

# NHẬN DẠNG VÀ ĐIỀU KHIỂN NHIỆT ĐỘ SỬ DỤNG SIMULINK DESKTOP REAL-TIME VÀ CARD PCIe-6321 CỦA NI

IDENTIFICATION AND CONTROL OF THERMAL PROCESS WITH SIMULINK DESKTOP REAL-TIME AND NI PCIe-6321

Phạm Văn Hùng\*, Phạm Văn Minh,  
Nguyễn Thu Hà, Trần Đức Hiệp, Nguyễn Bá Khả

## TÓM TẮT

Nhận dạng và điều khiển quá trình nhiệt độ là một trong những bài toán quan trọng lĩnh vực điều khiển quá trình. Trong thực tế, mô hình nhiệt độ thường được xác định bằng phương pháp nhận dạng dựa trên các dữ liệu vào/ra thu được từ quá trình thực nghiệm bởi một số thông số liên quan đến quá trình nhiệt độ khó xác định được một cách chính xác như hệ số truyền nhiệt. Thông thường, khi nhận dạng mô hình dựa trên đáp ứng quá độ thì mô hình quán tính bậc nhất có trễ được sử dụng để mô tả đối tượng nhiệt. Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ thực hiện nhận dạng mô hình nhiệt độ "CE103-Thermal Process Control" của hãng TecQuipment về cả dạng quán tính bậc 1 có trễ và quán tính bậc 2, dựa trên đáp ứng quá độ nhiệt thu thập được sử dụng card PCIe-6321 của NI (National Instruments) và tiến hành lựa chọn mô hình phù hợp để điều khiển thời gian thực quá trình nhiệt độ trên nền máy tính sử dụng toolbox "Simulink Desktop Real-Time" của Matlab/Simulink. Kết quả thu được trong quá trình nhận dạng và điều khiển nhiệt độ cho thấy tính khả thi của mô hình quán tính bậc 2 để xuất.

**Từ khóa:** Nhận dạng; điều khiển nhiệt độ; Simulink desktop real-time; CE103 Servo Trainer.

## ABSTRACT

Identification and control of thermal process is a very common problem in process control. In fact, the thermal model is identified based on input/output data obtained from the experimental process because some of the parameters related to the process are difficult to determine exactly like the heat transfer coefficient. Normally, when identifying a model based on transient response, the first order plus dead time is used to describe the thermal object. In this paper, we will use both first order plus dead time and second order model to identify "CE103-Thermal Process Control" model of TecQuipment based on the step responses obtained by using PCIe-6321 card of NI (National Instruments) and select the suitable model to control the thermal process in real-time based on PC with "Simulink desktop real-time" toolbox of Matlab/Simulink. The identification and control results have demonstrated the performance of the obtained model.

**Keywords:** Identification; thermal control; Simulink desktop real-time; CE103 Servo Trainer.

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: hungpv1812@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 18/8/2020

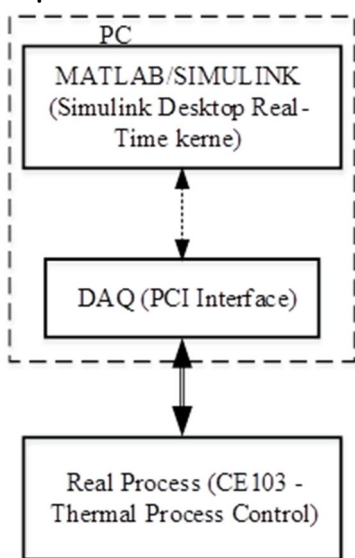
## 1. GIỚI THIỆU

Nhận dạng mô hình nhiệt độ dựa trên dữ liệu vào/ra thu được từ quá trình thực được đề cập đến ở nhiều công trình nghiên cứu. Trong tài liệu [8], nhóm tác giả sử dụng phương pháp nhận dạng đa mô hình dựa trên mô hình tuyến tính ARMAX để mô tả đặc tính phi tuyến của quá trình nhiệt. Cũng dựa trên quan hệ giữa tín hiệu vào/ra dạng rời rạc và sử dụng bộ điều khiển PID, tài liệu [9] tiến hành nhận dạng online quá trình nhiệt độ sử dụng mô hình ARX. Phương pháp không gian con kết hợp với điều khiển dự báo được sử dụng để nhận dạng và điều khiển mô hình nhiệt dạng mô hình trạng thái được trình bày trong tài liệu [10]. Các phương pháp này cho chất lượng nhận dạng và điều khiển tốt nhưng cần sử dụng các kỹ thuật phức tạp và khối lượng tính toán lớn. Một phương pháp đơn giản hơn được áp dụng khá phổ biến trong lĩnh vực công nghiệp để nhận dạng các quá trình nhiệt là phương pháp nhận dạng dựa trên đặc tính quá độ. Theo đó, mô hình liên tục có tham số được dùng để mô tả đối tượng dưới dạng hàm truyền có thể xác định từ hàm quá độ  $h(t)$  thu được tại đầu ra nhờ phương pháp nhận dạng chủ động với tín hiệu kích thích đầu vào là hàm Heaviside  $1(t)$ . Dựa trên đáp ứng quá độ, trong [11] nhóm tác giả tiến hành xấp xỉ đáp ứng quá độ của nhiệt độ để thu được mô hình quán tính bậc 1 có trễ và ổn định nhiệt độ bằng bộ điều khiển PID với luật PI. Trong khi đó, tài liệu [12] lại sử dụng mô hình quán tính bậc 1 để mô tả và sử dụng bộ điều khiển PID thích nghi để điều khiển quá trình nhiệt. Tuy nhiên, thông thường đáp ứng quá độ của quá trình nhiệt độ có dạng ổn định hình chữ "S" (xuất phát từ gốc và tiến tới giá trị xác lập, như hình 4). Do vậy đối tượng này ngoài được mô hình hóa về khâu quán tính bậc nhất có trễ [1, 2, 3] còn có thể được mô hình hóa về dạng khâu quán tính bậc cao [4]. Với mục tiêu thu được một mô hình đơn giản biểu diễn quá trình nhiệt (mô hình CE103 của TecQuipment trong phòng thí nghiệm) phục vụ nghiên cứu phân tích và thiết kế giải thuật điều khiển, trong bài báo chúng tôi tiến hành nhận dạng dựa trên đáp ứng quá độ để thu được mô hình nhiệt dạng quán tính bậc 1 có trễ thông thường và cả dạng bậc cao (cụ thể là bậc 2) qua đó lựa chọn mô hình cho đáp ứng gần với đặc tính quá

độ thực nhất và tiến hành điều khiển thời gian thực hệ thống trên nền máy tính thông qua Simulink Desktop Real-Time và card PCIe-6321.

Simulink Desktop Real-Time [5] là một toolbox bao gồm nhiều khối chức năng để kết nối với nhiều thiết bị vào/ra của nhiều hãng như National Instruments, Humosoft, Quanser... nhằm thực hiện bài toán thu thập dữ liệu và điều khiển thời gian thực. Toolbox này cho phép Simulink kết nối và thực hiện điều khiển hệ thống thực từ máy tính cá nhân với chu kỳ trích mẫu lên tới 1kHz ở chế độ thông thường và 20kHz với thư viện Simulink Coder™. Tiếp theo đây nhóm tác giả sẽ sử dụng công cụ này để kết nối nhận dạng và điều khiển mô hình thực CE103 của TecQuipment thông qua card PCIe-6321 của NI.

**2. MÔ HÌNH NHIỆT ĐỘ VÀ NHẬN DẠNG ĐỐI TƯỢNG TỬ ĐẶC TÍNH QUÁ ĐỘ**



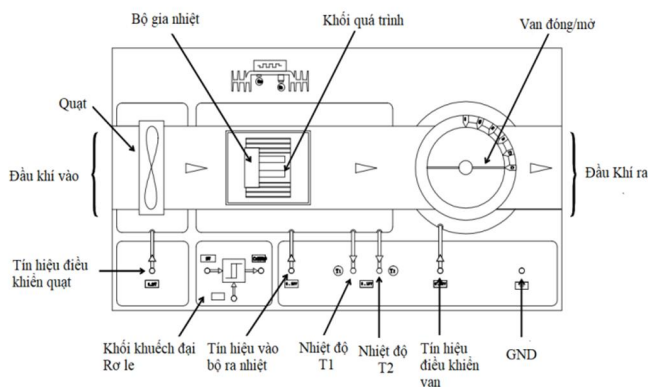
Hình 1. Cấu trúc nhận dạng và điều khiển nhiệt độ trên nền Matlab/Simulink

Cấu trúc hệ thống được dùng để nhận dạng và điều khiển trên nền Matlab/Simulink thông qua bộ thu thập dữ liệu DAQ (Data Acquisition) sử dụng card PCIe-6321 như ở hình 1.

Để thực hiện các ứng dụng thời gian thực thì Matlab và PC cần phải được đồng bộ, ở bài báo này nhóm tác giả tiến hành cài đặt Simulink Desktop Real-Time kernel để đồng bộ xung nhịp giữa Matlab và PC, từ đó sử dụng các thư viện trong Simulink Desktop Real-Time để thu thập dữ liệu và điều khiển quá trình thực.

**2.1. Giới thiệu mô hình nhiệt độ CE103-Thermal Process Control**

Mô hình CE103 (hình 2) gồm một bộ gia nhiệt tín hiệu điều khiển từ 0,10V để tạo năng lượng nhiệt cho hệ thống và hệ thống quạt, van đóng/mở để thay đổi lưu lượng khí nóng trong ống dẫn khí. Nhiệt độ đầu ra T<sub>1</sub> (tại khối gia nhiệt) và T<sub>2</sub> (tại tấm kim loại gắn với khối gia nhiệt) được đo bởi cảm biến nhiệt điện trở Platinum (được căn chỉnh tỉ lệ 0,1V/°C ứng với dải đo 0 - 100°C).



Hình 2. Mô hình nhiệt độ CE103-Thermal Process Control của TecQuipment

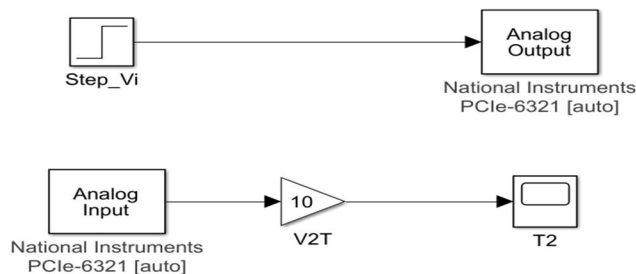
Mô hình CE103 được thiết kế để quan hệ giữa lưu lượng nhiệt q<sub>v</sub> và điện áp điều khiển v<sub>i</sub>, cũng như đặc tính chuyển đổi cảm biến nhiệt là tuyến tính thì theo [6] hàm truyền đạt ứng với đầu ra T<sub>1</sub> là:

$$T_1(s) = \frac{G}{1 + \tau s} v_i(s) \tag{1}$$

Đầu ra nhiệt độ T<sub>2</sub> đặc trưng cho quá trình truyền nhiệt qua tấm cách nhiệt có hàm truyền:

$$T_2(s) = \frac{G'}{(1 + \tau s)(1 + \tau' s)} v_i(s) \tag{2}$$

**2.2. Thu thập dữ liệu và nhận dạng mô hình nhiệt độ T<sub>2</sub>**



Hình 3. Sơ đồ thu thập dữ liệu nhiệt độ trên Simulink

Để thu thập dữ liệu đầu ra nhiệt độ nhằm xây dựng đáp ứng quá độ nhiệt độ thì sơ đồ Simulink được sử dụng như hình 3 và kết nối phần cứng khối thu thập dữ liệu DAQ với mô hình thực theo cấu trúc hình 1. Trong đó, cấu hình khối "Analog input" và "Analog output" trong thư viện "Simulink desktop real-time" giao tiếp với card PCIe-6321 với chu kỳ trích mẫu T<sub>s</sub> = 1s và đầu vào kích thích hệ thống là khối "Step" với độ lớn v<sub>i</sub> = 1V..

Với đáp ứng nhiệt độ thu được như ở hình 4, có thể thấy đáp ứng dạng ổn định, xuất phát từ gốc tọa độ và có đạo hàm tại gốc tọa độ bằng không do vậy theo các tài liệu [1, 2, 3] mô hình nhiệt độ  $T_2$  có thể đưa về dạng khâu quán tính bậc 1 có trễ hoặc khâu quán tính bậc 2 theo tài liệu [4].

**2.2.1. Nhận dạng về khâu quán tính bậc nhất có trễ**

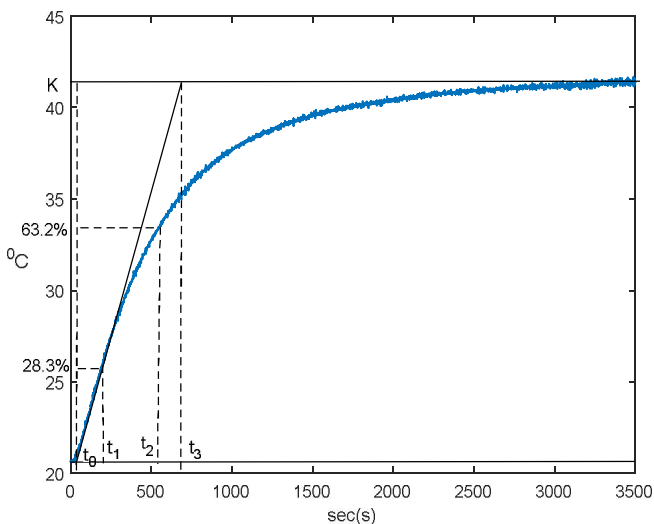
Theo tài liệu [1, 3] đối tượng có đáp ứng quá độ khi kích thích đầu vào là xung dạng bước nhảy như ở hình 4 có thể biểu diễn dưới dạng khâu quán tính bậc 1 dạng:

$$G(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \tag{3}$$

Ở đây, K là hệ số khuếch đại, T là hằng số thời gian và L là thời gian trễ được xác định dựa trên hai điểm quy chiếu là thời gian  $t_1, t_2$  ứng với thời điểm đặc tính quá độ có giá trị là 28,3% và 63,2% của giá trị xác lập.

Dựa trên số liệu thu thập được (hình 4) thì  $t_1 = 215,3s$ ,  $t_2 = 524,5s$  và  $K = \frac{41,38 - 20,64}{1} = 20,74$

nên  $T = 1,5(t_2 - t_1) = 463,8(s)$ ,  $L = 1,5(t_1 - \frac{t_2}{3}) = 60,7(s)$



Hình 4. Đặc tính quá độ nhiệt độ  $T_2$  ứng với giá trị đầu vào 1V

Do vậy, mô hình quán tính bậc 1 có trễ của  $T_2$  là:

$$G_1(s) = \frac{20,74}{1+463,8s} e^{-60,7s} \tag{4}$$

Ngoài ra, mô hình quán tính bậc nhất có trễ của nhiệt độ  $T_2$  dạng (1) có thể xác định theo phương pháp kẻ tuyến tính với đặc tính quá độ tại điểm uốn như đề cập trong tài liệu [2]. Theo đó thời gian trễ L có giá trị là 27,63 (giao điểm của đường tiếp tuyến với trục hoành), còn hằng số thời gian T xác định từ  $t_3$  theo công thức:

$$T = t_3 - L = 713,68 - 27,63 = 686,05$$

hoặc xác định từ  $t_{63\%}$  (thời gian ứng với giá trị đáp ứng đầu ra đạt 63% giá trị xác lập)

$$T = t_{63\%} - L = 520,8 - 27,63 = 493,17$$

Do vậy, mô hình nhiệt độ  $T_2$  có thể xấp xỉ về một trong hai hàm truyền sau:

$$G_2(s) = \frac{20,74}{1+686,05s} e^{-27,63s} \tag{5}$$

hoặc

$$G_3(s) = \frac{20,74}{1+493,17s} e^{-27,63s} \tag{6}$$

**2.2.2. Nhận dạng về khâu quán tính bậc hai**

Theo [4] đối tượng có đặc tính quá độ như hình 4 có thể được biểu diễn dưới dạng khâu quán tính bậc cao, trong phần tiếp theo nhóm tác giả sẽ nhận dạng đối tượng nhiệt độ về dạng khâu quán tính bậc hai như sau:

$$G_4(s) = \frac{K}{(1+T's)(1+T''s)} \tag{7}$$

Trong đó,  $T', T''$  được xác định dựa trên  $t_0, t_3$  thu được từ việc kẻ tiếp tuyến với đặc tính quá độ tại điểm uốn như hình 4 theo các bước sau:

Bước 1: Tìm x thỏa mãn  $0 < x < 1$  và  $x \frac{x}{1-x} \frac{x \ln x + x^2 - 1}{x - 1} = \frac{a}{b}$

với  $a = t_0, b = t_3 - t_0$

Bước 2: Tính  $T'$  theo công thức  $T' = \frac{b}{x^{x-1}}$

Bước 3: Tính  $T''$  theo công thức  $T'' = xT'$

Thuật toán tính  $T', T''$  được nhóm tác giả cụ thể hóa trong hàm PT2.m viết trong Matlab như sau:

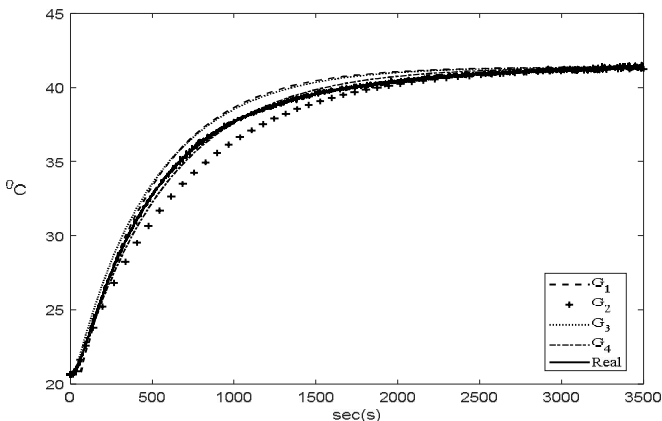
```
function [T1,T2]=PT2(a,b)
adivb=a/b;
if ((0<adivb)&&(adivb<0.103648))
x=x_adivb(adivb);
T1=b/(x^(x/(x-1)));
T2=x*T1;
end
end

function [x]=x_adivb(adivb)
x1=0;x2=1;err=0.00001;f2=100000;
while abs(f2-adivb)>err
x=(x1+x2)/2.;
mu=x^(x/(1-x));
f2=(mu*(x*log(x)+x*x-1)/(x-1))-1;
if adivb<f2
x2=x;
else
x1=x;
end
end
end
```

Với  $a = t_0 = 27,63$ ,  $b = t_3 - t_0 = 686,05$ , thực hiện thuật toán cài đặt trong PT2.m thì mô hình nhiệt độ có dạng khâu quán tính bậc 2 như ở công thức (7) với  $T' = 560,025$ ,  $T'' = 39,99$ , hay

$$G_4 = \frac{20,74}{(560,025s + 1)(39,99s + 1)} \tag{8}$$

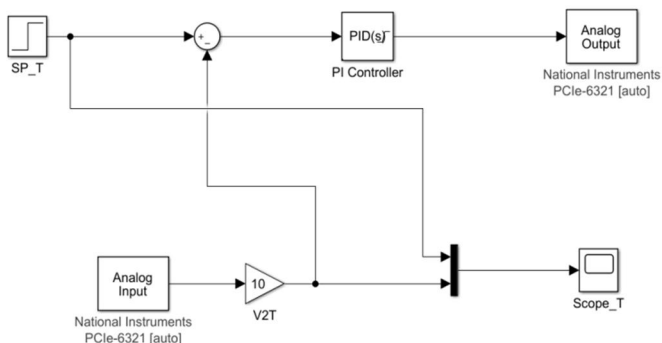
Như vậy, với dữ liệu thu thập được từ thực nghiệm, sử dụng các phương pháp nhận dạng dựa trên đáp ứng quá độ khác nhau ta thu được 4 hàm truyền  $G_1, G_2, G_3, G_4$  có thể dùng làm mô hình đối tượng nhiệt độ  $T_2$ . Việc biểu diễn đáp ứng quá độ của hệ ứng với các hàm truyền này và đáp ứng quá độ thực trên cùng hình vẽ (hình 5), cho thấy đường đặc tính ứng với mô hình đối tượng  $G_4$  (đường chấm gạch "-.-") bám sát đường đường đặc tích thực (đường nét liền) nhất. Tiếp theo nhóm tác giả sẽ tiến hành kiểm chứng tính khả thi của mô hình thu được thông qua việc sử dụng mô hình (8) để điều khiển nhiệt độ  $T_2$  trong trường hợp giá trị đặt nhiệt độ thay đổi và trường hợp có ảnh hưởng của nhiễu.



Hình 5. So sánh đáp ứng quá độ của hệ ứng với hàm truyền  $G_1, G_2, G_3, G_4$  và đáp ứng nhiệt độ thực thu được từ thực nghiệm

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ THỰC NGHIỆM TRÊN MÔ HÌNH THỰC

Để điều khiển quá trình nhiệt độ có mô hình dạng khâu quán tính bậc 2 nhận dạng được như biểu diễn ở (8) nhóm tác giả sử dụng bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative) với luật điều khiển PI được thiết kế theo phương pháp tối ưu modun được trình bày trong tài liệu [7].



Hình 6. Điều khiển Real-Time quá trình nhiệt “CE103-Thermal Process Control” với bộ điều khiển PI

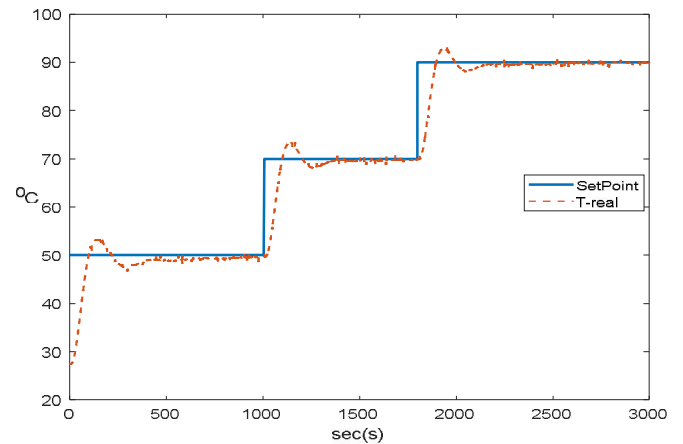
Bộ điều khiển PID được sử dụng rất phổ biến trong công nghiệp bởi tính đơn giản trong thiết kế và chỉnh định. Theo tài liệu [7] bộ điều khiển cho mô hình (8) có dạng:

$$R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \tag{9}$$

Trong đó hệ số tỉ lệ  $k_p$  và thời gian tích phân  $T_i$  xác định theo phương pháp tối ưu modun:

$$T_i = T' = 560,025, k_p = \frac{T'}{2KT''} = 0,3376$$

Cài đặt điều khiển trên mô hình “CE103-Thermal Process Control” với sơ đồ điều khiển như hình 6 với các giá trị đặt nhiệt độ khác nhau thu được đáp ứng nhiệt độ như ở hình 7.

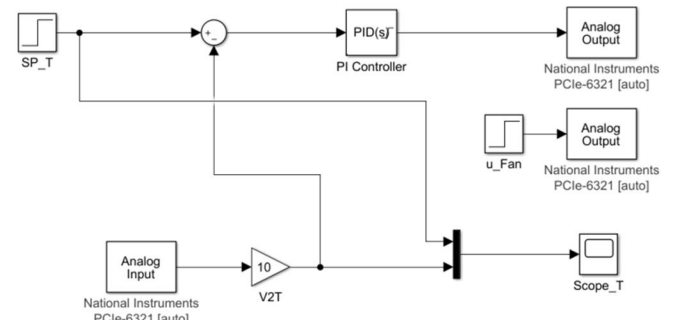


Hình 7. Đáp ứng đầu ra nhiệt độ  $T_2$  ứng với các giá trị đặt khác nhau

Đáp ứng đầu ra nhiệt độ  $T_2$  khi thay đổi giá trị đặt lần lượt  $50^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}$  cho thấy bộ điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình nhận dạng (8) khi áp dụng vào điều khiển đối tượng thực cho chất lượng điều khiển bám khá tốt, với thông số chất lượng thể hiện cụ thể ở bảng 1.

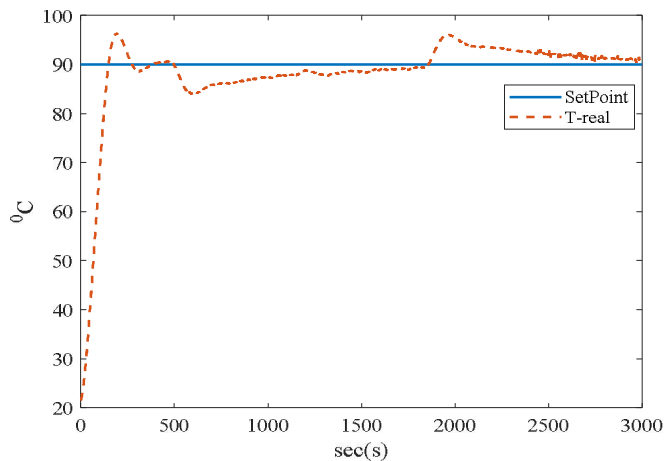
Bảng 1. Thông số chất lượng của hệ thống với bộ điều khiển thiết kế dựa trên mô hình nhận dạng (8) khi giá trị đặt thay đổi

	Giá trị đặt $50^\circ\text{C}$	Giá trị đặt $70^\circ\text{C}$	Giá trị đặt $90^\circ\text{C}$
Độ quá điều chỉnh	6,84%	6,48%	5,56%
Thời gian xác lập	310,05	81,3	64,45
Sai lệch tĩnh	0,2	0,19	0,05



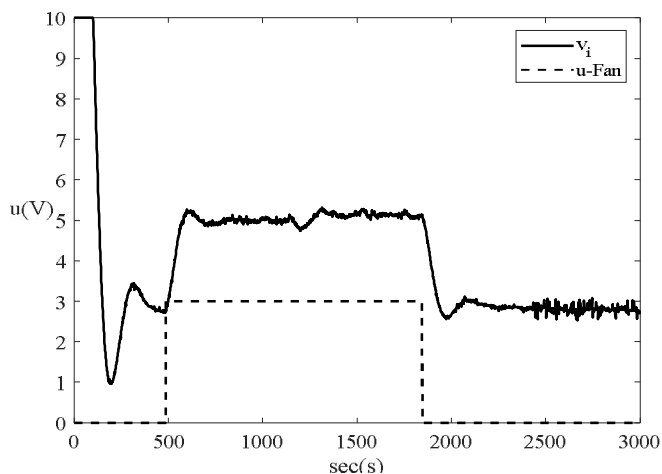
Hình 8. Điều khiển Real-Time quá trình nhiệt “CE103-Thermal Process Control” xét tới ảnh hưởng của nhiễu

Để kiểm nghiệm tính bền vững của bộ điều khiển, ta xét hệ thống trong trường hợp bị ảnh hưởng bởi nhiễu, cụ thể là nhiễu do quạt thay đổi lưu lượng không khí vào làm mát hệ thống với sơ đồ điều khiển như hình 8.



Hình 9. Đáp ứng đầu ra nhiệt độ  $T_2$  khi thay đổi tốc độ quạt làm mát

Đáp ứng của hệ thống (hình 9) và tín hiệu điều khiển (hình 10) cho thấy, khi hệ đang làm việc ổn định ở 90°C bị tác động bởi nhiễu do quạt làm mát gây ra (công suất tải 30% tại thời điểm 486s) thì nhiệt độ đầu ra giảm do ảnh hưởng bởi lưu lượng khí mát thổi qua ống dẫn nhiệt. Để bù lại lượng nhiệt này, tín hiệu điều khiển bộ gia nhiệt tăng lên và sau 197s quá độ hệ thống lại trở lại ổn định. Tương tự tại thời điểm  $t = 1845s$  nhiễu không tác động (quạt làm mát tắt) tín hiệu điều khiển bộ gia nhiệt giảm dần, tuy nhiên vẫn lớn hơn giá trị điều khiển xác lập tại điểm làm việc 90°C nên nhiệt độ của hệ thống tăng lên (quá độ) và sau 173s hệ thống lại trở lại ổn định. Như vậy, với tác động của nhiễu bộ điều khiển thiết kế theo mô hình nhận dạng được vẫn điều khiển hệ mô hình thực với chất lượng điều khiển khá tốt.



Hình 10. Tín hiệu hiệu điều khiển thiết bị gia nhiệt và quạt làm mát (nhiễu)

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thu thập dữ liệu sử dụng card PICE-6321 của NI, thực hiện nhận dạng hệ thống dựa trên đáp ứng quá độ và lựa chọn được mô hình cho kết quả bám đặc tính thực của hệ thống nhất là khâu quán tính bậc 2. Cũng như tiến

hành kiểm nghiệm mô hình thu được thông qua việc sử dụng mô hình để thiết kế bộ điều khiển cho mô hình thực “CE103-Thermal Process Control” của hãng TecQuipment. Kết quả thực nghiệm điều khiển thời gian thực trên mô hình thực với Simulink Sestktop Real-Time trong trường hợp có nhiễu và không có nhiễu với chất lượng điều khiển khá tốt cho thấy mô hình nhận dạng được có khả năng sử dụng để phân tích và điều khiển hệ thống.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. E.F. Camacho, C. Bordons, 2007. *Model Predictive Control*. Springer.
- [2]. K. J. Astrom, T. Hagglund, 1995. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, 1995.
- [3]. Ján Mikles, Miroslav Fikar, 2007. *Process Modelling, Identification, and Control*. Springer.
- [4]. Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, 2005. *Nhận dạng hệ thống điều khiển*. Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
- [5]. The MathWorks, Inc, 2019, *Simulink® Desktop Real-Time™ User's Guide R2019b*.
- [6]. TecQuipment, 2016, *CE103 Thermal Process Control*. ©TecQuipment Ltd.
- [7]. Nguyễn Doãn Phước, 2009. *Lý thuyết điều khiển tự động*. Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
- [8]. A. Aminzadeh, A. A. Safavi, A. Khayatian, 2005. *Real-Time Control and Identification of a Thermal Process Based on Multiple-Modeling Approach*. Dev. Chem. Eng. Mineral Process. 13(3/4), pp. 221-232.
- [9]. Chalupa Petr, Bařinová Michaela, Novák Jakub, Beneš Martin, 2015. *Control system for chemical thermal processes and its usage for measurement of collagen shrinkage temperature*. WSEAS Transactions on Systems and Control, vol. 10, p. 445-452.
- [10]. Knudsen M.D., Hedegaard R.E., Pedersen T.H., Petersen S., 2017. *System identification of thermal building models for demand response - A practical approach*. Energy Procedia, 122, pp.937-942.
- [11]. Tapák P., Huba M., 2016. *Laboratory model of thermal plant identification and control*. IFAC-PapersOnLine, 49(6), pp.28-33.
- [12]. Nguyễn Trường Sanh, Nguyễn Chí Ngôn, 2017. *Thiết kế bộ nhận dạng và điều khiển thông minh lò nhiệt*. Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ số 53a: 29-37.

#### AUTHORS INFORMATION

**Pham Van Hung, Pham Van Minh,  
Nguyen Thu Ha, Tran Duc Hiep, Nguyen Ba Kha**

Faculty of Electrical Engineering Technology, Hanoi University of Industry