

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID BỀN VỮNG TRONG ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH NHIỆT ĐỘ THIẾT BỊ TRAO ĐỔI NHIỆT

A STUDY ON THE APPLICATION OF ROBUST PID CONTROLLER TO THE STABILITY FOR TEMPERATURE CONTROL OF HEAT EXCHANGER DEVICES

Lê Tấn Duy¹, Huỳnh Đức Hòa²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: letanduy@ud.edu.vn

²Trường Cao đẳng Nghề Quảng Nam; Email: duchoacdn@gmail.com

Tóm tắt: Ngày nay, thiết bị trao đổi nhiệt được sử dụng rộng rãi trong các nhà máy. Nhiệm vụ chính của thiết bị trao đổi nhiệt là truyền nhiệt từ gas nóng sang chất lỏng làm mát để ngưng tụ. Để điều khiển nhiệt độ chất lỏng đầu ra của thiết bị trao đổi nhiệt thì bộ điều khiển PID thông thường có thể sử dụng. Tuy nhiên, các bộ điều khiển này chưa tối ưu hoặc ít bền vững đối với sự thay đổi tham số trong quá trình hoạt động. Bài báo này giới thiệu phương pháp thiết kế bộ điều khiển PID bền vững nhằm ổn định nhiệt độ chất lỏng tại giá trị đặt trong khoảng thời gian ngắn nhất của thiết bị trao đổi nhiệt. Bộ điều khiển thiết kế theo các phương pháp: Tyreus - Luyben, dựa trên IMC, thuật toán dự báo Smith và bộ điều khiển PID mờ. Kết quả mô phỏng cho thấy tín hiệu điều khiển của bộ dự báo Smith và PID mờ có độ quá điều chỉnh là không và sai lệch tĩnh của hệ thống tiến về không.

Từ khóa: điều khiển quá trình; thiết bị trao đổi nhiệt; điều khiển dự báo Smith; điều khiển mờ; mô phỏng.

1. Đặt vấn đề

Cho đến nay điều khiển quá trình không phải là một lĩnh vực mới, nhưng nó luôn chiếm vị trí quan trọng trong tự động hóa các ngành công nghiệp. Đứng trước yêu cầu ngày càng cao của xã hội, buộc chúng ta phải đưa ra những thiết kế quá trình công nghệ mới thích hợp hơn và những yêu cầu cao hơn cho hệ thống điều khiển tự động nhằm giảm tiêu thụ nhiên liệu, nâng cao chất lượng, tăng năng suất và hạ giá thành sản phẩm. Trong thực tế các thiết bị trao đổi nhiệt kiểu hóa lỏng (ngưng tụ) dùng rất nhiều như: trong sản xuất hóa chất, các hệ thống máy lạnh thương mại và công nghiệp, dây chuyền sản xuất bia, nước ngọt... Để điều khiển tự động cho các thiết bị trao đổi nhiệt thì bài toán điều khiển nhiệt độ là phổ biến và được quan tâm hàng đầu.

Hiện nay, trong điều khiển nhiệt độ ngoài bộ điều khiển PID kinh điển thì các phương pháp điều khiển hiện đại khác như bộ điều khiển PI dự báo của Smith, điều khiển mờ, sự kết hợp giữa PID và mờ... có vai trò quyết định đến sự ổn định bền vững, giảm mức độ tiêu hao năng lượng, tăng chất lượng sản phẩm và tuổi thọ của thiết bị trong các nhà máy. Đề tài này thực hiện nghiên cứu thiết kế các bộ điều khiển PI, PID theo nhiều phương pháp khác nhau và bộ PI - Mờ để lựa chọn ra được bộ điều khiển mới và phù hợp nhất trong điều khiển bền vững ổn định nhiệt độ thiết bị trao đổi nhiệt.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Cơ sở chung

Thiết bị trao đổi nhiệt dùng để hóa lỏng gas trong các hệ thống lạnh (thiết bị ngưng tụ) là thiết bị mà trong đó hơi môi chất lạnh (gas lạnh) có áp suất cao và nhiệt độ

Abstract: Nowadays, heat exchanger devices are widely used in factories. The main task of a heat exchanger device is to transfer heat from hot gas to cool fluid for condensation. To control the temperature of outlet fluid of heat exchanger devices, the conventional PID controller can be used. However, these controllers are not optimal or less robust with the variation of parameters in operation. This paper presents a design method of robust PID controllers in order to stabilize the temperature of the outgoing fluid to a desired set point in the shortest possible time of the heat exchanger devices. The PID controllers are designed to select from the methods: Tyreus - Luyben, based on the Internal Model Control (IMC), Smith predictor algorithms and the PID fuzzy controller. The simulation results show that the overshoot of control signals of the PID fuzzy and Smith predictor algorithms are zero and erroneous tracking system toward zero.

Key words: Process controller; heat exchanger devices; Smith predictor; fuzzy control; simulation.

cao được làm mát bằng nước hoặc không khí có nhiệt độ thấp hơn để ngưng tụ thành lỏng [1].

Lưu lượng nước giải nhiệt của thiết bị trao đổi nhiệt

$$[1], [2]: G_w = \frac{Q_K}{C_w \Delta t_w}; \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (1)$$

Trong đó: Q_K là phụ tải nhiệt của thiết bị trao đổi nhiệt, (kW); Theo [1, Bảng 7-2] ta chọn phụ tải nhiệt theo thực tế của thiết bị trao đổi nhiệt kiểu bình ngưng tụ (hãng Guntner, Đức): $Q_K = 345,8$ kW.

C_w : Nhiệt dung riêng của nước;

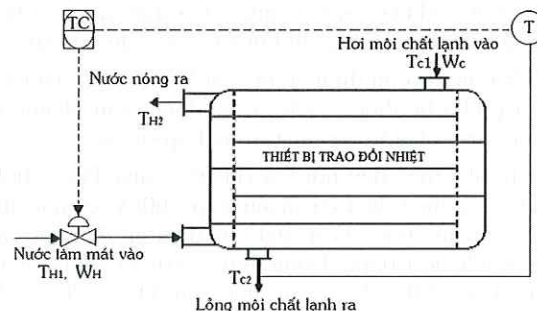
$$C_w = 4,186 \text{ (kJ/kg.K)} [1]$$

Δt_w : Độ chênh nhiệt độ của nước vào và ra khỏi thiết bị, (K); ta chọn $\Delta t_w = 6$ K [1], [2].

Vậy ta có:

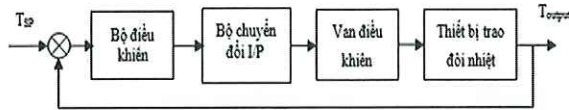
$$G_w = \frac{Q_K}{C_w \Delta t_w} = \frac{345,8}{4,186.6} = 13,8 \left(\frac{kg}{s} \right) \approx 50 \left(\frac{T}{h} \right) \quad (2)$$

Xây dựng mô hình điều khiển nhiệt độ tổng quát của đề tài như ở Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển thiết bị trao đổi nhiệt

Từ sơ đồ điều khiển của thiết bị trao đổi nhiệt, ta xây dựng được cấu trúc điều khiển của hệ thống dạng khối được biểu diễn như ở hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển

- Nhiệt độ ngưng tụ của môi chất ra khỏi thiết bị [3]: $T_{SP} = 35^{\circ}\text{C}$.

2.2. Xây dựng các hàm truyền

2.2.1. Hàm truyền đạt của bộ chuyển đổi dòng điện/ khí nén

Ta chọn thiết bị chuyển đổi dòng điện / khí nén KP200 của hãng (Yokogawa) có tín hiệu vào là dòng điện $(4 \div 20)$ mA và tín hiệu ra là áp suất khí nén P $(3 \div 15)$ PSI [4], [10].

Như vậy, thiết bị này có hàm truyền là một khâu khuếch đại được xác định như sau:

$$K = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta I_{\max}} = \frac{15-3}{20-4} = 0,75 \left(\frac{\text{PSI}}{\text{mA}} \right) \quad (3)$$

2.2.2. Hàm truyền đạt của van

Trong thực tế, hàm truyền đạt của van thường được coi là khâu quán tính bậc nhất có trễ, lấy gần đúng thì xem là khâu quán tính bậc nhất [4]:

$$W_v(s) = \frac{K_v}{T_v s + 1} \quad (4)$$

Trong đó: K_v là hệ số khuếch đại của van. T_v là hằng số thời gian của van, ta chọn $T = 5\text{s}$.

Khi tín hiệu vào thay đổi $(3 \div 15)$ PSI thì độ mở của van thay đổi từ $(0 \div 100)\%$, khi đó hệ số khuếch đại được xác định như sau:

$$K_v = \frac{100-0}{15-3} = 8,4 \quad (5)$$

Khi độ mở thay đổi $(0 \div 100)\%$ thì lưu lượng nước qua van thay đổi $(0 \div 50)$ T/h. Từ đó ta có hệ số truyền của sự liên hệ giữa lưu lượng qua van và độ mở của van là:

$$K_r = \frac{50}{100} = 0,5 \quad (6)$$

Kết hợp các hàm truyền trên với tín hiệu vào là áp suất khí nén và tín hiệu ra là lưu lượng nước qua cơ cấu van điều khiển, ta xác định được hàm truyền đạt của van như sau:

$$W_{v-r}(s) = \frac{4,2}{5s + 1} \quad (7)$$

2.2.3. Hàm truyền đạt của thiết bị trao đổi nhiệt

Khi độ mở của van thay đổi $(0 \div 100)\%$ thì lưu lượng nước qua van thay đổi tương ứng từ $(0 \div 50)$ T/h, nhiệt độ của thiết bị trao đổi nhiệt thường thay đổi $(25 \div 45)^{\circ}\text{C}$. Thực tế, thường người ta xem hàm truyền đạt của đối tượng này là một khâu quán tính bậc nhất có trễ [4], [6]:

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta_0 s}}{Ts + 1} \quad (8)$$

Trong đó: K là hệ số khuếch đại.

θ_0 là thời gian trễ của quá trình điều khiển, ta chọn $\theta_0 = 25\text{s}$.

T là hằng số thời gian của quá trình điều khiển, ta chọn $T = 100\text{s}$.

Hệ số khuếch đại K được xác định như sau:

$$K = \frac{45 - 25}{50} = 0,4 \left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{T/h}} \right) \quad (9)$$

Khâu trễ $e^{-\theta_0 s}$ có thể biến đổi gần đúng như [5]:

$$e^{-\theta_0 s} = e^{-25s} = \frac{1}{1 + 25s} \quad (10)$$

Vậy hàm truyền của thiết bị trao đổi nhiệt là:

$$W(s) = \frac{0,4}{(1+25s)(1+100s)} = \frac{0,4}{2500s^2 + 125s + 1} \quad (11)$$

2.2.4. Hàm truyền của thiết bị đo nhiệt độ/bộ chuyển đổi từ nhiệt độ sang dòng điện

Ta sử dụng cảm nhiệt R (Yokogawa-YTA110) do Nhật sản xuất có dải tín hiệu đầu vào là nhiệt độ $(-50 \div 250)^{\circ}\text{C}$ và tín hiệu ra là dòng điện từ $(4 \div 20)$ mA [4].

Hàm truyền của thiết bị là khâu khuếch đại, được xác định như sau:

$$K = \frac{\Delta I_{\max}}{\Delta T_{\max}} = \frac{20-4}{300} = 0,054 (\text{mA}/^{\circ}\text{C}) \quad (12)$$

2.3. Hàm truyền của hệ thống cần điều khiển

Hàm truyền đạt của hệ thống bao gồm bộ chuyển đổi, van và thiết bị trao đổi nhiệt được biểu diễn như sau:

$$G(s) = \frac{0,75 \cdot 4 \cdot 2,0 \cdot 4 \cdot e^{-25s}}{(5s+1)(100s+1)} = \frac{1,26 \cdot e^{-25s}}{(5s+1)(100s+1)} \quad (13)$$

$G(s)$ là khâu bậc 2 có trễ, áp dụng luật chia đôi của Skogestad để đưa mô hình về khâu quán tính bậc 1 có trễ [4]:

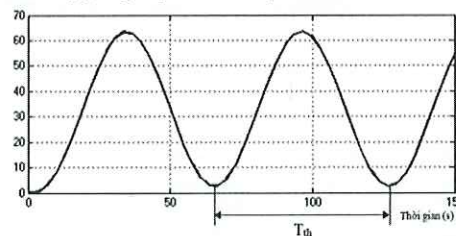
$$\text{Ta có: } \tilde{G}(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta_0 s}}{Ts + 1}; \Rightarrow \tilde{G}(s) = \frac{1,26 \cdot e^{-27,5s}}{(102,5s+1)} \quad (14)$$

Trong đó: $T_1 > T_2$, (với $T_1=100\text{s}$, $T_2=5\text{s}$);

$$T = T_1 + \frac{T_2}{2} = 102,5; \theta = \theta_0 + \frac{T_2}{2} = 27,5 \quad (15)$$

2.4. Tính chọn tham số và xây dựng mô phỏng cho các bộ điều khiển

2.4.1. Phương pháp Tyreus – Luyben



Hình 3. Xác định hằng số tới hạn

Với các thông số xác định từ đặc tính dao động điều

hình 3: $k_h = 25$; $T_h = 61,5$ Giá trị các tham số của bộ điều khiển PID được tính theo phương pháp Tyreus-Luyben [4]: $k_p = 11,25$; $k_i = 0,08$; $k_d = 110,25$

2.4.2. Phương pháp điều khiển mô hình nội (Internal Model Control: IMC)

Sơ đồ cấu trúc của IMC dựa theo các tài liệu [4], [5], [9].

Giá trị các tham số của bộ điều khiển PI theo phương pháp IMC: ta áp dụng các công thức và phương pháp tính chọn từ: [4], [5], [9] tính được: $k_p = 1,48$; $k_i = 0,0144$

2.4.3. Phương pháp sử dụng bộ điều khiển PI dự báo của Smith

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển dự báo theo phương pháp của Smith dựa vào: [4], [10].

Giá trị các tham số của bộ điều khiển PI theo phương pháp dự báo của Smith: ta áp dụng các công thức từ: [4], [9] tính được: $k_p = 1,48$; $k_i = 0,0144$; và bộ dự báo Smith có dạng:

$$\tilde{G}_o(s) \cdot (1 - e^{-\tilde{\theta}s}) = \frac{34,65s}{(102,5s + 1)} \quad (16)$$

2.4.4. Thiết kế bộ điều khiển PI-Mở

Mô hình mờ: Mamdani. Tên của bộ điều khiển mờ được đặt là: DKMO_DUCHOA

* Bước 1: Xác định các biến ngôn ngữ vào/ra:

Đầu vào thứ nhất là sai lệch nhiệt độ (ký hiệu E), đầu vào thứ hai là đạo hàm biến thiên nhiệt độ đầu vào (ký hiệu DE). Đầu ra là tín hiệu điều khiển đưa đến đối tượng điều khiển (ký hiệu U).

* Bước 2: Xác định tập giá trị cho các biến vào/ra: Sai lệch E được chọn trong miền giá trị: $E = [-10; +10]$; Đạo hàm biến thiên đầu vào DE được chọn trong miền giá trị: $DE = [-20; +20]$; Đầu ra tín hiệu U của bộ điều khiển mờ chọn trong miền giá trị: $U = [-2; +5]$

Ta chọn số tập mờ cho các biến vào, ra như:

$$E \in \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

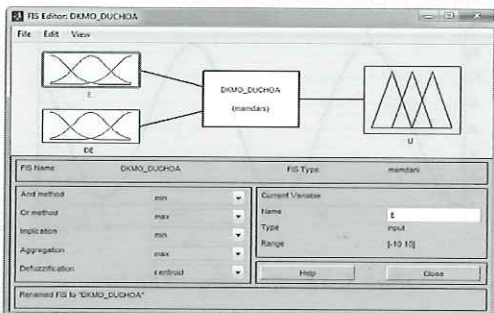
$$DE \in \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$U \in \{U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7\}$$

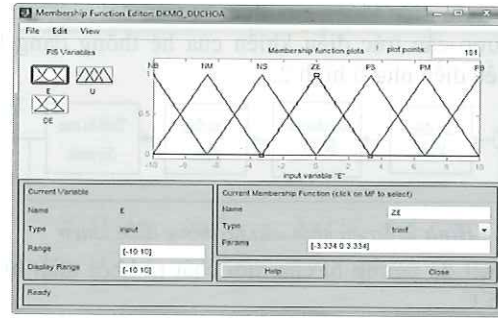
Trong đó: NB: Âm nhiều; NM: Âm vừa; NS: Âm ít; ZE: Không; PS: Dương ít; PM: Dương vừa; PB: Dương nhiều.

* Bước 3: Xác định dạng hàm liên thuộc

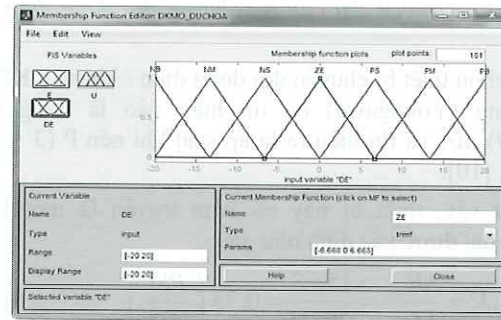
Ta chọn hàm liên thuộc dạng hình tam giác để có chuyển đổi tuyến tính đơn giản [7].



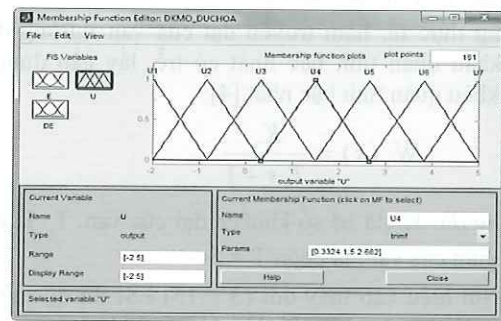
Hình 4. Cấu trúc của bộ điều khiển mờ



Hình 5. Xác định tập mờ cho biến vào E



Hình 6. Xác định tập mờ cho biến vào DE



Hình 7. Xác định tập mờ biến ra U

* Bước 4: Xây dựng luật điều khiển: Dựa vào các số liệu vào và ra, các tính chất vật lý và đặc tính quá độ ta xây dựng luật điều khiển như: Nếu sai lệch E là PB và DE là ZE thì tác động U là U7. Nếu sai lệch E là NB và DE là PB thì tác động U là U1. Tương tự, với 7 tập mờ của mỗi đầu vào ta xây dựng: $7 \times 7 = 49$ luật điều khiển.

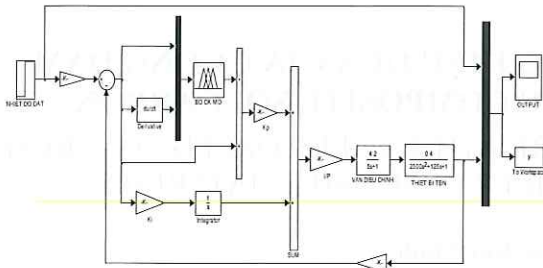
Bảng 1. Xây dựng luật điều khiển

U(t)		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
DE	NB	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	NM	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	NS	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	ZE	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	PS	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	PM	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	PB	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7

Luật hợp thành là luật Max - Min và giải mờ theo phương pháp trọng tâm.

* Bước 5: Mô phỏng hệ thống

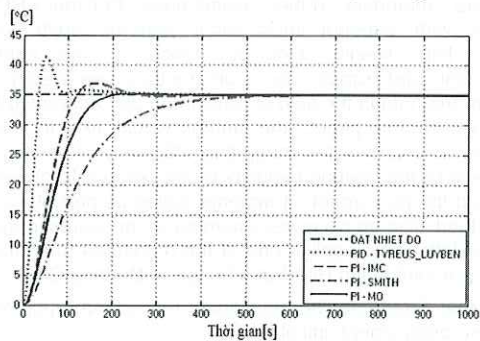
+ Xây dựng mô hình mô phỏng dùng bộ điều khiển PI-Mở:



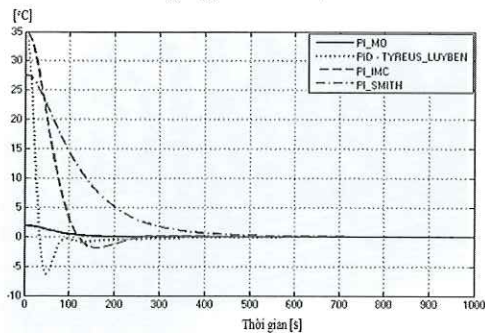
Hình 8. Mô hình mô phỏng với bộ điều khiển PI-Mờ

3. Tổng hợp các bộ điều khiển và đánh giá

Từ các thiết kế trên, ta tiến hành tổng hợp các bộ điều khiển này trong một mô phỏng trên Matlab-Simulink [8], để xem kết quả các tín hiệu trong một đồ thị rồi đánh giá và chọn ra bộ điều khiển tốt nhất cho hệ thống điều khiển:



Hình 9. Tổng hợp các tín hiệu điều khiển



Hình 10. Tổng hợp các sai lệch

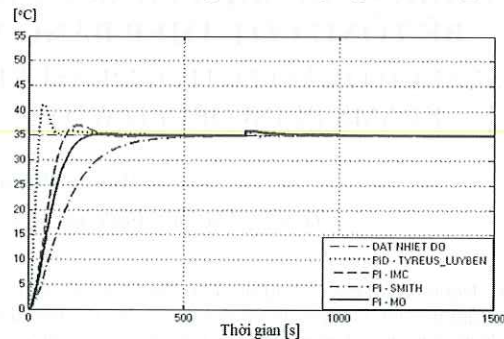
Bảng 2. Tổng hợp kết quả của các bộ điều khiển

Bộ điều khiển	Độ quá điều chỉnh (%)	Số lần dao động	Thời gian quá độ (s)	Thời gian xác lập (s)	Sai lệch tĩnh
PID_Tyresus - Luyben	20	1	35	300	0
PI_IMC	6.6	1	120	260	0
PI_Smith	0	0	550	550	0
PI_Mờ	0	0	200	200	0

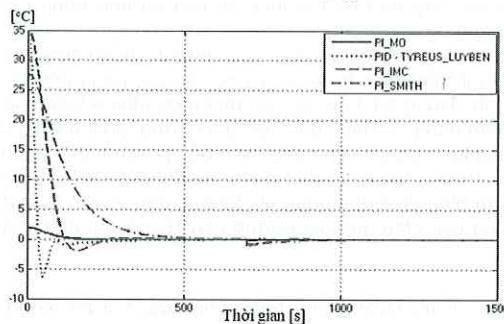
Tổng hợp mô hình mô phỏng các bộ điều khiển PI, PID và PID-Mờ khi có nhiễu tác động: giả sử nhiễu tác động vào hệ thống dạng bậc thang với biên độ +1 tại thời điểm 700s (nhiễu tác động vào đối tượng là nhiễu do tác động của các yếu tố bên ngoài động vào, như: do biến đổi khí hậu, nhiệt độ dòng gas vào tăng ...).

* Nhận xét: Dựa vào kết quả mô phỏng Hình 9, Hình 10, Hình 11 và Bảng 2 tổng hợp kết quả đạt được của các bộ điều khiển tại giá trị đặt là 35°C thì bộ điều khiển PI - (BBT nhận bài: 28/10/2013, phản biện xong: 30/11/2013)

Mờ đã cho kết quả tốt nhất với độ quá điều chỉnh 0, sai lệch tĩnh bằng 0 và thời gian xác lập ngắn khoảng 200s.



Hình 11. Tổng hợp tín hiệu của hệ thống dùng các bộ điều khiển khi có nhiễu tác động



Hình 12. Tổng hợp sai lệch của hệ thống dùng các bộ điều khiển khi có nhiễu tác động

4. Kết luận

Qua kết quả nghiên cứu (thể hiện cụ thể ở Hình 9, Hình 10, Hình 11, Hình 12 và Bảng 2) cho thấy: Bộ điều khiển được chọn từ các thiết kế (dựa trên cơ sở của Tyresus - Luyben, IMC, dự báo SMITH và P I - Mờ) đã hoạt động ổn định bền vững tại giá trị nhiệt độ 35°C trong thời gian xác lập ngắn nhất khoảng 200s với độ quá điều chỉnh bằng 0, sai lệch tĩnh bằng 0 và có khả năng loại bỏ nhiễu khá tốt khi có nhiễu tác động, điều này hoàn toàn mới và phù hợp với yêu cầu của thiết bị trao đổi nhiệt dùng để hóa lỏng gas là một đối tượng có tính phi tuyến và có thời gian trễ tương đối lớn. Bộ điều khiển này có thể áp dụng vào thực tiễn trong công nghiệp.

Tài liệu tham khảo

- [1] Nguyễn Đức Lợi, Phạm Văn Tùy, *Kỹ thuật lạnh cơ sở*, Nhà xuất bản Giáo dục, 2006.
- [2] Trần Thanh Kỳ, *Máy lạnh*, Nhà xuất bản Giáo dục, 1994.
- [3] Võ Chí Chính, Đinh Văn Thuận, *Hệ thống máy và thiết bị lạnh*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2009.
- [4] Hoàng Minh Sơn, *Cơ sở hệ thống điều khiển quá trình*, Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội, 2006.
- [5] Bùi Quốc Khánh, *Giáo trình điều khiển quá trình*, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [6] Trần Đình Khôi Quốc, *Lý thuyết điều khiển tự động*, Đại học Bách khoa Đà Nẵng.
- [7] Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước, *Lý thuyết điều khiển mờ*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2006.
- [8] Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật 2006.
- [9] Mings T. Tham, *Internal Model Control*, University of Newcastle Upon Tyne, 2002.
- [10] Carlos A. Smith, *Automated Continuous Process Control*, University of South Florida, 2001.