

DOI:10.22144/ctu.jvn.2021.167

## KIỂM NGHIỆM KHẢ NĂNG KẾT HỢP GIỮA ĐIỀU KHIỂN PI VÀ TRƯỢT THÍCH NGHI TRÊN THIẾT BỊ GUNT-RT020

Lê Tấn Mỹ, Trần Xa Lil, Trần Thanh Hùng và Nguyễn Chí Ngôn\*

Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

\*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Chí Ngôn (email: ncngon@ctu.edu.vn)

### Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 13/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 13/08/2021

Ngày duyệt đăng: 25/12/2021

### Title:

Testing the combination of the PI and adaptive sliding mode control on the GUNT-RT020 Device

### Từ khóa:

Điều khiển trượt thích nghi, điều khiển lưu lượng chất lỏng, điều khiển PI, mạng neuron RBF

### Keywords:

Adaptive Sliding Mode Control, Liquid flow control, PI controller, RBF neural network

### ABSTRACT

Although widely used in industry, with fixed parameters, the proportional integral (PI) controller is difficult to adapt to real conditions. Meanwhile, the sliding mode control (SMC) gives stable responses on nonlinear systems, but it has some limitations. This paper aims to propose a solution to combine the PI control and the radial basis function (RBF) neural network-based adaptive SMC, called PI-SMC control. The principle of this combination is to take SMC advantages to overcome the limitations of the PI controller and use the PI controller to push the sliding surface rapidly converge. The PI-SMC controller is tested on the liquid flow control device RT020 of the Gunt-Hamburg. The results show that the initial values of the RBF neural network and the coefficient of sliding surface has a great influence on the control quality. The experiment also shows that the adaptive sliding mechanism can overcome the limitation of fixed PI controller. With selected initial values, the PI-SMC controller has improved the flow response on the RT020 with the overshoot is less than 5 (%); the settling time is less than 2 (s); and the steady-state error is less than 0.3 (l/h).

### TÓM TẮT

Mặc dù được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, nhưng với tham số cố định, bộ điều khiển tích phân tỷ lệ PI (proportional integral controller) khó thích ứng với sự thay đổi của điều kiện thực tế. Trong khi đó, điều khiển trượt (sliding mode control – SMC) cho đáp ứng ổn định trên các đối tượng phi tuyến, nhưng lại tồn tại một số hạn chế. Bài báo này đề xuất giải pháp kết hợp giữa điều khiển PI và SMC thích nghi dựa trên mạng neuron hàm cơ sở xuyên tâm RBF (radial basis function neural network), gọi tắt là điều khiển PI-SMC. Nguyên tắc kết hợp này là tận dụng ưu điểm thích nghi, bền vững của bộ SMC để khắc phục hạn chế của bộ điều khiển PI, đồng thời sử dụng bộ PI mang năng lượng chủ đạo để đẩy bộ SMC nhanh chóng hội tụ về mặt trượt. Bộ điều khiển PI-SMC được kiểm nghiệm trên thiết bị ổn định lưu lượng RT020 của hãng Gunt-Hamburg. Kết quả cũng cho giá trị khởi tạo của bộ RBF và hệ số mặt trượt ảnh hưởng lớn đến chất lượng điều khiển. Thử nghiệm cũng cho thấy cơ chế trượt thích nghi có thể khắc phục được hạn chế cố định tham số của bộ PI. Với giá trị khởi tạo của bộ tham số được chọn, bộ điều khiển PI-SMC đã cải thiện tốt đáp ứng lưu lượng trên hệ RT020 với độ vọt lố nhỏ hơn 5 (%), thời gian xác lập nhỏ hơn 2 (giây) và sai số xác lập nhỏ hơn 0,3 (lít/giờ).

## 1. GIỚI THIỆU

Ra đời từ cuối thập niên 1960, kỹ thuật điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) được phát triển nhanh chóng và áp dụng nhiều trong các hệ thống tự động (Nguyễn Đức Minh, và ctv., 2009). Bộ điều khiển trượt sử dụng luật điều khiển chuyển đổi với tốc độ cao, để đưa hệ thống về mặt trượt và duy trì hệ thống trên mặt trượt đó. Ưu điểm của bộ điều khiển trượt là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống bị tác động của nhiễu hoặc tham số của mô hình thay đổi theo thời gian (Nguyễn Hoàng Dũng & Dương Hoài Nghĩa, 2010; Nguyễn Hoàng Dũng, 2012). Điểm hạn chế cơ bản của SMC là cần phải biết chính xác mô hình của đối tượng khi thiết kế, nhưng điều này không phải lúc nào cũng đạt được. Bên cạnh đó, do luật trượt chuyển đổi với tốc độ cao, nên bộ SMC có thể gây ra hiện tượng dao động quanh mặt trượt (chattering).

Để giải quyết vấn đề khó xác định mô hình của đối tượng điều khiển trong thực tế, một số nghiên cứu đã sử dụng mạng neuron (Ye et al., 2020) để thay thế thành phần điều khiển tương đương trong luật trượt hoặc để xấp xỉ các thành phần bất định của hệ thống. Ngoài ra, để khắc phục hiện tượng dao động quanh mặt trượt, hàm dấu trong thành phần điều khiển bền vững cũng được nghiên cứu và thay thế bằng các hàm bão hòa hay các hàm dạng liên tục (Keshtkar et al., 2016). Thật vậy, Nguyễn Đức Minh và ctv. (2009) đã giới thiệu bộ SMC thích nghi dùng mạng neuron (ANSMC), áp dụng cho các đối tượng phi tuyến bất định hoặc không rõ mô hình. Kết quả mô phỏng trên hệ con lắc ngược cho thấy đã khắc phục được hiện tượng chattering. Nguyễn Hoàng Dũng & Dương Hoài Nghĩa (2010) đã sử dụng mạng neuron hàm cơ sở xuyên tâm (RBFNN) để ước lượng trực tuyến các hàm phi tuyến trong luật điều khiển, đồng thời sử dụng logic mờ để ước lượng biên độ của luật điều khiển, dựa vào lý thuyết ổn định Lyapunov. Kết quả điều khiển được kiểm chứng bằng phần mềm MATLAB/Simulink cho thấy đáp ứng của bộ điều khiển có độ vọt lố thấp, thời gian xác lập được cải thiện. Bên cạnh đó, hàm trượt được thiết kế dựa trên bộ điều khiển Proportional Integral Derivative-PID cũng được áp dụng thành công trong việc kiểm soát các đối tượng phi tuyến (Nguyễn Hoàng Dũng, 2012). Giải pháp này được đề nghị nhằm giảm thiểu hiện tượng dao động quanh mặt trượt và giảm dao động trong tín hiệu điều khiển. Giải thuật được áp dụng cho hệ tay máy một bậc tự do. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho thấy đáp ứng của hệ tay máy bám tốt tín hiệu tham khảo. Phương pháp SMC

thích nghi dựa trên mạng neuron Radial Basic Function-RBF để kiểm soát hệ cầu cân bằng, cũng được xây dựng (Nguyễn Đình Tứ và ctv., 2017). Trong nghiên cứu này, tính bền vững của bộ điều khiển đã được đánh giá thông qua mô phỏng việc thay đổi tín hiệu tham khảo, khối lượng hòn bi và giá lập nhiều cảm biến.

Điểm hạn chế của các nghiên cứu trên là chỉ dừng lại ở mức độ mô phỏng, mà chưa áp dụng trên mô hình thực tế. Bài báo này đề xuất kiểm nghiệm thực tế kỹ thuật SMC thích nghi (Miqoi et al., 2019) trên hệ ổn định lưu lượng chất lỏng – RT020 của hãng Gunt-Hamburg (Gunt Gerätebau GmbH [Gunt], 2004). Hệ RT020 được Gunt tích hợp sẵn bộ điều khiển tích phân tỷ lệ PI kinh điển. Bộ điều khiển PI với tham số cố định theo thời gian đã không còn đáp ứng tốt, do một số tham số của hệ RT020 đã thay đổi theo thời gian, đặc biệt là thời gian trễ của hệ thống. Việc kết hợp kỹ thuật điều khiển SMC thích nghi và bộ PI kinh điển trên hệ RT020 nhằm tận dụng khả năng thích nghi của bộ SMC để khắc phục hạn chế của bộ PI cố định. Mặc dù hệ RT020 khá tuyến, nhưng thời gian trễ là một yếu tố cần quan tâm và khó kiểm soát trong điều khiển (Gopika & Latha, 2016). Đồng thời, công cụ giao tiếp giữa MATLAB và hệ RT020 thông qua card truyền thông Labjack (LabJack Corporation, 2003) đã được phát triển hoàn thiện bởi Nguyễn Chí Ngôn (2011), nên RT020 hoàn toàn thích hợp để kiểm chứng các giải thuật điều khiển.

Bộ điều khiển được xây dựng để kiểm nghiệm thực tế trong nghiên cứu này gồm 2 thành phần là Bộ điều khiển PI truyền thống và bộ SMC thích nghi dựa theo mạng neuron RBF. Hai bộ điều khiển này cùng tham gia quá trình kiểm soát hệ RT020. Khi có sự biến động của điều kiện thực tế, bộ điều khiển PI với tham số cố định có thể không đủ linh hoạt, thì bộ SMC thích nghi sẽ đảm nhận vai trò đó. Trong quá trình thiết kế bộ SMC thích nghi, một vài tham số của mặt trượt vẫn phải được xác định theo kinh nghiệm. Do đó, nghiên cứu này kỳ vọng thực nghiệm thực tế có thể cho phép khảo sát ảnh hưởng của việc lựa chọn các tham số này, dựa theo các tiêu chuẩn chất lượng quen thuộc.

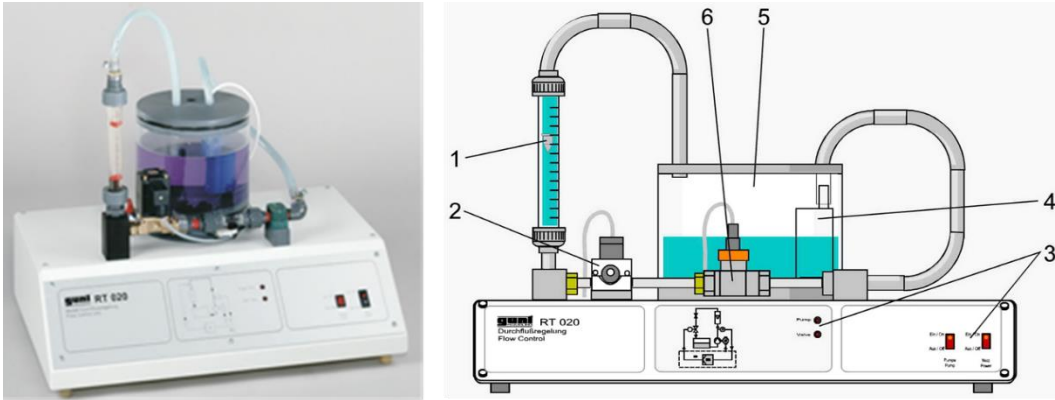
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Đối tượng điều khiển

Cấu trúc của hệ ổn định lưu lượng RT020 (Gunt, 2004) 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. Thông số kỹ thuật của hệ RT020 được trình bày trong Bảng 1.



**Hình 1: Cấu trúc hệ ổn định lưu lượng RT020**

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

**Bảng 1: Một số thông số kỹ thuật của RT020**

Dại lượng	Giá trị	Đơn vị
Dung tích bồn chứa	3	L
Công suất máy bơm	18	W
Tốc độ bơm tối đa	8	L/min
Tốc độ valve tiết lưu	0,7	m <sup>3</sup> /h
Cảm biến lưu lượng	0,5 – 3	L/min
Kích thước (D x R x C)	600 x 440 x 560 mm	
Trọng lượng	19	kg

**2.2. Thiết kế bộ điều khiển**

*2.2.1. Điều khiển trượt truyền thống*

Một cách tổng quát, xét một hệ thống phi tuyến bậc hai như sau:

Một cách tổng quát, xét một hệ thống phi tuyến bậc hai như sau:

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta, \dot{\theta})u + d(t) \tag{1}$$

Trong đó,  $f(\theta, \dot{\theta})$  và  $g(\theta, \dot{\theta})$  là các hàm phi tuyến,  $u \in R$  và  $\theta \in R$  lần lượt là ngõ vào và ngõ ra của hệ thống,  $d(t)$  là nhiễu tác động từ bên ngoài và bị chặn bởi  $|d(t)| \leq D$ .

Gọi tín hiệu tham khảo là  $\theta_d$  thì sai số hệ thống là:

$$e = \theta_d - \theta \tag{2}$$

Hàm trượt được định nghĩa sao cho hệ kín ổn định và đáp ứng của hệ bám theo tín hiệu tham khảo. Hàm trượt được thiết kế như sau:

$$s = \dot{e} + \lambda e \tag{3}$$

Với  $\lambda$  là hằng số dương.

Thay (2) vào (3), hàm trượt được viết lại như sau:

$$s = (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \lambda(\theta_d - \theta) \tag{4}$$

Lấy đạo hàm của  $s$  và thay  $\ddot{\theta}$  từ (1) vào, thu được biểu thức như sau:

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} + \lambda(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) = \ddot{\theta}_d - f - gu - d(t) + \lambda(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}). \tag{5}$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, chọn một hàm xác định dương:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \tag{6}$$

Từ phương trình (6) suy ra:

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \tag{7}$$

Để  $\dot{V}$  xác định âm, chọn  $\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s)$ , thay  $s$  vào (7) được:

$$\dot{V} = -sk \operatorname{sgn}(s) \tag{8}$$

với  $k$  là hằng số dương chọn trước. Từ (8) ta thấy, nếu  $s > 0$  thì  $\operatorname{sgn}(s) = 1 \rightarrow \dot{V} < 0$ , nếu  $s < 0$  thì

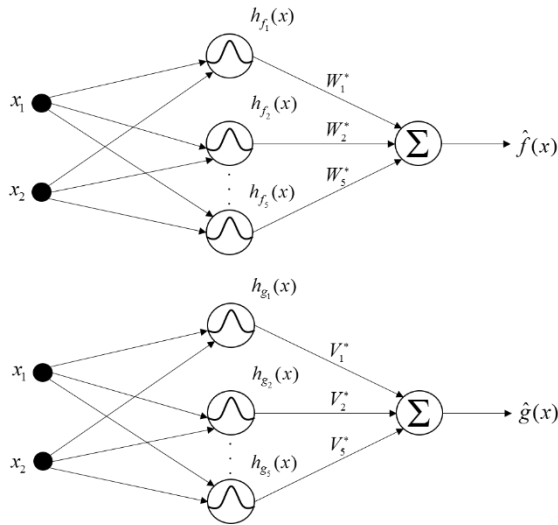
$\text{sgn}(s) = -1 \rightarrow \dot{V} < 0$  và nếu  $s = 0$  thì  $\text{sgn}(s) = 0 \rightarrow \dot{V} = 0$ . Tức là, khi  $t \rightarrow \infty$  thì  $\dot{V} < 0$ , chứng tỏ hệ thống sẽ ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

Như vậy, luật điều khiển của bộ điều khiển trượt được chọn như sau:

$$u_{SMC} = \frac{1}{g} [-f + \ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e} + k \text{sgn}(s)] \quad (9)$$

### 2.2.2. Điều khiển trượt thích nghi dùng mạng neuron RBF

Từ phương trình tổng quát của hệ thống (1), ta thấy trong thực tế các hàm  $f(\theta, \dot{\theta})$  và  $g(\theta, \dot{\theta})$  thường là các hàm phi tuyến và chưa biết trước. Vì vậy, việc thiết kế luật trượt truyền thống sẽ gặp khó khăn. Nghiên cứu này sử dụng hai mạng neuron RBF để xấp xỉ các hàm  $f(\theta, \dot{\theta})$  và  $g(\theta, \dot{\theta})$  trong luật trượt (9). Cả hai mạng neuron RBF này đều có cấu trúc [2-5-1], với 2 nút vào, 5 nút Gauss và 1 nút ra được trình bày trên Hình 2.



**Hình 2: Cấu trúc mạng neuron RBF**

Thuật toán dùng mạng neuron RBF để nhận dạng hai hàm  $\hat{f}(x)$  và  $\hat{g}(x)$  là:

$$h_{f|g_j} = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (10)$$

$$\hat{f}(x) = W^{*T} h_{f_j}(x) + \varepsilon_f$$

$$\hat{g}(x) = V^{*T} h_{g_j}(x) + \varepsilon_g$$

Trong đó,  $x$  là ngõ vào của mạng;  $j$  là số lớp ẩn của mạng;  $h_{f|g_j}$  là ngõ ra của các hàm Gauss;  $W^*$  và  $V^*$  là ma trận trọng số;  $\varepsilon_f$  và  $\varepsilon_g$  là sai số xấp xỉ của mạng;  $\hat{f}(x)$  và  $\hat{g}(x)$  là các ngõ ra xấp xỉ của mạng.

Ngõ vào của mạng được chọn là véc tơ  $x = [x_1 x_2]^T = [e \dot{e}]^T$ , số hàm Gauss  $j = 5$  và nếu bỏ qua sai số xấp xỉ thì ngõ ra của mạng neuron RBF là:

$$\hat{f}(x) = W^{*T} h_f(x), \quad \hat{g}(x) = V^{*T} h_g(x) \quad (11)$$

Trong đó,  $h_f(x)$  và  $h_g(x)$  là ngõ ra các hàm Gauss.

Khi đã ước lượng được  $\hat{f}(x)$  và  $\hat{g}(x)$  tín hiệu điều khiển (9) được thay thế thành:

$$u_{SMC} = \frac{1}{\hat{g}(x)} [-\hat{f}(x) + \ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e} + k \text{sgn}(s)] \quad (12)$$

Thay (12) vào (5), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_d - f - \hat{g}u + (\hat{g} - g)u - d(t) + \lambda \dot{e} \\ &= \ddot{\theta}_d - f - \hat{g} \frac{1}{\hat{g}(x)} [-\hat{f}(x) + \ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e} + k \text{sgn}(s)] + (\hat{g} - g)u - d(t) + \lambda \dot{e} \\ &= (\hat{f} - f) - k \text{sgn}(s) + (\hat{g} - g)u - d(t) = \tilde{f} - k \text{sgn}(s) + \tilde{g}u - d(t) \\ &= \tilde{W}^T h_f(x) - \varepsilon_f - k \text{sgn}(s) + (\tilde{V}^T h_g(x) - \varepsilon_g)u - d(t). \end{aligned} \quad (13)$$

với:  $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$ ,  $\tilde{V} = V^* - \hat{V}$ . Và:

$$\tilde{f} = \hat{f} - f = \hat{W}^T h_f(x) - W^{*T} h_f(x) - \varepsilon_f = \tilde{W}^T h_f(x) - \varepsilon_f \quad (14)$$

$$\tilde{g} = \hat{g} - g = V^T h_g(x) - V^{*T} h_g(x) - \varepsilon_g = \tilde{V}^T h_g(x) - \varepsilon_g \quad (15)$$

Theo lý thuyết Lyapunov, hàm xác định dương được chọn như sau (Ye et al., 2020; Miquoi et al., 2019):

$$L = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{V}^T \tilde{V} \quad (8)$$

Với  $\gamma_1 > 0$  và  $\gamma_2 > 0$ .

Lấy đạo hàm hai vế (16) và thay của (15) vào, thu được:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} \quad (9) \\ &= s(\tilde{W}^T h_f(x) - \varepsilon_f - k \text{sgn}(s) + (\tilde{V}^T h_g(x) - \varepsilon_g)u - d(t)) - \frac{1}{\gamma_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} - \frac{1}{\gamma_2} \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} \\ &= \tilde{W}^T (s h_f(x) - \frac{1}{\gamma_1} \dot{\tilde{W}}) + \tilde{V}^T (s h_g(x)u - \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{V}}) + s(-\varepsilon_f - k \text{sgn}(s) - \varepsilon_g u - d(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

Luật thích nghi được thiết kế như sau:

$$\begin{aligned} \hat{W} &= -\gamma_1 sh_f(x) \\ \hat{V} &= -\gamma_2 sh_g(x)u \end{aligned} \quad (12)$$

Thay  $\hat{W}$  và  $\hat{V}$  từ (20) vào (19) thu được:

$$\dot{L} = s(-\varepsilon_f - k \operatorname{sgn}(s) - \varepsilon_g u - d(t)) \quad (13)$$

$$= (-\varepsilon_f - \varepsilon_g u - d(t))s - sk \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

Do sai số xấp xỉ  $\varepsilon_f$  và  $\varepsilon_g$  đủ nhỏ, nên ta có thể chọn  $(-\varepsilon_f - \varepsilon_g u - d(t)) = 0$ . Khi đó, phương trình (22) được viết lại như sau:

$$\dot{L} = -sk \operatorname{sgn}(s) \quad (15)$$

Với  $k$  là hằng số dương chọn trước.

Phương trình (23) cho thấy nếu  $s > 0$  thì  $\dot{L} < 0$ ; nếu  $s < 0$  thì  $\dot{L} < 0$  và nếu  $s = 0$  thì  $\dot{L} = 0$ , chứng tỏ hệ thống sẽ ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

### 2.2.3. Điều khiển kết hợp PI-SMC

Bộ điều khiển tích phân tỷ lệ PI theo (24) được áp dụng nhiều trong công nghiệp, nhờ hiệu quả đáp ứng và tính đơn giản của nó (Huang, H. P. & Jeng, J. C., 2005).

$$\begin{aligned} u_{PI} &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \\ e(t) &= X_{ref}(t) - X(t) \end{aligned} \quad (16)$$

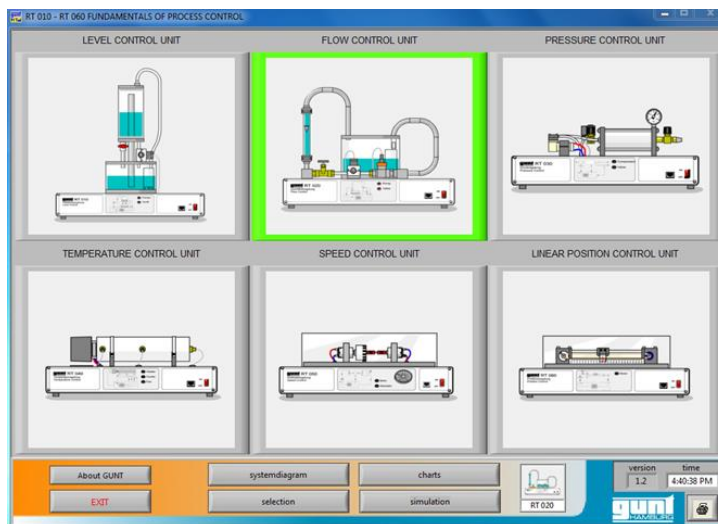
Trong đó,  $K_p$  và  $K_i$  lần lượt là độ lợi tỉ lệ và độ lợi tích phân của bộ điều khiển;  $X_{ref}(t)$  là tín hiệu tham khảo và  $X(t)$  là đáp ứng của đối tượng. Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PI là chọn lựa bộ giá trị  $\{K_p, K_i\}$  thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng điều khiển. Việc tăng các thông số  $\{K_p, K_i\}$  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 2 (Kanagaraj et. al., 2008).

**Bảng 2: Ảnh hưởng của việc tăng  $\{K_p, K_i\}$  đối với đáp ứng của hệ thống điều khiển**

Tăng 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

Bộ điều khiển PI áp dụng cho thiết bị RT020 được Gunt (2021) tích hợp sẵn trên giao diện Hình 3. Phần mềm này có thể kiểm soát 6 thiết bị, từ RT010 đến RT060. Trong nghiên cứu này, mô hình được chọn để thực nghiệm là hệ ổn định lưu lượng chất lỏng – RT020. Bộ điều khiển PI được chạy với bộ thông số mặc định  $K_p=0,01$  và  $T_n=0,5$

nhằm duy trì lưu lượng chất lỏng tại 120 l/h, kết quả như Hình 4. Lưu ý, thời hằng tích phân  $T_n$  trên Hình 4 quan hệ với thông số  $K_i$  như sau:  $K_i=K_p/T_n=0,01/0,5=0,02$ . Kết quả Hình 4 cho thấy ngõ ra lưu lượng  $X$  (đáp ứng) bị vọt lố hơn 13,33% so với lưu lượng tham khảo  $W$ , đồng thời lưu lượng ngõ ra  $X$  bị dao động nhiều, khi tín hiệu điều khiển  $Y$  bị gọn sóng.



**Hình 3: Các mô hình điều khiển của Gunt**



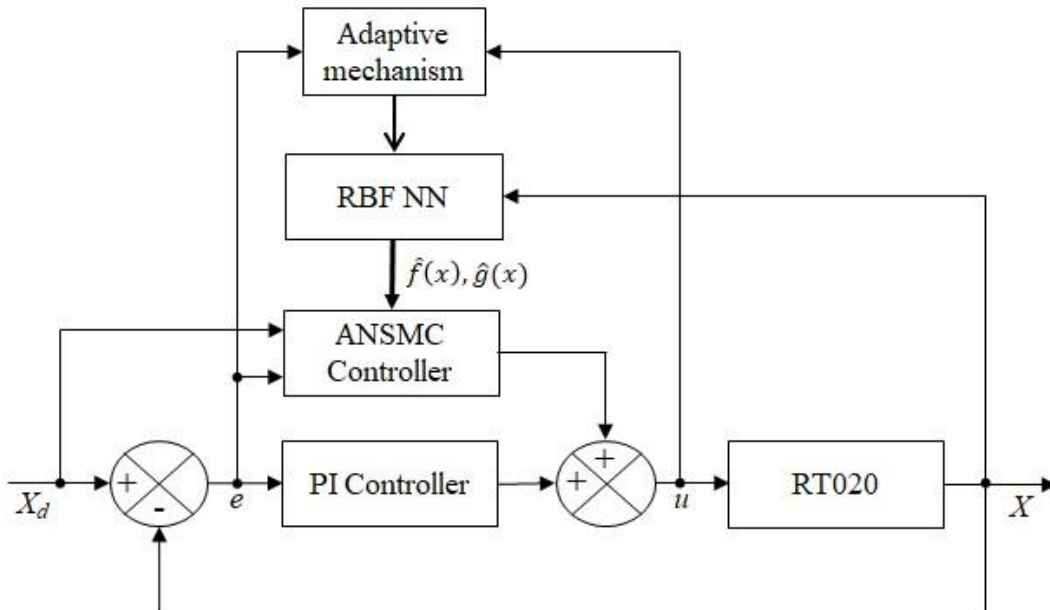
**Hình 4: Kết quả điều khiển PI hệ RT20 trên phần mềm Gunt**

Như đã đề cập, với bộ tham số cố định, bộ điều khiển PID nói chung và bộ điều khiển PI nói riêng, hoạt động kém hiệu quả, khi có sự biến động đối tượng hay điều kiện thực tế. Vì thế, để đảm bảo chất lượng điều khiển, cần có thêm một cơ chế cùng tác động, có khả năng thích ứng với sự biến đổi này. Việc kết hợp giữa bộ điều khiển PI truyền thống và bộ SMC thích nghi, gọi tắt là bộ điều khiển PI-SMC

là một lựa chọn nhằm khắc phục vấn đề này. Bộ điều khiển đề xuất có cấu trúc như Hình 5. Với cấu trúc này, tín hiệu điều khiển là:

$$u = u_{SMC} + u_{PI} \tag{17}$$

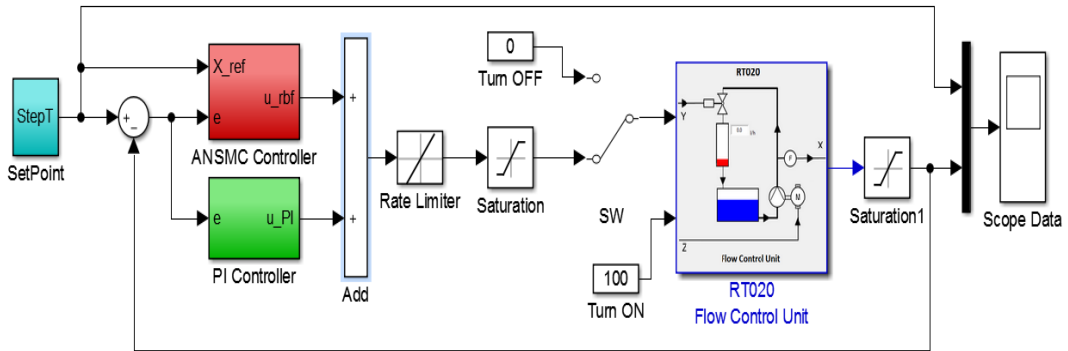
Trong đó,  $u_{SMC}$  là tín hiệu điều khiển trượt thích nghi và  $u_{PI}$  là tín hiệu điều khiển PI.



**Hình 5: Nguyên lý điều khiển kết hợp PI-SMC**

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Dựa trên sơ đồ Hình 5, mô hình thực nghiệm điều khiển kết hợp PI-SMC được xây dựng trên MATLAB/Simulink, được trình bày như Hình 6.



Hình 4: Bộ điều khiển kết hợp PI-SMC thực nghiệm

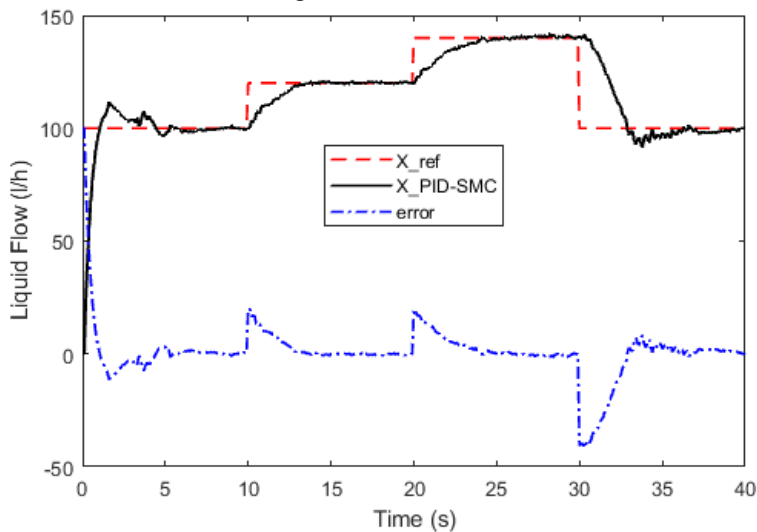
Thực nghiệm thứ nhất được tiến hành với thời gian  $t = 40s$ , tốc độ lấy mẫu là  $T_s = 0,1s$ , thông số của bộ điều khiển PI mặc định là  $K_p = 0,01$  và  $K_i = 0,02$  (hay  $T_n=0,5$ ), thông số của bộ SMC thích nghi được khởi tạo là  $b_j = 5$ ,  $c_{ij} = [-5 \ -2,5 \ 0 \ 2,5 \ 5]$ ,  $W^*$  và  $V^*$  ngẫu nhiên  $\in (0, 1)$  và hệ số mặt trượt trong (3) được chọn  $\lambda = 1$ . Đáp ứng của hệ RT020 được trình bày ở Hình 7. Kết quả này cho thấy đáp ứng lưu lượng của hệ RT020 bám được lưu lượng tham khảo. Tuy nhiên, chất lượng điều khiển chưa được tốt tại các thời điểm lưu lượng tham khảo thay đổi đột ngột theo hàm nấc. Điều này cho thấy, thực tế việc chọn lựa các giá trị

khởi tạo của mạng neuron RBF và hệ số  $\lambda$  của mặt trượt có tác động đến chất lượng điều khiển.

Do vậy, các ở các thực nghiệm tiếp theo, các tham số trên được thay đổi và dựa vào một số tiêu chí cơ bản để đánh giá chất lượng điều khiển. Hai tiêu chí được sử dụng gồm IAE (Integral of the Absolute value of the Error) và IATE (Integral of the time weighted Absolute value of the Error), định nghĩa bởi (26) và (27):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \tag{18}$$

$$IATE = \int_0^{\infty} t |e(t)|dt \tag{19}$$



Hình 5: Kết quả thực nghiệm 1 bộ điều khiển kết hợp PI-SMC

Bảng 3, Bảng 4, Bảng 5 và Bảng 6 trình bày kết quả của 20 thực nghiệm khác nhau, mà mỗi thực

thực nghiệm các tiêu chí IAE và IATE tương ứng được tính toán, nhằm so sánh và chọn lựa bộ tham số tốt nhất cho hệ điều khiển.

**Bảng 3: Cố định  $b_j, \lambda$  và thay đổi  $c_{ij}$**

TT	Bộ thông SMC			Tiêu chí	
	$b_j$	$\lambda$	$c_{ij}$	IAE	IATE
1			$\begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	233	4230
2			$5 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	220	4097
3	5	1	$10 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	218	4124
4			$20 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	233	4238
5			$30 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	238	4377

Bảng 3 cho thấy  $c_{ij} =$  sai số nhỏ nhất. Tiếp theo, ta tiến hành cố định  $c_{ij}, \lambda$  và thay đổi  $b_j$ .  
 Bảng 4 cho thấy  $b_j = 20$  là bộ tham số có tiêu chí sai số nhỏ nhất. Tiếp theo, ta tiến hành cố định  $b_j, c_{ij}$  và thay đổi  $\lambda$ .

**Bảng 4: Cố định  $c_{ij}, \lambda$  và thay đổi  $b_j$**

TT	Bộ thông số mạng			Tiêu chí	
	$b_j$	$\lambda$	$c_{ij}$	IAE	IATE
1	10			226	3972
2	20			228	4180
3	30	1	$5 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	232	4197
4	3			236	4305
5	15			232	4188

Bảng 4 cho thấy  $b_j = 20$  là bộ tham số có tiêu chí sai số nhỏ nhất. Tiếp theo, ta tiến hành cố định  $b_j, c_{ij}$  và thay đổi  $\lambda$ .

Bảng 5 cho thấy  $\lambda = 5$  là tham số có tiêu chí sai số nhỏ nhất. Tiếp theo, ta thử tiến hành thay đổi đồng thời bộ tham số  $b_j, c_{ij}$  và  $\lambda$ .

**Bảng 5: Cố định  $b_j, c_{ij}$  và thay đổi  $\lambda$**

TT	Bộ thông số mạng			Hai tiêu chí	
	$b_j$	$\lambda$	$c_{ij}$	IAE	IATE
1		1		180	3196
2		5		182	3192
3	20	10	$5 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	182	3189
4		15		182	3222
5		30		185	3292

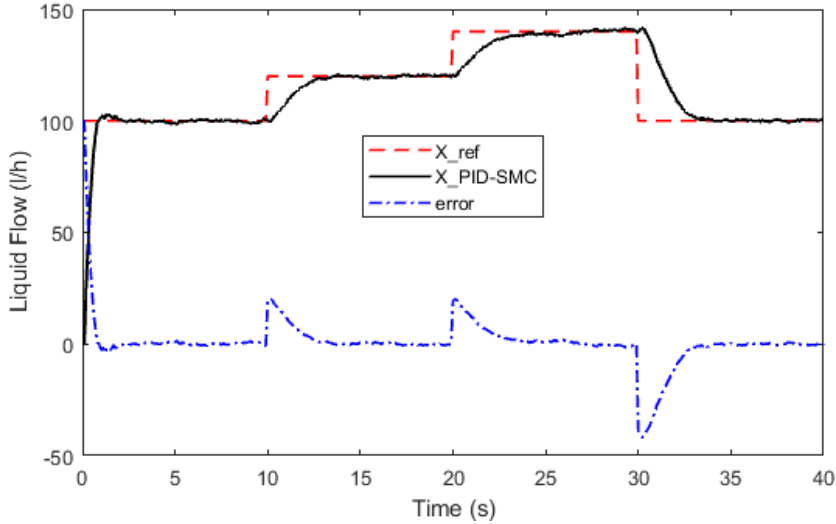
**Bảng 6: Đồng thời thay đổi cả 3 thông số**

TT	Bộ thông số mạng			Hai tiêu chí	
	$b_j$	$\lambda$	$c_{ij}$	IAE	IATE
1	15	1	$15 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	183	3234
2	15	5	$15 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	176	3192
3	20	50	$20 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	184	3181
4	30	30	$30 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	192	3297
5	13	13	$13 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$	183	3263



**Nhận xét:** Qua nhiều lần kiểm nghiệm từ Bảng 3 đến Bảng 6 có thể thấy rằng bộ tham số cho kết quả tốt nhất là:  $b_j = 15$ ,  $c_{ij} = 15 \begin{bmatrix} -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \\ -1 & -0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$  và  $\lambda = 5$  với kết quả đáp ứng lưu lượng được trình bày ở Hình 8. Các thực nghiệm này chưa thể xác định được giá trị tối ưu của bộ tham số  $(b_j, c_{ij}, \lambda)$ , nhưng nó cho ta nhìn nhận một

cách tổng quát về ảnh hưởng thực tế của việc khởi tạo bộ tham số này lên chất lượng điều khiển. Có thể thấy rằng, chỉ thông qua thực nghiệm mới có thể đánh giá được tổng thể về tác động của các tham số khởi tạo của bộ điều khiển, điều mà hầu hết các công bố thường không trình bày một cách chi tiết.



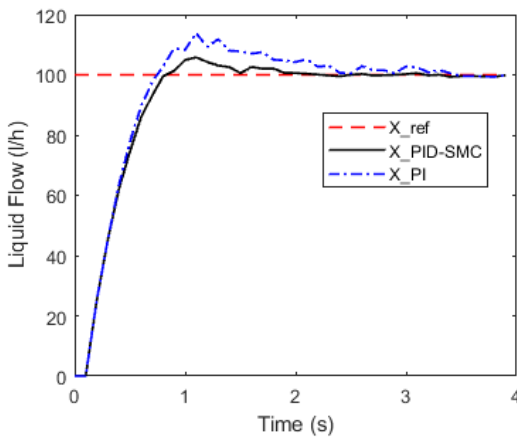
**Hình 6: Kết quả thực nghiệm cho đáp ứng tốt nhất**

Kết quả thực nghiệm trên Hình 8 có các tiêu chí IAE = 176 và IATE=3192 là cặp tiêu chí có giá trị sai số nhỏ nhất. Ứng với bộ tham số khởi tạo  $b_j = 15$ ,  $c_{ij} = 15[.]$  và  $\lambda = 5$ , bộ điều khiển kết hợp PI-SMC được so sánh với bộ điều khiển mặc định PI trên hệ RT020, cho kết quả hiển thị cận cảnh khoảng thời gian quá độ, được minh họa trên Hình 9.

khởi tạo PI mặc định, với độ vọt lố nhỏ hơn 5%, thời gian xác lập nhỏ hơn 2 giây và sai số xác lập nhỏ hơn 0,3 l/h.

**4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ**

Giải pháp kết hợp bộ điều khiển PI truyền thống và bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng neuron RBF đã được đề xuất và kiểm nghiệm trên hệ ổn định lưu lượng chất lỏng RT020 của hãng Gunt-Hamburg. Kết quả thực nghiệm chứng tỏ rằng việc chọn lựa giá trị khởi tạo của mạng neuron RBF gồm ma trận tâm và độ rộng của các hàm Gauss, cùng với hệ số mặt trượt có ảnh hưởng lớn đến chất lượng điều khiển, thể hiện thông qua các tiêu chuẩn chất lượng IAE và IATE. Quá trình thực nghiệm cho thấy cơ chế trượt thích nghi hoàn toàn có thể sử dụng để khắc phục hạn chế về việc cố định tham số của bộ điều khiển PI truyền thống. Với giá trị khởi tạo của bộ tham số được chọn, bộ điều khiển kết hợp PI-SMC đã cải thiện tốt đáp ứng lưu lượng trên hệ RT020, với độ vọt lố thấp hơn 5%, thời gian xác lập nhỏ hơn 2 giây và sai số xác lập nhỏ hơn 0,3 lít/giờ. Kỹ thuật điều khiển này hoàn toàn có thể áp dụng cho các đối tượng phi tuyến khác mà ở đó bộ điều khiển PID truyền thống với tham số cố định không đáp ứng được yêu cầu về chất lượng điều khiển.



**Hình 7: So sánh kết quả thực nghiệm giữa bộ điều khiển PI-SMC và PI**

Tại bộ tham số này, đáp ứng lưu lượng hệ RT020 được cải thiện đáng kể so với khi áp dụng bộ điều

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Hoàng Dũng & Dương Hoài Nghĩa. (2010). Điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình neuron mờ. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 15a, 273-282.
- Nguyễn Hoàng Dũng. (2012). Điều khiển trượt dựa trên hàm trượt kiểu PID. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 21a, 30-36.
- Gopika, K. & Ms. Latha. V. (2016). Sliding Mode based Level Controller with First Order Plus Delay Time (FOPDT) Modeling. *Inter. J. of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(17), 1-5.
- Gunt Gerätebau GmbH. (2004). *Experiment Instructions - RT010- RT060 Principles of Control Engineering*. Barsbüttel Germany, Publication-no: 918.000 00 A 0X0 02 (A).
- Huang, H. P. & Jeng, J. C. (2005). Process Reaction Curve and Relay Methods Identification and PID Tuning. In: Johnson M.A., Moradi M.H. (eds) *PID Control*. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2\\_8](https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2_8).
- Keshkar, S., Keshkar, J. & Poznyak, A. (2016). Adaptive sliding mode control for solar tracker orientation. In: *2016 American Control Conference – ACC*, 6543-6548, IEEE. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526700
- Kanagaraj, N., Sivashanmugam, P. & Paramasivam, S. (2008). Fuzzy Coordinated PI Controller: Application to the Real-Time Pressure Control Process. *Advances in Fuzzy Systems*, 2008, Article ID 691808, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2008/691808>.
- LabJack Corporation. (2003). *LabJack U12 Quickstart Guide*. Revision 1.09, [www.LabJack.com](http://www.LabJack.com).
- Nguyễn Đức Minh, Dương Hoài Nghĩa & Nguyễn Đức Thành. (2009). Điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ-ron. *Tạp chí Khoa học & Công nghệ các trường đại học kỹ thuật*, 71, 1-5.
- Miqoi, S., Ougli, A. E. & Tidhaf, B. (2019). Design of an adaptive sliding mode controller for efficiency improvement of the MPPT for PV water pumping. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, 7(1), 19-36. <https://doi.org/10.1504/IJIEI.2019.097550>
- Nguyễn Chí Ngôn. (2011). Bộ điều khiển PI mờ: Từ thiết kế đến ứng dụng. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 18a, 82-92.
- Nguyễn Đình Tứ, Lê Hoàng Đăng, Trần Chí Cường & Nguyễn Chí Ngôn. (2017). Điều khiển thích nghi theo mô hình tham khảo dựa trên mạng nơ-ron RBF. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 50(A), 37-42. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.064>
- Ye, T., Luo, Z. & Wang, G. (2020). Adaptive sliding mode control of robot based on fuzzy neural network. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(12), 6235-6247. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01809-2>