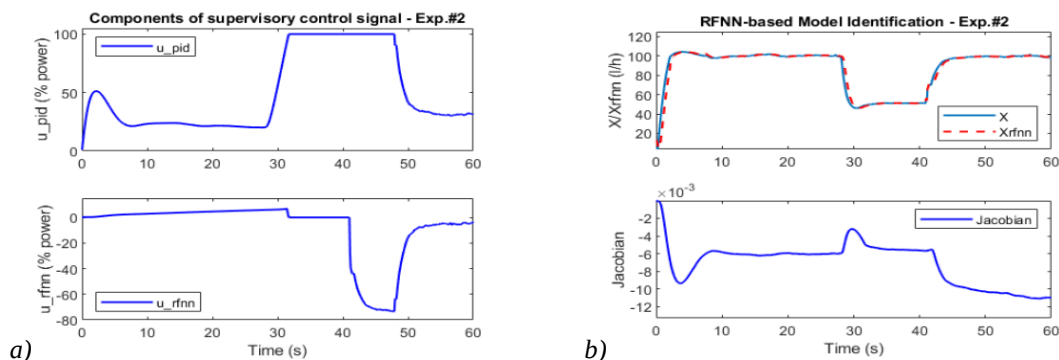
Hệ RT020 đã được hăng tích hợp cơ chế cưỡng bức giảm tốc độ máy bơm bằng cách khống chế mạch driver của thiết bị. Theo đó, công suất của máy bơm có thể được cài đặt từ 0 đến 100%, tại ngõ vào thứ hai (Z) của đối tượng điều khiển (ký hiệu là Pump trên Hình 5a) [6]. Khi  $Z=0$  (%), bất kể tín hiệu điều khiển (Y) là bao nhiêu thì hệ vẫn không hoạt động. Khi  $Z=100$  (%) thì máy bơm sẽ hoạt động tùy thuộc vào ngõ vào điều khiển Y. Để gây nhiễu lên thiết bị ta có thể giảm giá trị Z. Ví dụ, khi  $Z=80$  (%) thì dù cho tín hiệu điều khiển Y đạt trị cực đại, thì công suất của máy bơm vẫn chỉ hoạt động ở 80%. Với cơ chế trên, trong thí nghiệm này Z sẽ được giảm xuống mức 50% và sau đó được nâng lên 75% để khảo sát đáp ứng của bộ điều khiển.



**Hình 8.** Kết quả thực nghiệm #2

Hình 8 trình bày kết quả thực nghiệm khi có can thiệp giảm cường bức công suất máy bơm nước trên hệ RT020. Khi công suất máy bơm bị giảm cường bức xuống 50% làm cho lưu lượng nước ngõ ra giảm mạnh, khi đó tín hiệu điều khiển đã được nâng lên mức cực đại (100%). Tuy nhiên, do máy bơm đã bị làm yếu, nên lưu lượng ngõ ra có tăng, nhưng không thể đạt đến giá trị tham khảo (Hình 8). Sau đó, công suất máy bơm được kéo lên mức 75%, bộ điều khiển PID-RFNNC đã nhanh chóng đưa lưu lượng nước về giá trị tham khảo với đáp ứng không xuất hiện vọt lố và sai số xác lập không đáng kể.

Hình 9a trình bày các tín hiệu điều khiển thành phần của bộ điều khiển PID-RFNN. Từ kết quả Hình 9a ta thấy, tại giây thứ 40, khi công suất máy bơm đã được nâng từ 50% lên 75%, lúc này tín hiệu điều khiển PID đã tăng rất cao (trên Hình 9a, bộ bảo vệ đã cắt tín hiệu điều khiển ở mức tối đa là 100%) nên nó cần nhiều thời gian để giảm tín hiệu điều khiển. Trong khi đó, bộ RFNNC chỉ cần vài chu kỳ lấy mẫu đã tạo ra tín hiệu điều khiển âm, góp phần kéo tín hiệu điều khiển tổng hợp về giá trị phù hợp để giữ ổn định lưu lượng nước tại giá trị tham khảo. Kết quả này thể hiện một cách rõ ràng về sự góp mặt tích cực của bộ điều khiển RFNNC trong cơ chế điều khiển giám sát này. Ngoài ra, Hình 9b cũng cho thấy bộ nhận dạng RFNNID đã đảm nhận tốt vai trò nhận dạng lưu lượng nước ngõ ra của hệ RT020 và xác định được thông tin Jacobian để cung cấp cho giải thuật cập nhật trực tuyến bộ điều khiển RFNNC.



Hình 9. a) Tín hiệu điều khiển thực nghiệm #2; b) Kết quả nhận dạng thực nghiệm #2

Hình 10 là mã QR của link (<https://youtu.be/zUXshTSckpw>) một đoạn clip minh họa một thực nghiệm điều khiển giám sát dùng RFNN trên hệ RT020.



Hình 10. Mã QR link chứa clip minh họa thực nghiệm

### 3.2.3. Thảo luận

Nghiên cứu này góp phần kiểm nghiệm khả năng hoạt động của bộ điều khiển dùng RFNNs trên hệ thực nghiệm RT020. Điều lo ngại cơ bản của việc ứng dụng điều khiển dùng mạng nơ-ron với cơ chế huấn luyện trực tuyến chính là yếu tố thời gian thực trong thực nghiệm. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm đã chứng tỏ được thời gian cập nhật tham số của mạng đủ nhanh và kết thúc trong chu kỳ lấy mẫu để đảm bảo tín hiệu điều khiển không bị trễ đáng kể.

Do hạn chế về thiết bị thí nghiệm, nên điểm yếu cơ bản của nghiên cứu này là hệ RT020 chỉ phi tuyến nhẹ với thời gian trễ ngắn, do đó, nghiên cứu này thật sự cũng chưa đánh giá đầy đủ các yếu tố tác động đến hệ điều khiển khi thực nghiệm trên hệ phi tuyến mạnh.

## 4. Kết luận và đề nghị

RFNNs đã được kiểm chứng thành công thông qua mô phỏng. Tuy nhiên, các thực nghiệm trên thiết bị vẫn còn hạn chế. Thậm chí còn có quan điểm cho rằng, với cấu trúc mạng tương đối phức tạp và tốc độ huấn luyện chậm, RFNNs khó đảm bảo yếu tố thời gian thực trong truyền thông tín hiệu. Nghiên cứu này đã xây dựng được bộ nhận dạng thiết bị RT020 bằng RFNN (gọi là RFNNID), với cơ chế huấn luyện trực tuyến, để ước lượng thông tin về độ nhạy của thiết bị, còn gọi là thông tin Jacobian. Nghiên cứu thực nghiệm được bộ điều khiển giám sát kết hợp giữa bộ điều khiển PID truyền thống và bộ điều khiển dùng mạng RFNN (gọi là RFNNC). Bộ RFNNC đảm nhận trách nhiệm tinh chỉnh đáp ứng của RT020, nhờ cơ chế giám sát và cập nhật tham số trực tuyến của nó. Giải thuật cập nhật tham số của bộ điều khiển RFNNC sử dụng thông tin Jacobian từ bộ nhận dạng RFNNID để thích ứng với sự biến thiên của đối tượng. Các kết quả thực nghiệm cho thấy, khi kết hợp với bộ RFNNC, đáp ứng của hệ RT020 đã được cải thiện đáng kể. Khi giải thuật cập nhật thông số RFNNs hội tụ, đáp ứng lưu lượng của thiết bị RT020 có độ vọt lố không đáng kể nữa. Ngoài ra, bộ điều khiển RFNNC cũng góp phần giảm thời gian xác lập của đối tượng, từ khoảng 12 giây xuống còn khoảng  $8 \pm 0,5$  giây. Bên cạnh đó, khi giả lập sự tác động của yếu tố bên ngoài lên hệ RT020, bằng cách giảm cường độ công suất máy bơm, thực nghiệm cũng đã chứng minh được vai trò của bộ điều khiển RFNNC là rất quan trọng và hiệu quả trong việc góp một kênh tín hiệu điều khiển nhằm đưa đáp ứng của đối tượng quay về giá trị tham khảo một cách ổn định. Thời gian tới, nghiên cứu này tiếp tục được hoàn thiện và tiến hành thực nghiệm trên đối tượng có độ phi tuyến mạnh hơn, chẳng hạn như robot Delta 3 bậc tự do, mà nhóm nghiên cứu đã xây dựng được mô hình thiết bị.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.
- [2] P. K. Juneja, S. K. Sunori, A. Sharma, A. Sharma, H. Pathak, V. Joshi, and P. Bhasin, "A Review on Control System Applications in Industrial Processes," *IOP Confer. Series: Materials Science and Eng.*, vol. 1022, 2021, Art. no. 012010.
- [3] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 115, no. 2B, pp. 220-222, 1993.
- [4] H. Hartono, R. I. Sudjoko, and P. Iswahyudi, "Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller," *Journal of Physics: Confer. Series*, vol. 1381, 2019, Art. no. 012053.
- [5] A. Idoko, I. Thuku, S. Musa, and C. Amos, "Design of Tuning Mechanism of PID Controller for Application in three Phase Induction Motor Speed Control," *Inter. Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 11, pp. 138-147, 2017.
- [6] C.-N. Nguyen, "Fuzzy PI Controller: from Design to Application," *Can Tho University Journal of Science*, no. 18a, pp. 82-92, 2011.
- [7] F. Lftisi, G. H. George, A. Aktaibi, C. B. Butt, and M. A. Rahman, "Artificial neural network based speed controller for induction motors," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 23-26 Oct. 2016, pp. 2708-2713.
- [8] V. L. Phan, C. C. Tran, D. T. Nguyen, H. D. Le, and C.-N. Nguyen, "The ability of optimize RBF-PI controller using genetic algorithms to control the three-phase asynchronous motor," *Proc. 4<sup>th</sup> Vietnam International Confer. and Exhibition on Control and Automation (VCCA)*, Ho Chi Minh City, 1-2 Dec, 2017, Art. no. 21.
- [9] O. R. Agyare, A. B. Asiedu-Asante, and A. R. Biney, "Fuzzy Logic Based Condition Monitoring of a 3-Phase Induction Motor," in *2019 IEEE AFRICON*, 2019, pp. 1-8.
- [10] K. Zeb, Z. Ali, K. Saleem, W. Uddin, M. A. Javed, and N. Christofides, "Indirect field-oriented control of induction motor drive based on adaptive fuzzy logic controller," *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 803-815, 2017.
- [11] C.-N. Nguyen and T. Dang, "Adaptive single neural PID control based on recurrent fuzzy neural network: An application to ball and beam control system," *Can Tho University Journal of Science*, no. 20a, pp. 169-175, 2011.
- [12] M. T. Le, H. T. Luong, T. L. Phan, and C.-N. Nguyen, "Delta Robot Control Using Single Neuron PID Algorithms Based on Recurrent Fuzzy Neural Network Identifiers," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, no. 10, pp. 1411-1418, 2020.
- [13] M. T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, and C.-N. Nguyen, "Improvement of PID Controllers by Recurrent Fuzzy Neural Networks for Delta Robot," in *Intelligent Communication, Control and Devices*, Springer Singapore, 2021, pp. 263-275.
- [14] M. T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, C.-T. Pham, and C.-N. Nguyen, "Evaluating the Quality of Intelligent Controllers for 3-DOF Delta Robot Control," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 10, no. 10, pp. 542-552, 2021.
- [15] J. Liu, *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems Design, Analysis and Matlab Simulation*. Springer Berlin (in English), 2015, p. 365.
- [16] H. D. K. Dao, H. T. Su, and C.-N. Nguyen, "Intelligent control of induction motor using recurrent fuzzy neural networks," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 08, pp. 46-55, 2022.
- [17] G. G. GmbH, *Experiment Instructions - RT010- RT060 Principles of Control Engineering*. Barsbüttel Germany, 2004.
- [18] LabJack, *LabJack U12 Quickstart Guide*, 2003.
- [19] L. Ching-Hung and T. Ching-Cheng, "Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 349-366, 2000.
- [20] W. Sun and Y. Wang, "A recurrent fuzzy neural network based adaptive control and its application on robotic tracking control," *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, vol. 5, no. 1, pp. 19-26, 2004.