

Terminal Sliding Mode Control Based on New Quasi-Sliding Mode Function for Two Tanks Interacting System

Thanh Tung Pham¹, Chi-Ngon Nguyen²

¹Vinh Long University of Technology Education, Vietnam

²Can Tho University, Vietnam

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 20/12/2021
Revised: 26/12/2021
Accepted: 21/2/2022
Published: 28/4/2022

KEYWORDS

Terminal sliding mode control;
New Quasi-sliding mode function;
Chattering;
Two tanks interacting;
MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

In this paper, a terminal sliding control based on a new quasi-sliding mode function is designed to control a liquid level in two tanks interacting system with external disturbance and uncertainty. This system is always in great demand in the chemical industry, petrochemical refining, water treatment, power generation, construction material production, food processing, automatic liquid dispensing and replenishment devices. The terminal sliding mode control (TSMC) schemes not only ensure that the system states arrive at the equilibrium point in a finite time but also offer some attractive properties, such as their fast response and higher precision than traditional sliding mode control. The new quasi-sliding mode function will eliminate high frequency oscillations phenomenon around a sliding surface (also known as chattering) of the sliding mode control. This phenomenon causes instability in the system, the power driver circuits are susceptible to overheating, resulting in damage. Simulation results in MATLAB/Simulink show that the proposed method is suitable to control the liquid level's position of the two tanks interacting system with without the percent overshoot, the steady state error is eliminated, the settling time is 0.8518(s), the rising time achieves 0.4054(s), and the chattering phenomenon is eliminated.

Điều Khiển Trượt Đầu Cuối Dựa Vào Hàm Trượt Quasi Mới Hệ Thống Bồn Đôi Tương Tác

Phạm Thanh Tùng¹, Nguyễn Chí Ngôn²

¹Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, Việt Nam

²Đại học Cần Thơ, Việt Nam

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 20/12/2021
Ngày hoàn thiện: 26/12/2021
Ngày chấp nhận đăng: 21/2/2022
Ngày đăng: 28/4/2022

TỪ KHÓA

Điều khiển trượt đầu cuối;
Hàm trượt Quasi mới;
Chattering;
Bồn đôi tương tác;
MATLAB/Simulink.

TÓM TẮT

Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới được thiết kế để điều khiển mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác với nhiễu ngoài không chắc chắn. Đây là hệ thống luôn có nhu cầu lớn trong công nghiệp hóa chất, lọc hóa dầu, xử lý nước, phát điện, sản xuất vật liệu xây dựng, chế biến thực phẩm, thiết bị phân phối và bổ sung chất lỏng tự động. Phương pháp điều khiển trượt đầu cuối không chỉ đảm bảo trạng thái của hệ thống đến điểm cân bằng trong thời gian hữu hạn mà còn cung cấp đáp ứng nhanh và độ chính xác cao hơn điều khiển trượt truyền thống. Hàm trượt Quasi mới sẽ loại bỏ hiện tượng dao động với tần số cao quanh mặt trượt (còn được gọi là chattering) của điều khiển trượt. Hiện tượng này gây ra sự bất ổn trong hệ thống, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy rằng phương pháp đề xuất phù hợp để điều khiển vị trí mức chất lỏng trong hệ thống bồn đôi tương tác với thời gian tăng đạt 0.4054(s), thời gian xác lập là 0.8518(s), không có độ vọt lố, sai số xác lập hội tụ về 0 và loại bỏ được hiện tượng chattering.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.69.2022.1100>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Điều khiển trượt (SMC) là phương pháp điều khiển rất phổ biến do sự đơn giản và bền vững của nó, được nghiên cứu rộng rãi trong hơn 60 năm và nhận được nhiều ứng dụng [1 - 2]. Nền tảng ổn định của điều khiển trượt được xây dựng trên nguyên tắc của lý thuyết Lyapunov xác định sự ổn định tiệm cận. Trong điều khiển trượt, chuyển mạch đơn cực, độ trễ thời gian nhỏ trong việc lấy mẫu và độ trễ truyền tín hiệu trong hệ thống điều khiển được nối mạng tạo ra hiện tượng dao động tần số cao (còn được gọi là chattering). Hiện tượng này gây ra sự bất ổn trong hệ thống, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng [3], độ chính xác điều khiển thấp, gây ra mài mòn cao các bộ phận chuyển động cơ khí và có thể làm hỏng bộ truyền động [4]. Để khắc phục hiện tượng này, các phương pháp phổ biến nhất là thay thế hàm signum trong điều khiển chuyển mạch bằng hàm bão hòa hoặc kỹ thuật lớp biên [4]. Phương pháp lớp biên đã được đề xuất để loại bỏ chattering bằng cách xác định một lớp biên xung quanh mặt trượt và sau đó xấp xỉ điều khiển không liên tục bằng hàm liên tục trong lớp biên này. Kết quả là hiện tượng chattering bị loại bỏ. Tuy nhiên, sự đánh đổi giữa việc loại bỏ chattering và hiệu quả bám xảy ra; một lớp biên dày hơn có thể loại bỏ hiện tượng chattering nhưng sai số bám sẽ tăng lên. Một vài nghiên cứu đã kiểm chứng ứng dụng của điều khiển trượt bậc cao hoặc phương pháp luật tiếp cận [5]. Tuy nhiên, hệ thống hội tụ thời gian hữu hạn dựa trên điều khiển trượt bậc cao có thể làm tăng ảnh hưởng chattering mạnh hơn so với hệ thống hội tụ tiệm cận. Phương pháp luật tiếp cận được đề xuất để loại bỏ hoặc giảm chattering bằng cách điều khiển các thông số của luật tiếp cận. Bộ lọc thông thấp cũng được sử dụng để khắc phục chattering [6]. Phương pháp này được thực hiện bằng cách điều khiển các giá trị của bộ lọc bậc một. Gần đây, hàm trượt Quasi mới được phát triển để tránh hiện tượng chattering trong điều khiển trượt [7]. Trong phương pháp này, hàm signum không liên tục được thay thế bằng hàm tanh liên tục. Nói cách khác, hàm tanh được sử dụng như hàm xấp xỉ hàm signum. Độ dốc của hàm tanh xác định cách hàm tanh có thể xấp xỉ hàm signum.

Điều khiển trượt đầu cuối là phương pháp điều khiển sử dụng mặt trượt phi tuyến thay vì sử dụng mặt trượt tuyến tính, nó có nhiều ưu điểm như hội tụ trong thời gian hữu hạn và độ chính xác cao hơn [1 - 2], [8]. Bằng cách thêm phần phi tuyến, quỹ đạo của hệ thống hội tụ đến mặt trượt trong thời gian hữu hạn và tạo ra động học trượt trên mặt trượt. Hơn nữa, điều khiển trượt đầu cuối có tính bền vững đối với sự không chắc chắn của hệ thống [5].

Nghiên cứu này đề xuất bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới để điều khiển mức chất lỏng trong hệ thống bồn đôi tương tác. Ưu điểm của phương pháp đề xuất là đáp ứng hội tụ nhanh trong thời gian hữu hạn, loại bỏ chattering và đảm bảo tính bền vững với nhiễu ngoài chưa biết và không chắc chắn. Điều khiển mức chất lỏng luôn có nhu cầu lớn trong công nghiệp hóa chất, lọc hóa dầu, xử lý nước, phát điện và sản xuất vật liệu xây dựng, chế biến thực phẩm và bổ sung chất lỏng tự động [9 - 10]. Trong các quy trình công nghệ này, chất lỏng được bơm, lưu trữ trong bồn và sau đó được bơm sang bồn khác [9], [11]. Chất lỏng được xử lý bằng phản ứng hóa học hoặc/và tác động trong bồn nơi mức chất lỏng được điều khiển. Các hệ thống bồn ghép nối tương tác thường được sử dụng trong các ngành công nghiệp và được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, tiêu biểu như trong nghiên cứu [9] bộ điều khiển PID mờ được thực hiện, nghiên cứu [10] đã sử dụng bộ điều khiển trượt với các điều kiện tích phân, trong [11] đã tiến hành so sánh điều khiển trượt bậc một và bậc hai cho ước lượng mức chất lỏng trong cấu trúc bồn đôi, bộ điều khiển trượt [12 - 14] và PID [12], [15] hệ thống bồn đôi đã được thực hiện; bộ điều khiển trượt bậc hai được thực hiện trong [16].

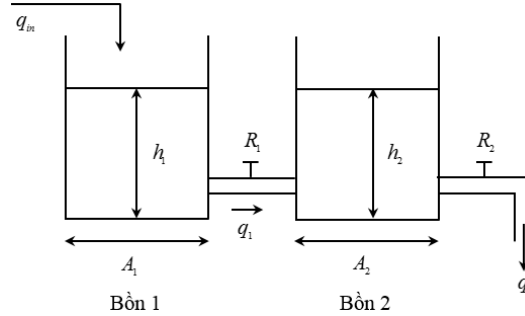
Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới điều khiển mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác được thiết kế để đảm bảo vị trí mức chất lỏng thực tế bám theo vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn, đồng thời hiện tượng chattering bị loại bỏ. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink của bộ điều khiển đề xuất được so sánh với điều khiển trượt truyền thống và điều khiển trượt với điều kiện tích phân. Tính bền vững của nó được khảo sát với sự thay đổi các thông số cũng như trường hợp nhiễu tác động vào hệ thống.

Bài báo được tổ chức gồm 4 phần: phần 2 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới (TSMC Quasi) mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác; kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày trong phần 3 và kết luận là phần 4.

2. Thiết kế bộ điều khiển trượt TSMC_Quasi mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác

2.1 Mô hình toán học hệ thống bồn đôi tương tác

Mô hình hệ thống bồn đôi tương tác được trình bày như Hình 1 [13]. Chiều cao của mức chất lỏng là h_1 (cm) trong bồn 1 và h_2 (cm) trong bồn 2. Lưu lượng thể tích vào bồn 1 là q_{in} (cm^3/min), tốc độ thể tích tích dòng chảy từ bồn 1 là q_1 (cm^3/min) và tốc độ thể tích dòng chảy từ bồn 2 là q_o (cm^3/min). Diện tích của bồn 1 là A_1 (cm^2) và bồn 2 là A_2 (cm^2).



Hình 1. Mô hình hệ thống bồn đôi tương tác

Phương trình toán học của hệ thống bồn đôi tương tác như (1), (2) và (3) [13]:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t) = f(\mathbf{x}) + \frac{a}{b}u(t) + d(t) \quad (2)$$

$$y(t) = x_1(t) \quad (3)$$

Với
$$f(\mathbf{x}) = -\frac{1}{b}x_1(t) - \frac{c}{b}x_2(t) \quad (4)$$

$d(t)$ bao hàm nhiễu ngoài và các yếu tố bất định khác, $d(t) \leq D$, $T_1 = A_1R_1$ là hằng số thời gian của bồn 1 và $T_2 = A_2R_2$ là hằng số thời gian của bồn 2.

$$a = R_2; b = T_1T_2; c = T_1 + T_2 + A_1R_2$$

Mô tả toán học của hệ thống bồn đôi tương tác được viết dưới dạng không gian trạng thái như (5):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + d(t) \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{b} & -\frac{c}{b} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a}{b} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \quad 0]$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} h_2(t) \\ \dot{h}_2(t) \end{bmatrix}, y(t) = h_2(t) \text{ là ngõ ra - mức chất lỏng thực tế và } u(t) = q_{in}(t) \text{ là ngõ vào.}$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt đầu cuối

Điều khiển trượt đầu cuối thêm các hàm phi tuyến vào thiết kế trượt mặt phẳng trên. Vì thế, mặt trượt đầu cuối được xây dựng và sai số bám trên mặt trượt hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn.

2.2.1. Thiết kế mặt chuyển mạch

Để các trạng thái hội tụ đến quỹ đạo mong muốn trong thời gian hữu hạn, biến trượt được đề xuất như (6) [17]:

$$\sigma = Q(E - P) \quad (6)$$

Trong đó: $Q = [q \ 1]$, $q > 0$ phải Hurwitz, $E = [e \ \dot{e}]^T$, $P = [p(t) \ \dot{p}(t)]^T$, h_{2d} là vị trí mong muốn, $e = h_2 - h_{2d}$ là sai số bám.

Luật thiết kế của $p(t)$ là: cho $T > 0$, $p(t)$ giới hạn trong khoảng $[0, T]$. Để đảm bảo $\sigma(0) = 0$ thì $E(0) = P(0)$, hay nói cách khác $p(0) = e(0), \dot{p}(0) = \dot{e}(0)$ tại cùng thời gian, lúc này làm cho $p(T) = 0, \dot{p}(T) = 0, \ddot{p}(T) = 0$

Căn cứ theo các điều kiện trên và dựa theo [18], $p(t)$ được thiết kế như (7):

$$p(t) = \begin{cases} \left(\sum_{k=0}^2 \frac{1}{k!} e_i(0)^{(k)} t^k + \sum_{j=0}^2 \left(\sum_{l=0}^2 \frac{\alpha_{jl}}{T^{j-l+3}} e_i(0)^{(l)} \right) t^{j+3} \right), & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó, $i = n - 1$ (n là bậc của hệ thống). α_{jl} là hằng số và có thể tìm được từ các điều kiện tổng quát sau [18]:

Với $i = 1, 2, \dots, m$, $p_i(t): \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}$, $p_i(t) \in C^n(0, \infty)$, $\dot{p}_i, \dots, p_i^{(n)} \in L^\infty$, sự hỗ trợ của $p_i(t)$ là khoảng giới hạn $[0, T]$ với $T > 0$, $p_i(0) = e_i(0), \dot{p}_i(0) = \dot{e}_i(0), \dots, p_i^{(n)}(0) = e_i^{(n)}(0)$, với $C^n[0, \infty)$ đại diện cho tập tất cả các hàm khả vi bậc n được định nghĩa trên $[0, \infty)$.

2.2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt đầu cuối

Từ phương trình (6), ta có (8):

$$\dot{\sigma} = Q(\dot{E} - \dot{P}) = Q[\dot{e} \ \ddot{e}]^T - C[\dot{p} \ \ddot{p}]^T = q(\dot{e} - \dot{p}) + (\ddot{e} - \ddot{p}) \quad (8)$$

Hay
$$\dot{\sigma} = q(\dot{e} - \dot{p}) + f(x) + \frac{a}{b}u(t) - \ddot{h}_{2d} - \ddot{p} \quad (9)$$

Hàm Lyapunov được chọn như (10):

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (10)$$

Với luật tiếp cận tốc độ hằng, bộ điều khiển được thiết kế như (12):

$$\dot{\sigma} = -\eta \text{sign}(\sigma), \quad \eta > 0 \quad (11)$$

Hay

$$u_{TSMC}(t) = -\frac{b}{a} \left(q(\dot{e} - \dot{p}) + f(x) - \ddot{h}_{2d} - \ddot{p} + \eta \text{sign}(\sigma) \right) \quad (12)$$

Vì thế, ta có (13):

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} = \sigma(-\eta \text{sign}(\sigma) + d(t)) = -\eta |\sigma| + d(t) \sigma \leq 0 \quad (13)$$

Với $\eta \geq D$ thì $\dot{V} \leq 0$. Do đó, hệ thống ổn định theo Lyapunov.

Do $p(0) = e(0)$ và $\dot{p}(0) = \dot{e}(0)$, từ (6) ta có (14):

$$\sigma(0) = Q(E(0) - P(0)) = 0 \quad (14)$$

Vì thế, ở trạng thái đầu của hệ thống trên mặt trượt, việc khởi tạo điều kiện đầu của mặt trượt trở nên dễ dàng và tính bền vững toàn cục của hệ kín được đảm bảo.

Vì tính bền vững toàn cục có thể được đảm bảo, nghĩa là $\sigma(t) = 0, E(t) = P(t)$. Bằng cách chọn mặt trượt $P(T) = 0$, ta có thể tìm được $E(T) = 0$. Theo đó, sai số bám hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn T .

Căn cứ (6), nếu $\sigma \rightarrow 0$ trong thời gian T thì $E = [e \quad \dot{e}]^T \rightarrow P = [p(T) \quad \dot{p}(T)]^T = [0 \quad 0]^T$, nghĩa là $e = h_2 - h_{2d} \rightarrow 0$ và $\dot{e} \rightarrow 0$ trong thời gian T . Vì thế, $h_2 \rightarrow h_{2d}$ và $\dot{h}_2 \rightarrow \dot{h}_{2d}$.

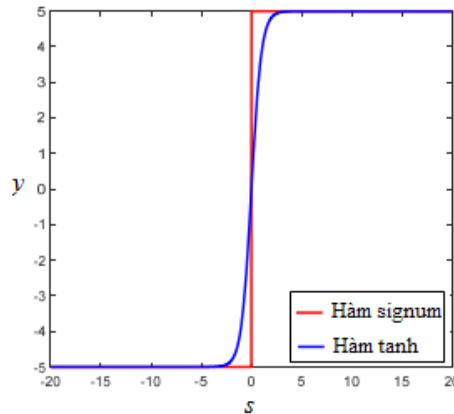
2.2.3. Bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới

Sự không liên tục của hàm *signum* trong luật điều khiển (12) có thể gây ra hiện tượng chattering. Vì thế, hàm *signum* không liên tục trong (12) được thay thế bằng hàm *tanh* liên tục để khắc phục hiện tượng này. Độ dốc của hàm *tanh* xác định cách hàm *tanh* có thể xấp xỉ hàm *signum* [7]. Hàm *tanh* được mô tả như (15) [7].

$$\tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \frac{e^{\frac{s}{\varepsilon}} - e^{-\frac{s}{\varepsilon}}}{e^{\frac{s}{\varepsilon}} + e^{-\frac{s}{\varepsilon}}} \quad (15)$$

Trong đó: $\varepsilon > 0$, độ dốc của hàm *tanh* được xác định bởi giá trị ε .

Hình 2 trình bày tín hiệu hàm *signum* và hàm *tanh* [19]. Từ Hình 2 ta thấy rằng hàm *tanh* bằng phẳng hơn hàm *signum* vì hàm *tanh* là hàm khả vi liên tục.



Hình 2. Tín hiệu hàm *signum* và hàm *tanh*

Thay hàm *signum* trong luật điều khiển (12) bởi hàm *tanh*, ta được bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào chế độ trượt Quasi mới như (16):

$$u_{TSMC-Q}(t) = -\frac{b}{a} \left(q(\dot{e} - \dot{p}) + f(x) - \ddot{h}_{2d} - \ddot{p} + \eta \tanh\left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) \right) \quad (16)$$

Luật điều khiển (14) đảm bảo $h_2(t) \rightarrow h_{2d}(t), e(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ và loại bỏ được hiện tượng chattering.

2.3 Nghiệm của $p(t)$

Vì hệ thống bền vững tương tác là hệ thống SISO bậc 2 nên $i = 1$ và $j = 2$, hàm $p(t)$ và các đạo hàm của nó như (17), (18) và (19):

$$p(t) = e(0) + \dot{e}(0)t + \frac{1}{2}\ddot{e}(0)t^2 + \left(\frac{\alpha_{00}}{T^3}e(0) + \frac{\alpha_{01}}{T^2}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{02}}{T}\ddot{e}(0) \right)t^3 + \left(\frac{\alpha_{10}}{T^4}e(0) + \frac{\alpha_{11}}{T^3}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{12}}{T^2}\ddot{e}(0) \right)t^4 + \left(\frac{\alpha_{20}}{T^5}e(0) + \frac{\alpha_{21}}{T^4}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{22}}{T^3}\ddot{e}(0) \right)t^5 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) = & \dot{e}(0) + \ddot{e}(0)t + 3\left(\frac{\alpha_{00}}{T^3}e(0) + \frac{\alpha_{01}}{T^2}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{02}}{T}\ddot{e}(0)\right)t^2 \\ & + 4\left(\frac{\alpha_{10}}{T^4}e(0) + \frac{\alpha_{11}}{T^3}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{12}}{T^2}\ddot{e}(0)\right)t^3 + 5\left(\frac{\alpha_{20}}{T^5}e(0) + \frac{\alpha_{21}}{T^4}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{22}}{T^3}\ddot{e}(0)\right)t^4 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \ddot{p}(t) = & \ddot{e}(0) + 6\left(\frac{\alpha_{00}}{T^3}e(0) + \frac{\alpha_{01}}{T^2}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{02}}{T}\ddot{e}(0)\right)t + 12\left(\frac{\alpha_{10}}{T^4}e(0) + \frac{\alpha_{11}}{T^3}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{12}}{T^2}\ddot{e}(0)\right)t^2 \\ & + 20\left(\frac{\alpha_{20}}{T^5}e(0) + \frac{\alpha_{21}}{T^4}\dot{e}(0) + \frac{\alpha_{22}}{T^3}\ddot{e}(0)\right)t^3 \end{aligned} \quad (19)$$

Vì $p(T) = 0$ nên ta có (20):

$$p(T) = (1 + \alpha_{00} + \alpha_{10} + \alpha_{20})e(0) + (1 + \alpha_{01} + \alpha_{11} + \alpha_{21})\dot{e}(0)T + \left(\frac{1}{2} + \alpha_{02} + \alpha_{12} + \alpha_{22}\right)\ddot{e}(0)T^2 = 0 \quad (20)$$

Do đó, điều kiện $p(T) = 0$ như (21):

$$\begin{cases} 1 + \alpha_{00} + \alpha_{10} + \alpha_{20} = 0 \\ 1 + \alpha_{01} + \alpha_{11} + \alpha_{21} = 0 \\ 0.5 + \alpha_{02} + \alpha_{12} + \alpha_{22} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Tại cùng thời gian, $\dot{p}(T) = 0$ $\ddot{p}(T) = 0$, ta có (22) và (23):

$$\begin{cases} 3\alpha_{00} + 4\alpha_{10} + 5\alpha_{20} = 0 \\ 1 + 3\alpha_{01} + 4\alpha_{11} + 5\alpha_{21} = 0 \\ 1 + 3\alpha_{02} + 4\alpha_{12} + 5\alpha_{22} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} 6\alpha_{00} + 12\alpha_{10} + 20\alpha_{20} = 0 \\ 6\alpha_{01} + 12\alpha_{11} + 20\alpha_{21} = 0 \\ 1 + 6\alpha_{02} + 12\alpha_{12} + 20\alpha_{22} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Từ các phương trình (21), (22) và (23), ta có (24), (25) và (26):

$$\begin{cases} \alpha_{00} + \alpha_{10} + \alpha_{20} = -1 \\ 3\alpha_{00} + 4\alpha_{10} + 5\alpha_{20} = 0 \\ 6\alpha_{00} + 12\alpha_{10} + 20\alpha_{20} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \alpha_{01} + \alpha_{11} + \alpha_{21} = -1 \\ 3\alpha_{01} + 4\alpha_{11} + 5\alpha_{21} = -1 \\ 6\alpha_{01} + 12\alpha_{11} + 20\alpha_{21} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \alpha_{02} + \alpha_{12} + \alpha_{22} = -0.5 \\ 3\alpha_{02} + 4\alpha_{12} + 5\alpha_{22} = -1 \\ 6\alpha_{02} + 12\alpha_{12} + 20\alpha_{22} = -1 \end{cases} \quad (26)$$

Các phương trình (24), (25) và (26) có thể được viết lại như sau (27), (28) và (29):

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 = \mathbf{B}_1, \quad \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \\ 6 & 12 & 20 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$A_2 x_2 = B_2, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \\ 6 & 12 & 20 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$A_3 x_3 = B_3, A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \\ 6 & 12 & 20 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} -0.5 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Nghiệm của (27), (28) và (29) tương ứng như (30):

$$\begin{cases} \alpha_{00} = -10 \\ \alpha_{10} = 15 \\ \alpha_{20} = -6 \end{cases}; \begin{cases} \alpha_{01} = -6 \\ \alpha_{11} = 8 \\ \alpha_{21} = -3 \end{cases}; \begin{cases} \alpha_{02} = -1.5 \\ \alpha_{12} = 1.5 \\ \alpha_{22} = -0.5 \end{cases} \quad (30)$$

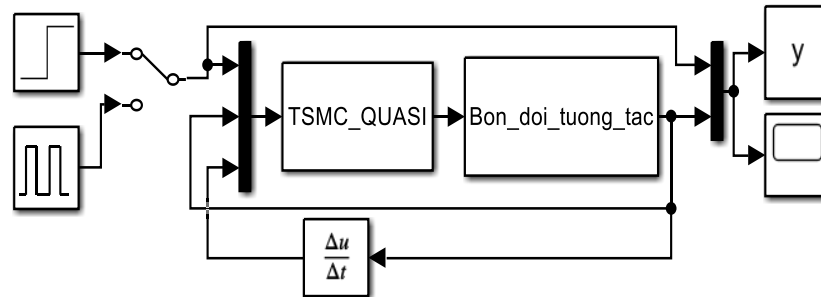
Vì thế, $p(t)$ được viết lại như (31):

$$p(t) = \begin{cases} e_0 + \dot{e}_0 t + \frac{1}{2} \ddot{e}_0 t^2 - \left(\frac{10}{T^3} e_0 + \frac{6}{T^2} \dot{e}_0 + \frac{3}{2T} \ddot{e}_0 \right) t^3 + \left(\frac{15}{T^4} e_0 + \frac{8}{T^3} \dot{e}_0 + \frac{3}{2T^2} \ddot{e}_0 \right) t^4 - \left(\frac{6}{T^5} e_0 + \frac{3}{T^4} \dot{e}_0 + \frac{1}{2T^3} \ddot{e}_0 \right) t^5, & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (31)$$

Từ phương trình (31), ta có $p(0) = e(0)$, $\dot{p}(0) = \dot{e}(0)$.

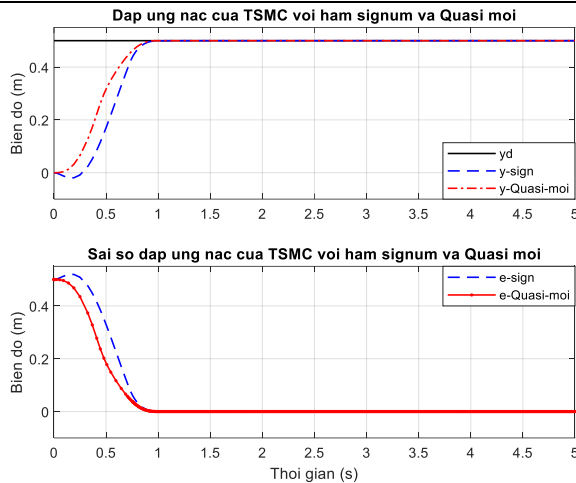
3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới (TSMC_Quasi) để điều khiển bám mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác trong MATLAB/Simulink được trình bày như Hình 3 sau:

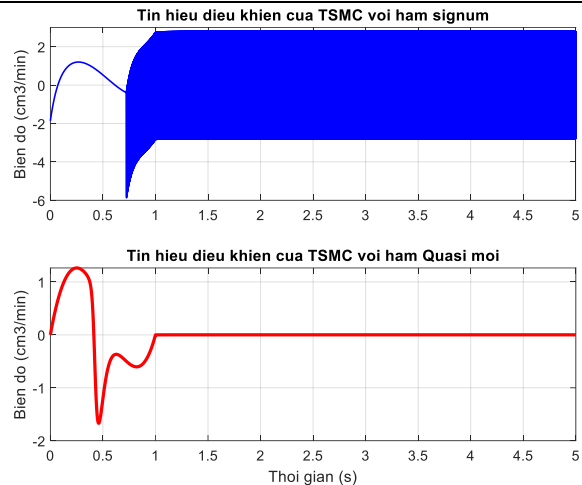


Hình 3. Sơ đồ mô phỏng TSMC_Quasi trong MATLAB/Simulink

Các thông số của hệ thống bồn đôi tương tác và bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới được sử dụng trong mô phỏng được trình bày như Bảng 1. Đáp ứng nấc và sai số của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và hàm Quasi mới được trình bày như Hình 4. Quan sát đáp ứng trên Hình 4, ta thấy rằng đáp ứng của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và hàm Quasi mới đều đưa vị trí mức chất lỏng thực tế hội tụ về vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn. Tuy nhiên, đáp ứng với hàm Quasi mới đạt được các chỉ tiêu chất lượng tốt hơn đáp ứng với hàm *signum* với thời gian tăng là 0.4054(s), thời gian xác lập là 0.8518(s), không có hiện tượng vọt lố và sai số xác lập tiến về 0, trong khi đó thời gian tăng, thời gian xác lập, độ vọt lố trên và độ vọt lố dưới của đáp ứng với hàm *signum* tương ứng là 0.4993(s), 0.8734(s), 0.0311(%) và 3.8699(%). Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và hàm Quasi mới với hàm nấc được trình bày như Bảng 2 và được so sánh với điều khiển trượt với điều kiện tích phân [11] và điều khiển trượt [13 – 15]. Trong đó, t_r là thời gian tăng, POT là độ vọt lố, e_{ss} là sai số xác lập và t_{ss} là thời gian xác lập.



Hình 4. Đáp ứng nấc và sai số của bộ điều khiển TSMC với hàm sigmoid và Quasi mới



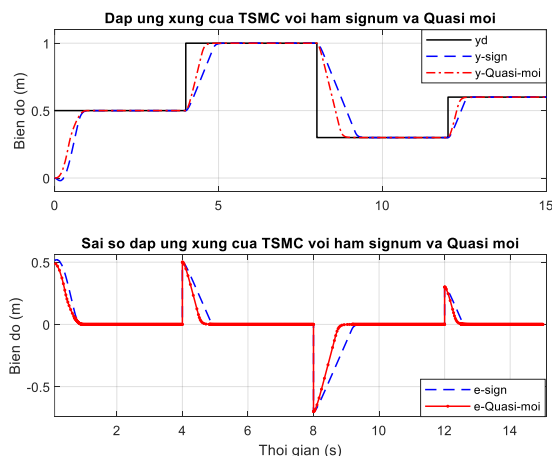
Hình 5. Tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển TSMC với hàm sigmoid và Quasi mới

Bảng 1. Các thông số của hệ thống bồn đôi tương tác và TSMC_Quasi

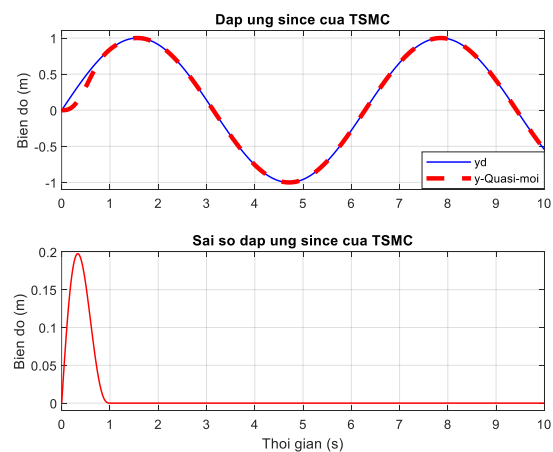
Thông số	A_1	A_2	R_1	R_2	T	q	η
Giá trị	0.0145	0.0145	1478.57	642.86	1	15	17
Đơn vị	m^2	m^2	sec/m^2	sec/m^2			

Bảng 2. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ TSMC với hàm sigmoid và Quasi mới với hàm nấc.

Bộ điều khiển	t_r (s)	POT (%)	e_{ss}	t_{ss} (s)
TSMC_Quasi	0.4054	0	0	0.8518
Điều khiển trượt [12 - 14]	-	0	-	7.6
Điều khiển trượt với điều kiện tích phân [10]	87.184	1.6	-	330

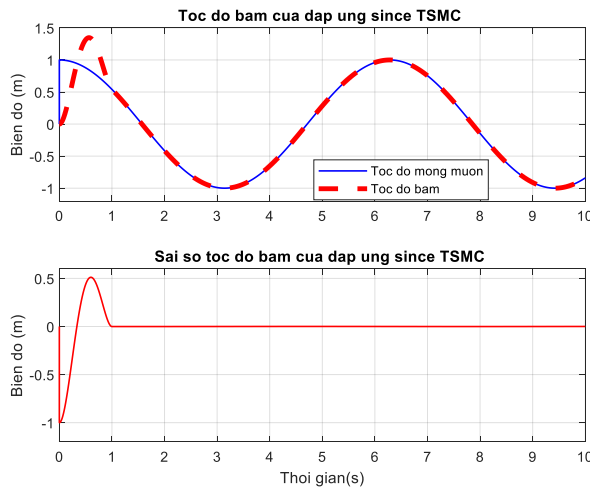


Hình 6. Đáp ứng xung và sai số của bộ điều khiển TSMC với hàm sigmoid và Quasi mới



Hình 7. Đáp ứng xung sin và sai số của bộ điều khiển TSMC với hàm Quasi mới

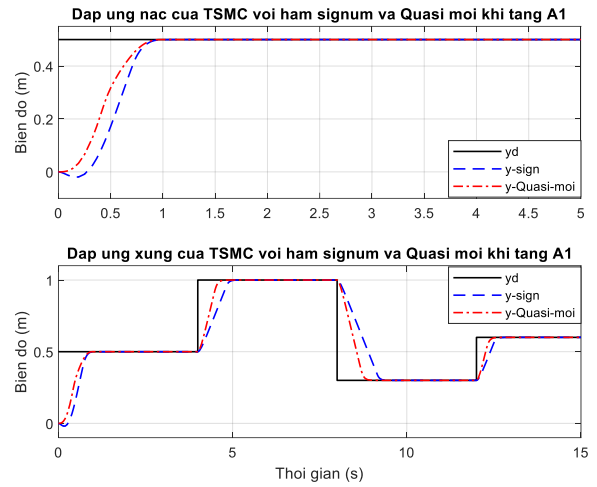
Đáp ứng xung vuông và sin cùng với sai số của phương pháp điều khiển đề xuất được trình bày như Hình 6 và 7. Qua đáp ứng và sai số thể hiện trên Hình 6 và 7 cho thấy rằng vị trí mức chất lỏng thực tế của hệ thống vẫn hội tụ về vị trí mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số xác lập tiến về 0, đồng thời đáp ứng của phương pháp đề xuất vẫn tốt hơn bộ điều khiển SMC với hàm sigmoid.



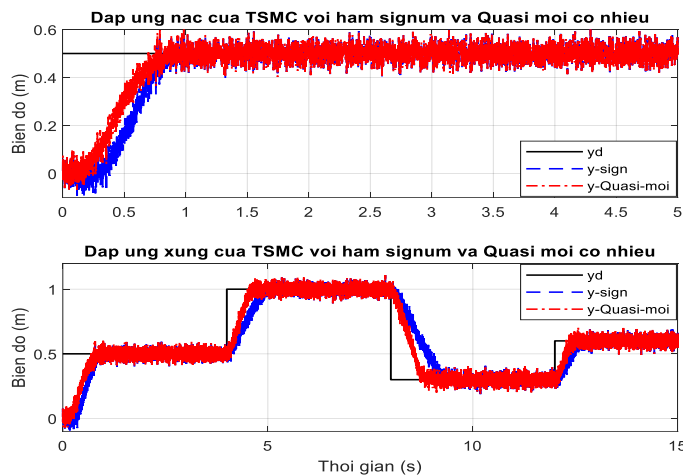
Hình 8. Vận tốc bám và sai số của bộ điều khiển TSMC với hàm Quasi mới

Vận tốc và sai số bám với ngõ vào xung sin của bộ điều khiển TSMC với hàm Quasi mới được trình bày trên Hình 8. Vận tốc bám ở Hình 8 hội tụ về vận tốc mong muốn trong khoảng thời gian 0.85(s) và sai số xác lập tiến về 0. Hình 9 trình bày đáp ứng nấc và xung của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và hàm Quasi mới khi A_1 được tăng 5 lần so với giá trị ban đầu. Đáp ứng thực tế của hệ thống trong trường hợp này vẫn tiến về vị trí tham chiếu với thời gian tăng là 0.4028(s), thời gian xác lập là 0.8512(s).

Bên cạnh đó, bộ điều khiển TSMC_Quasi được kiểm chứng khả năng bền vững với nhiễu tác động ở ngõ ra của hệ thống (nhiều trắng). Đáp ứng nấc và xung của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và hàm Quasi mới khi có nhiễu tác động ở ngõ ra được trình bày như Hình 10. Qua đáp ứng ở Hình 10 càng khẳng định thêm hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất so với bộ điều khiển SMC với hàm *signum*.



Hình 9. Đáp ứng nấc và xung của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và Quasi mới khi $A_1 = 5A_1$



Hình 10. Đáp ứng nấc và xung của bộ điều khiển TSMC với hàm *signum* và Quasi mới khi có nhiễu tác động ở ngõ ra

Qua các đáp ứng được thể hiện từ Hình 4 đến Hình 10 đã cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển TSMC_Quasi trong ứng dụng điều khiển vị trí mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác. Tính bền vững của phương pháp điều khiển đề xuất được kiểm chứng khi tăng diện tích của bồn 1 lên 5 lần và có sự tác động của nhiễu ở ngõ ra của hệ thống.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thiết kế bộ điều khiển trượt đầu cuối dựa vào hàm trượt Quasi mới để điều khiển vị trí mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác. Các đáp ứng của phương pháp điều khiển đề xuất đảm

bảo vị trí mức chất lỏng thực tế bám theo vị trí mong muốn trong thời gia hữu hạn, đồng thời hiện tượng chattering bị loại bỏ. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả, sự phù hợp và tính bền vững của phương pháp điều khiển đề xuất trong điều khiển bám vị trí mức chất lỏng hệ thống bồn đôi tương tác với thời gian tăng đạt 0.4054 (s), thời gian xác lập là 0.8518 (s), không có độ vọt lô, sai số xác lập hội tụ về 0 và loại bỏ được hiện tượng chattering. Kiểm nghiệm với mô hình thực tế và phát triển các giải thuật lai sẽ được nghiên cứu thực hiện trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] X. Yu, Y. Feng and Z. Man, "Terminal Sliding Mode Control – An Overview", in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, Vol. 2, pp. 36-52, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2020.3040412..
- [2] Doan, Quang V., Anh T. Vo, Tien D. Le, Hee-Jun Kang, and Ngoc H.A. Nguyen, "A Novel Fast Terminal Sliding Mode Tracking Control Methodology for Robot Manipulators", Applied Sciences, Vol. 10, No. 9, pp. 1 – 16, 2020, DOI: 10.3390/app10093010.
- [3] H. U. Suleiman, M. B. Mu'azu, T. A. Zarma, A. T. Salawudeen, S. Thomas and A. A. Galadima, "Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System", 2018 IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST), 2018, pp. 1-8, DOI: 10.1109/ICASTECH.2018.8506783.
- [4] Minh-Duc Tran and Hee-Jun Kang, "Nonsingular Terminal Sliding Mode Control of Uncertain Second-Order Nonlinear Systems", Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, pp. 1 – 9, 2015, DOI: 10.1155/2015/181737..
- [5] Wan L, Chen G, Sheng M, Zhang Y, Zhang Z, "Adaptive chattering-free terminal sliding-mode control for full-order nonlinear system with unknown disturbances and model uncertainties", International journal of advanced robotic systems, Vol. 17, No. 3, pp. 1 – 11, 2020, DOI:10.1177/1729881420925295.
- [6] S Balamurugan, P Venkatesh and M Varatharajan, "Fuzzy sliding-mode control with low pass filter to reduce chattering effect: an experimental validation on Quanser SRIP", Indian Academy of Sciences, Vol. 42, No. 10, pp. 1693–1703, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0722-9>.
- [7] Jinkun Liu, "Sliding mode control using MATLAB", Academic Press, 2017.
- [8] Nguyen, D.G.; Tran, D.T.; Ahn, K.K., "Disturbance Observer-Based Chattering-Attenuated Terminal Sliding Mode Control for Nonlinear Systems Subject to Matched and Mismatched Disturbances", Appl. Sci., Vol. 11, No. 17, pp. 1 – 23, 2021, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11178158>.
- [9] Trinh Luong Mien, "Liquid Level Control of Coupled-Tank System Using Fuzzy-Pid Controller", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 6, Issue 11, pp. 459 – 464, 2017.
- [10] S. B. Prusty, S. Seshagiri, U. C. Pati and K. K. Mahapatra, "Sliding mode control of coupled tank systems using conditional integrators", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol. 7, No. 1, pp. 118-125, 2020, DOI: 10.1109/JAS.2019.1911831.
- [11] B. Amarendra Reddy, P. Vamsi Krishna, "Comparison of Second Order Sliding Mode Control Strategies for Coupled Tank System", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Vol. 8, Issue-6S3, pp. 344 – 349, 2019.
- [12] Teena Toms and Hepsiba. D, "Comparison of PID Controller with a Sliding Mode Controller for a Coupled Tank System", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3, Issue. 2, pp. 151 – 154, 2014.
- [13] Miral Changela1, Ankit Kumar, "Designing a Controller for Two Tank Interacting System", International Journal of Science and Research (IJSR), Vol. 4, Issue 5, pp. 589 – 593, 2015.
- [14] V.R. Ravi, M. Monica, S. Amuthameena, S.K. Divya, S. Jayashree and J. Varshini, "Sliding mode controller for two conical tank interacting level system", Applied Mechanics and Materials, Vol. 573, pp. 273-278, 2014, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.573.273.
- [15] Mostafa A. Fellani, Aboubaker M. Gabaj, "PID Controller Design for Two Tanks Liquid Level Control System using Matlab", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 5, No. 3, pp. 436 – 442, 2015, DOI:10.11591/ijece.v5i3.pp436-442.
- [16] Fayiz Abu Khadra and Jaber Abu Qudeiri, "Second Order Sliding Mode Control of the Coupled Tanks System", Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, pp. 1 – 10, 2015, DOI:10.1155/2015/167852.
- [17] Jinkun Liu and Xinhua Wang, "Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems", Springer, 2012.
- [18] Zhuang Kai-yu, Su Hong-ye, Zhang Ke-qin and Chu Jian, "Adaptive terminal sliding mode control for high-order nonlinear dynamic systems", Journal of Zhejiang University Science, Vol.4, No.1, pp. 58 – 63, 2003, DOI: 10.1631/jzus.2003.0058.
- [19] Yaogang Ding, Chongxin Liu, Shengmin Lu and Ziwei Zhu, "Hyperbolic Sliding Mode Trajectory Tracking Control of Mobile Robot", Advances in Engineering Research, Volume 127, pp. 234 – 238, 2018, DOI:10.2991/eaeme-18.2018.49.



Thanh Tung Pham received BSc degree in EE at Mekong University in 2004, and MSc degree in Automation at Ho Chi Minh City University of Transportation in 2010. The degree of Ph.D. was awarded by the Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam, in 2019.

Since 2005, he has worked at Vinh Long University of Technical Education.

His research interests are modern control engineering, intelligent control and robot.



Chi-Ngon Nguyen received his BSc and MSc degree in Electronic Engineering at Can Tho University and Ho Chi Minh City University of Technology, in 1996 and 2001, respectively. The degree of Ph.D. was awarded by the University of Rostock, Germany, in 2007.

Since 1996, he has worked at Can Tho University. Currently, he is an associate professor in automation and Vice President of the School Council of Can Tho University. His research interests are intelligent control, medical control, pattern recognition, classifications, speech recognition and computer vision