

TỰ ĐIỀU CHỈNH THÔNG SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID BỀN VỮNG CHO LÒ PHẢN ỨNG KHUẤY TRỘN LIÊN TỤC

PARAMETERS SELF-TUNING OF ROBUST PID CONTROLLER FOR CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR

Lê Văn Mạnh, Nguyễn Văn Minh Trí, Phan Vũ Bảo

Đại Học Công Nghiệp TP. Hồ Chí Minh, Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng
manhlevan.vn@gmail.com; ngyminhtri@yahoo.com; pvbao82@yahoo.com.vn

Tóm tắt: Bài báo này, đưa ra phương pháp thiết kế thiết bị tự điều chỉnh các thông số K, I, λ , ϕ của bộ điều khiển (BĐK) PID bền vững để điều khiển cho lò phản ứng khuấy liên tục. Các tham số của BĐK PID bền vững được xác định bằng công thức mới sử dụng ngưỡng thay đổi của các thành phần không xác định và nhiễu bên ngoài. Sự hội tụ của hệ thống được chứng minh dựa vào tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Sự thay đổi của thông số BĐK PID bền vững được điều khiển trực tuyến dựa trên sự sai lệch giữa tín hiệu mong muốn với tín hiệu thực của hệ thống nhờ các quy tắc mờ. Hiệu quả hoạt động của BĐK đưa ra được so sánh với BĐK PID thông thường. Kết quả mô phỏng cho thấy khi hệ thống có quá trình thay đổi phi tuyến lớn, BĐK được tự chỉnh định thông số có đặc tính tốt hơn so với BĐK PID thông thường.

Từ khóa: chỉnh định PID; chỉnh định PID bền vững; PID SCTR; tự điều chỉnh thông số PID; PID mới

Abstract: In this paper, a design method about parameters K, I, λ , ϕ self tuning unit of robust PID controller for continuous stirred tank reactor is proposed. Robust PID controller parameters are obtained by proposed equations using boundary of uncertainties and external disturbances. System convergence is proven basing on the Lyapunov stability theory. Change parameters of Robust PID controller are controlled online based on the error of reference signal with output signal of system referring fuzzy rules. The performance of the proposed controller is compared with conventional PID. Simulation results show that when the system of nonlinear has a process of big change, the proposed controller has better performances than the conventional PID controller.

Key words: Robust PID; tuning PID; PID new; PID SCTR; tuning Robust PID for SCTR

1. Đặt vấn đề

BĐK PID được sử dụng rộng rãi trong điều khiển quá trình công nghiệp vì tính đơn giản và hiệu quả của nó. Trong công nghiệp nhiều quá trình điều khiển quan trọng như chưng cất tinh khiết, phản ứng hóa học tỏa nhiệt cao, trung hoà nồng độ độ pH,... Các hệ thống trên có tính chất phi tuyến rất lớn. Khi BĐK PID thông thường được sử dụng để điều khiển quá trình phi tuyến lớn, các thông số của BĐK phải được xác định rất khó khăn, để đảm bảo hệ thống ổn định trong các điều kiện hoạt động.

Có những tình huống mà BĐK PID thông thường là không đáp ứng kịp, như khi hệ thống có sự thay đổi lớn về tính phi tuyến. Để điều khiển quá trình phi tuyến lớn này ổn định bằng cách sử dụng BĐK PID bền vững tự chỉnh định thông số trực tuyến. Các thông số của BĐK PID bền vững được cập nhật trực tuyến thì hệ thống có được sự ổn định cao và đáp ứng thỏa mãn yêu cầu. Các thông số của BĐK này được chỉnh định nhờ vào thiết bị mờ.

Trong bài báo này, BĐK PID bền vững tự chỉnh định thông số được xây dựng để điều khiển nồng độ phản ứng của lò phản ứng khuấy liên tục. Bài báo được xây dựng như sau: đầu tiên thiết kế bộ BĐK PID bền vững và thiết lập bộ tự điều chỉnh thông số điều khiển dựa vào thiết bị mờ, sau đó mô phỏng và lấy kết quả của BĐK PID bền vững tự chỉnh định thông số được so sánh với kết quả của một BĐK PID thông thường.

2. Thiết kế BĐK tự chỉnh định thông số

2.1. Thiết kế BĐK PID bền vững

Xét một hệ thống phi tuyến:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + b(x)u \quad (1)$$

Trong đó $x = [x_1, x_2]^T$ là vector trạng thái, u là tín hiệu điều khiển, b(x) và f(x) là các hàm phi tuyến không xác định của hệ thống.

Giả thuyết rằng:

$$\left. \begin{array}{l} |f| < F \\ 0 < b_{\min} \leq b \end{array} \right\} \quad (2)$$

Bài toán đặt ra là thiết kế BĐK PID sao cho hệ (1) đạt chất lượng mong muốn và chất lượng này không ảnh hưởng bởi các thành phần không xác định f và b.

Cho quỹ đạo mẫu $x_{1r}(t)$ và định nghĩa sai lệch bám $e = x_{1r} - x_1$

Chọn một hàm bậc nhất như sau:

$$\sigma = \lambda e + \dot{e} = x_{2r} - x_2 + \lambda(x_{1r} - x_1) \quad (3)$$

Trong đó $x_{2r} = \dot{x}_{1r}$ và λ là một số xác định dương.

Tính chất của hàm bậc nhất (3) là khi giữ cho $\sigma = 0$ thì quỹ đạo thực của hệ thống sẽ bám theo quỹ đạo đặt sau một thời gian t. Do đó tín hiệu điều khiển u được thiết kế sao cho trạng thái hệ thống được đẩy về trên đường $\sigma = 0$.

Ta chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (4)$$

Và một hàm điều khiển:

$$u = K \cdot \text{sign}(\sigma), \quad K > 0 \quad (5)$$

Bằng cách đạo hàm hàm Lyapunov, ta có:

$$\dot{V} = \sigma \cdot \dot{\sigma} = \sigma(\lambda \dot{e} + \ddot{e})$$

$$\dot{V} = \sigma[\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f(x) - b(x)u]$$

$$\dot{V} = \sigma[\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r} - f(x) - b(x) \cdot K \cdot \text{sgn} \sigma]$$

$$\dot{V} = \sigma[-f(x) + \lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r}] - \sigma \cdot K \cdot b(x) \cdot \text{sgn} \sigma$$

$$\dot{V} \leq |\sigma| \cdot [|f(x)| + |\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r}|] - K \cdot b(x) \cdot |\sigma|$$

$$\dot{V} \leq |\sigma| \cdot [F + |\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r}|] - K \cdot b(x)$$

Rõ ràng $\dot{V} \leq 0$ nếu

$K(x) = (F + \eta + |\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1r}|) / b_{\min}$ với η là một hằng số dương nhỏ bất kỳ. Theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov

thì: $V = \frac{1}{2} \sigma^2 \geq 0$ có $\dot{V} \leq 0$ sẽ đảm bảo hệ thống có $\sigma \rightarrow 0$.

Với $\lambda > 0$ thì $e \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ mà tốc độ hội tụ phụ thuộc vào giá trị của λ .

Từ các kết quả trên, ta thấy rằng $e \rightarrow 0$ khi $\dot{e} \rightarrow 0$ và \ddot{x}_{1r} có giới hạn vì tính chất vật lý của hệ thống. Do đó ta có thể tìm được một hằng số E sao cho

$$|\lambda \dot{e} + \ddot{x}_{1d}| \leq E \tag{6}$$

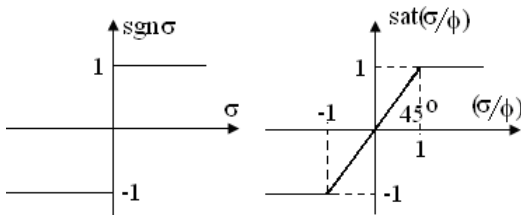
Từ đó ta có thể chọn $K = \frac{F + \eta + E}{b_{\min}}$ là hằng số mà

điều kiện $\dot{V} \leq 0$ vẫn luôn đảm bảo.

Với cách chứng minh trên ta có định lý sau:

Định lý: Cho hệ thống (1) với giả thiết (2), (6) thỏa mãn, u chọn theo (5), thì sai lệch bám của hệ thống e sẽ hội tụ về 0.

Hàm sign(σ) sẽ gây ra sự thay đổi của u từ +K sang -K một cách rất nhanh khi $\sigma \approx 0$. Điều này trong thực tế sẽ làm cho u_{dk} thay đổi nhanh giữa $\pm K$, làm động cơ mau hư. Ta làm mềm u bằng cách thay dấu sign bằng hàm bão hòa sat (hình 1).



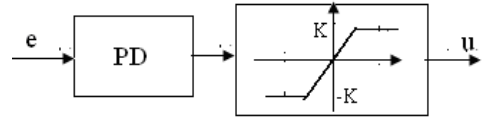
Hình 1. Đặc tính hàm dấu sign và hàm bão hòa sat.

Như vậy $u = K \cdot \text{sat}(\sigma/\phi)$

Hay

$$u = \begin{cases} -K & \text{khi } \sigma < -\phi \\ K \cdot \frac{\sigma}{\phi} = \frac{K}{\phi} \cdot \lambda \cdot e + \frac{K}{\phi} \cdot \dot{e} & \text{khi } -\phi \leq \sigma \leq \phi \\ K & \text{khi } \sigma > \phi \end{cases}$$

Luật điều khiển được làm mềm hoá này thực chất là một BDK khuếch đại PD với khâu bão hoà như hình vẽ dưới, với $K_p = K \cdot \lambda / \phi$; $K_D = K / \phi$



Hình 2. BDK PD với khâu bão hoà.

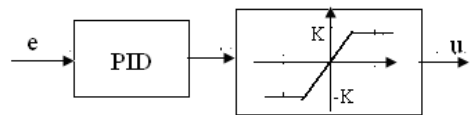
Vì BDK là khâu PD để điều khiển một đối tượng phi tuyến, nên luôn luôn tồn tại sai lệch e. Trên quỹ đạo pha của sai lệch (e, \dot{e}), hệ thống sẽ hội tụ lại một vùng quanh góc tọa độ của ($e = 0, \dot{e} = 0$). Rõ ràng một khâu tích phân được đưa vào BDK PD có thể làm sai lệch $e \rightarrow 0$. Từ đó ta có một BDK được gọi là BDK PID bền vững có dạng như sau:

$$u = \begin{cases} -K & \text{khi } \sigma < -\phi \\ \frac{K}{\phi} \cdot \lambda \cdot e + \frac{K}{\phi} \cdot \dot{e} + I \int_0^t \frac{\sigma}{\phi} dt & \text{khi } -\phi \leq \sigma \leq \phi \\ K & \text{khi } \sigma > \phi \end{cases}$$

Như vậy

$$u = \begin{cases} -K & \text{khi } \sigma < -\phi \\ K_p \cdot e + K_D \cdot \dot{e} + K_I \int_0^t e dt & \text{khi } -\phi \leq \sigma \leq \phi \\ K & \text{khi } \sigma > \phi \end{cases}$$

Với $K_p = (K \cdot \lambda + I) / \phi$; $K_I = \lambda \cdot I / \phi$; $K_D = K / \phi$

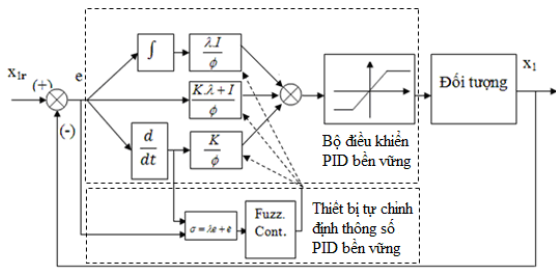


Hình 3. BDK PID với khâu bão hoà.

2.2. Thiết kế BDK PID bền vững tự chỉnh định thông số

2.2.1. Hệ thống tự chỉnh định thông số của BDK PID bền vững

Ý tưởng của việc dùng lý thuyết điều khiển mờ để chỉnh định các thông số $K_p = (K \cdot \lambda + I) / \phi$, $K_I = \lambda \cdot I / \phi$, $K_D = K / \phi$ của BDK PID bền vững. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID bền vững tự chỉnh định thông số được thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID bền vững tự chỉnh định thông số

2.2.2. Thuật toán xây dựng mệnh đề hợp thành cho hệ thống

Luật mờ cho hệ thống có dạng: “If I = Co Then O = Re”

Chia hàm thuộc $\mu_{Co}(x)$ thành p điểm $x_i, i = 1, 2, \dots, p$
 Chia hàm thuộc $\mu_{Re}(y)$ thành q điểm $y_i, i = 1, 2, \dots, q$
 Xây dựng ma trận quan hệ mờ Re:

$$Re = \begin{bmatrix} \mu_{Re}(x_1, y_1) & \dots & \dots & \mu_{Re}(x_1, y_q) \\ \mu_{Re}(x_2, y_1) & \dots & \dots & \mu_{Re}(x_2, y_q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{Re}(x_p, y_1) & \dots & \dots & \mu_{Re}(x_p, y_q) \end{bmatrix}$$

Hàm liên thuộc $\mu_{Re}(y)$ đầu ra ứng với giá trị rõ đầu vào x_k có giá trị $\mu_{Re}(y) = a^T \cdot Re$, với $a^T = \{0,0,0,\dots,0,1,0,\dots,0,0\}$. Số 1 ứng với vị trí thứ k. Trong trường hợp đầu vào là giá trị mờ Co' thì $\mu_{Re}(y)$ là: $\mu_{Re}(y) = \{l_1, l_2, \dots, l_q\}$ với $l_k = \max \min \{a_i, \mu_{Re}(x_i, y_k)\}$.

2.2.3. Giải mờ cho hệ thống bằng phương pháp trọng tâm

Giả sử có m luật điều khiển được triển khai, ký hiệu các giá trị mờ đầu ra của luật điều khiển thứ n là $\mu_{Re'n}(y)$ thì với quy tắc Sum-Min hàm liên thuộc sẽ là

$$\mu_{Re'}(y) = \sum_{n=1}^m \mu_{Re'n}(y)$$

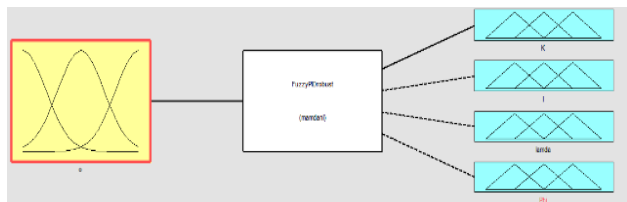
, và y' được xác định:

$$y' = \frac{\int \left(y \sum_{n=1}^m \mu_{Re'n}(y) \right) dy}{\int \sum_{n=1}^m \mu_{Re'n}(y) dy}$$

. Trong đó S là miền xác định của tập mờ.

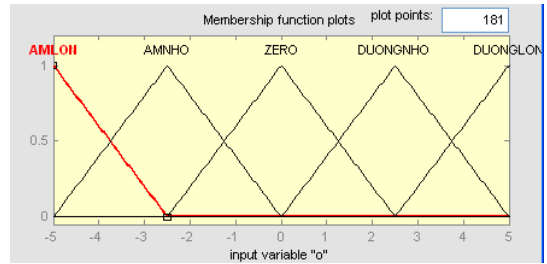
2.2.4. Mô hình thiết bị mờ

Thiết bị tự chỉnh định thông số cho BDK PID bền vững có đầu vào là $\sigma = \lambda e + \dot{e}$, đầu ra là K, I, λ , ϕ và có cấu trúc như sau:

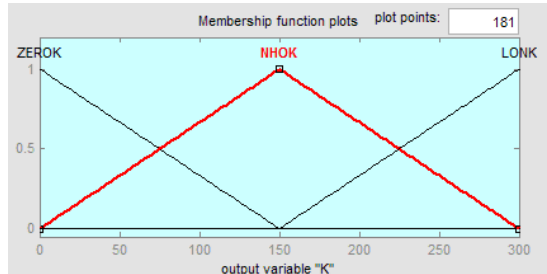


Hình 5. Biến vào ra trong BDK mờ

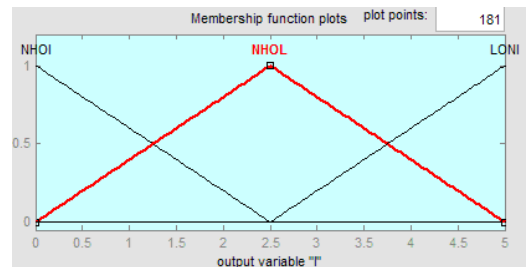
Định nghĩa tập mờ (giá trị ngôn ngữ) cho các biến vào/ra: Miền giá trị vật lý cho các biến, số lượng tập mờ cần thiết, kiểu hàm liên thuộc, rồi rạc hoá các tập mờ như sau:



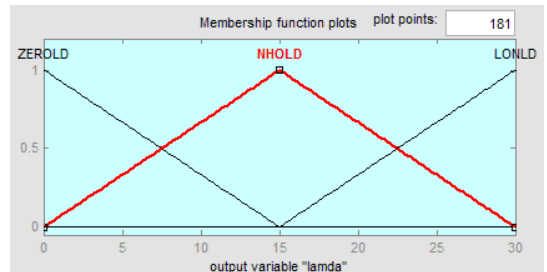
Hình 6. Biến đầu vào “σ”



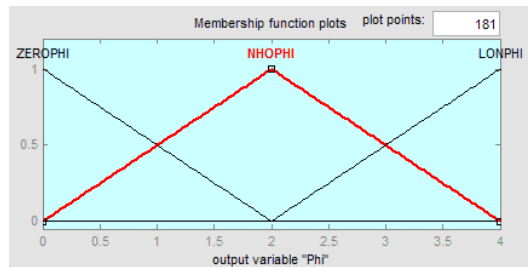
Hình 7. Biến đầu ra “K”



Hình 8. Biến đầu ra “I”



Hình 9. Biến đầu ra “λ”

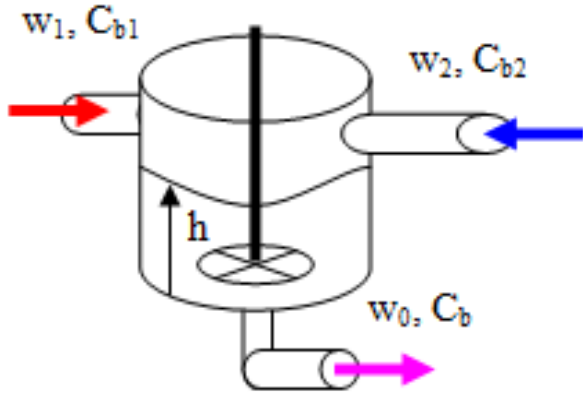


Hình 10. Biến đầu ra “φ”

3. Kết quả mô phỏng

3.1. Mô hình toán học của lò phản ứng khuấy liên tục

Hệ thống mô hình sử dụng là lò phản ứng sảy liên tục có xúc tác. Mô hình của quy trình được cho bởi hình 11. Phương trình động học của hệ thống:



Hình 11. Lò phản ứng khuấy liên tục

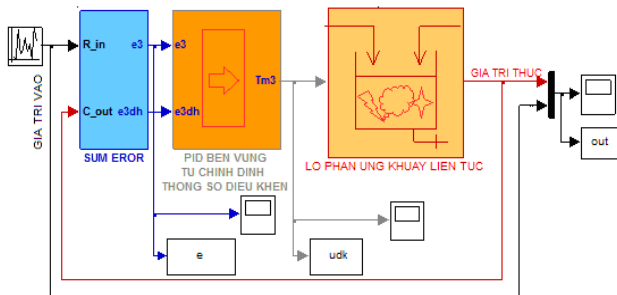
$$\frac{dh(t)}{dt} = w_1(t) + w_2(t) - 0,2\sqrt{h(t)}$$

$$\frac{dC_b(t)}{dt} = (C_{b1} - C_b(t)) \cdot \frac{w_1(t)}{h(t)} + (C_{b2} - C_b(t)) \cdot \frac{w_2(t)}{h(t)} - \frac{k_1 \cdot C_b(t)}{(1 + k_2 \cdot C_b(t))^2}$$

Trong đó:

- $h(t)$ là độ cao chất lỏng trong lò phản ứng
- $C_b(t)$ là nồng độ sản phẩm hoà trộn tại đầu ra của quá trình
- $w_1(t)$ là lưu lượng của nồng độ chất hoà trộn cho vào C_{b1}
- $w_2(t)$ là lưu lượng của nồng độ loãng chất hoà trộn cho vào C_{b2}
- Nồng độ đầu vào chất trộn cho trước $C_{b1} = 24,9$ và $C_{b2} = 0,1$
- Hằng số phản ứng với tỉ lệ của sự tiêu hao là $k_1 = 1$, $k_2 = 1$

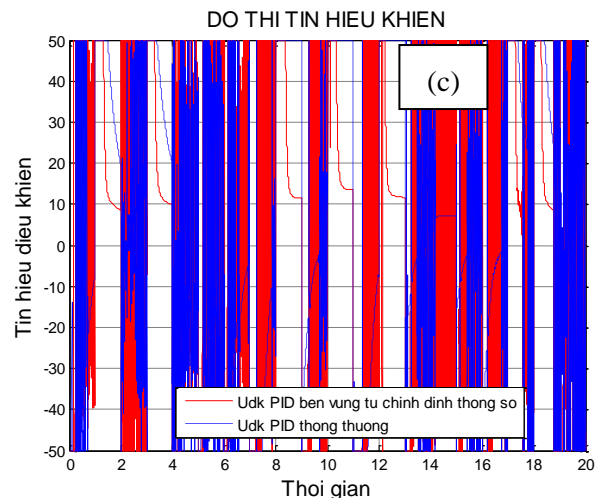
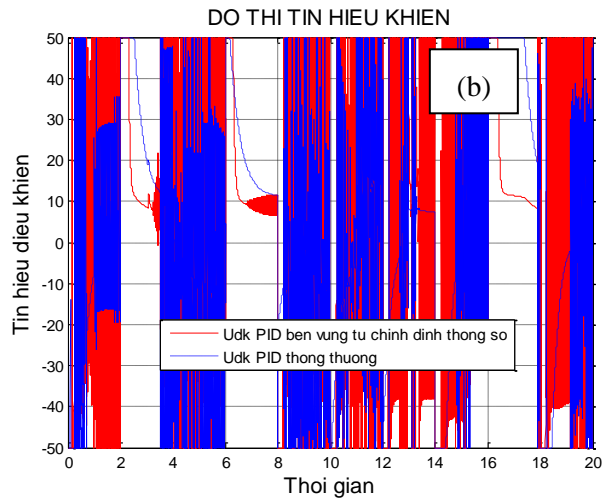
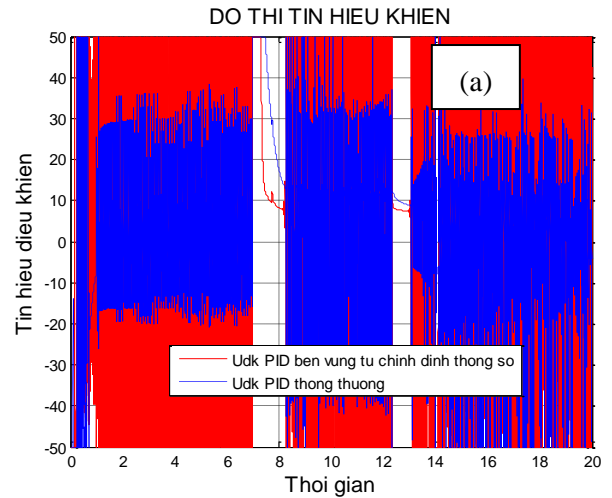
Mục tiêu của BDK là duy trì nồng độ của sản phẩm theo sự thay đổi của lưu lượng $w_1(t)$. Để đơn giản ta đặt $w_2(t) = 0,1$. Mục nước trong lò phản ứng $h(t)$ không thay đổi trong quá trình xảy ra phản ứng. Mô hình lò phản ứng khuấy liên tục được xây dựng trên phần mềm Matlab-Simulink như hình 12.



Hình 12. Mô hình hệ thống điều khiển và lò phản ứng khuấy liên tục

3.2. Mô phỏng và kết quả

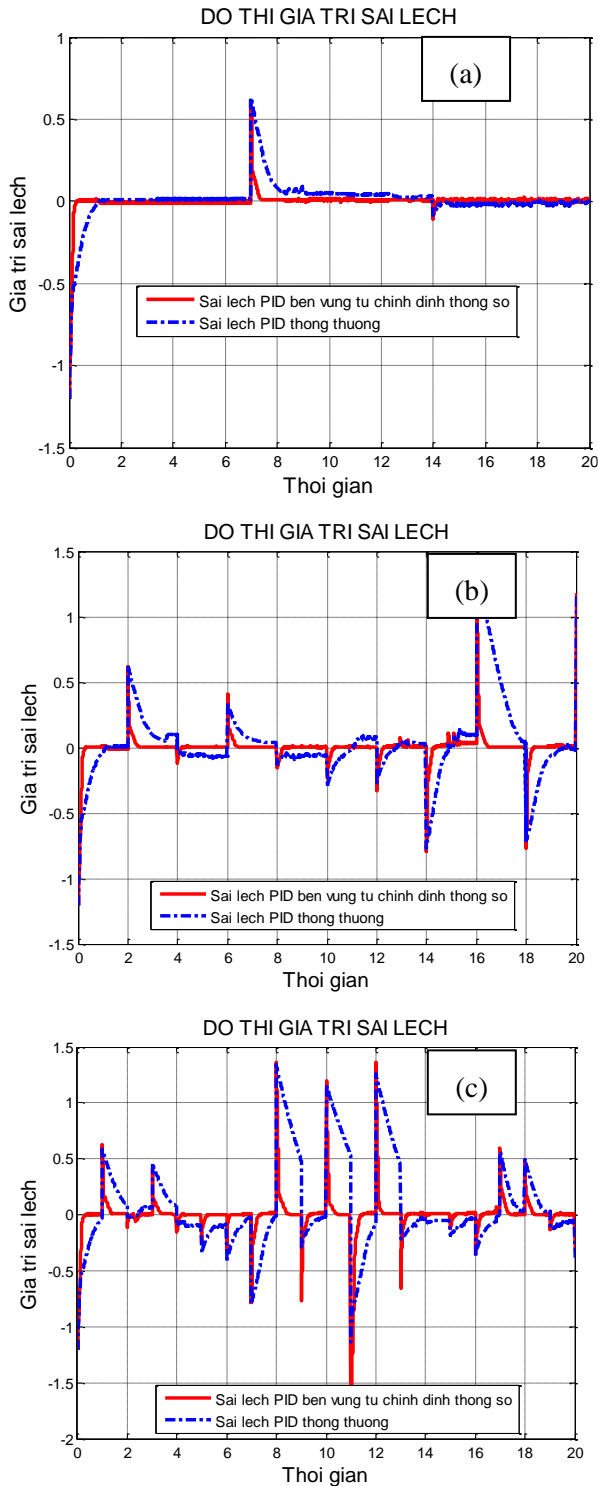
3.2.1. Tín hiệu điều khiển



Hình 13. Tín hiệu điều khiển khi đầu vào $w_1(t)$ thay đổi: (a) chậm – (b) nhanh – (c) rất nhanh

Nhận xét: Khi điều khiển hệ thống trên ta thấy tín hiệu uđk của hai BDK cùng có hiện tượng thay đổi dấu liên tục từ âm sang dương và ngược lại. Điều này làm cho cơ cấu chấp hành có sự rung động theo $\pm uđk$. Như vậy BDK PID bền vững tự động chỉnh định thông số tín hiệu điều khiển vẫn chưa khắc phục được hiện tượng đổi dấu liên tục này.

3.2.2. Đặc tính sai lệch



Hình 14. Sai lệch bám khi đầu vào $w_1(t)$ thay đổi:
(a) chậm, (b) nhanh, (c) rất nhanh

(BBT nhận bài: 23/12/2013, phản biện xong: 12/03/2014)

Nhận xét : Nhìn vào đồ thị ta thấy, khi đầu vào của hệ thống có tính phi tuyến lớn thì BĐK PID thông thường có đầu ra không đáp ứng kịp với sự thay đổi lớn đó, trong khi đó BĐK PID bền vững tự chỉnh định các thông số điều khiển thích nghi tốt với sự thay đổi lớn của hệ thống. Như vậy, sai lệch giữa giá trị thực và giá trị mong muốn có sự khác biệt rõ rệt, đặc tính sai lệch của BĐK PID bền vững tự chỉnh định thông số tiến về không rất nhanh, trong khi đó BĐK PID thông thường có sự sai số lớn khi hệ thống có đầu vào thay đổi lớn.

4. Kết luận

Trong bài báo này, thiết bị mờ được sử dụng cho việc thiết kế hệ thống tự chỉnh định các thông số PID bền vững bằng cách dựa vào sai lệch giữa tín hiệu mong muốn và tín hiệu thực, từ sai lệch đó để ta thiết lập luật mờ để thay đổi trực tuyến các thông số K , I , λ và ϕ thích hợp để điều khiển hệ thống phi tuyến trên đạt yêu cầu. BĐK này được áp dụng cho lò phản ứng khuấy liên tục không ổn định. Kết quả mô phỏng cho thấy BĐK PID bền vững tự chỉnh định thông số điều khiển có hiệu quả tốt hơn so với PID thông thường.

Tài liệu tham khảo

- [1] Eyester, David, Steven Chad Osborn, and Jason Wells, *Residence Time Distribution for Continuous Stirred Tank Reactor: Preplan*, CHE 4002. April 2, 2008.
- [2] T. Takagi and M. Sugeno, *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-15, pp. 116–132, Jan. 1985.
- [3] A. Leva, *PID autotuning algorithm based on relay feedback*, IEE Proc-Control Theory Appl., vol. 140, 1993, pp. 328-337.
- [4] Q. G. Wang, B. Zou, T. H. Lee, and Q. Bi, *Auto-tuning of multivariable PID controller from decentralized relay feedback*, Automatica, vol. 33, 1997, pp. 319-330.
- [5] Lê Tấn Duy, *Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ tay máy robot*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 4/2003.
- [6] Vũ Tú Anh, *Bộ điều khiển PID số cho động cơ DC ứng dụng ASIC*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 4/2008.
- [7] Lê Văn Mạnh, *Nghiên cứu và thiết kế bộ điều khiển PID bền vững cho hệ tay máy Robot*, Luận văn Cao học, 2010.