

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO TỰA MÔ HÌNH TRÊN CƠ SỞ HỆ MỜ, ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN LỮ PHẢN ỨNG DÂY CHUYỀN LIÊN TỤC (CSTR)

Trần Quang Tuấn⁽¹⁾, Phan Xuân Minh⁽²⁾

(1) Bộ Khoa học và Công nghệ; (2) Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
(Bài nhận ngày 30 tháng 09 năm 2009, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 25 tháng 01 năm 2010)

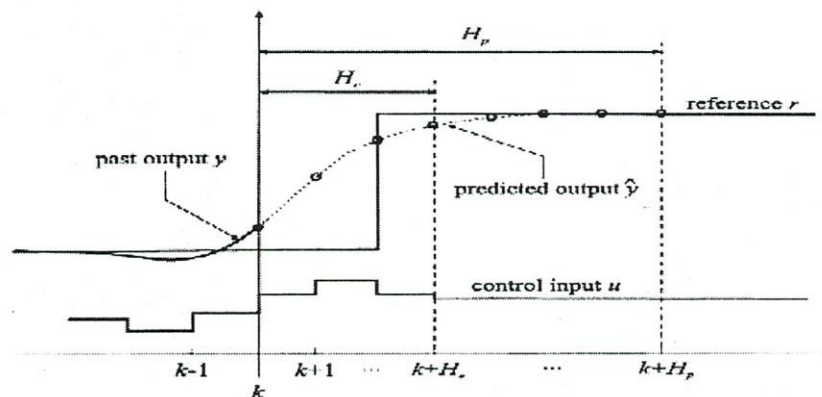
TÓM TẮT: Hiện nay, lữ phản ứng khuấy trộn liên tục (Continuous Stirred Tank Reactor –CSTR) được ứng dụng nhiều trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau, đó có nhiều phương pháp để điều khiển lữ phản ứng khuấy trộn liên tục. Bài báo trình bày một phương pháp thiết kế bộ điều khiển dự báo tựa mô hình (MPC) trên cơ sở mô hình mờ. Đối tượng điều khiển được mô hình hóa bằng mô hình mờ (Takagi-Sugeno - TS), bài toán tối ưu hóa được giải quyết bằng giải thuật di truyền. Việc sử dụng mô hình mờ và giải thuật di truyền để thực thi bộ điều khiển MPC đã đạt được chất lượng tốt hơn các bộ MPC thông thường.

Từ khóa: Model Predictive Control (MPC), Takagi Sugeno Fuzzy Model, Genetic Algorithms (GA), Multiple Inputs-Multiple Outputs (MIMO).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Điều khiển dự báo tựa mô hình [1] là một công cụ mạnh cho điều khiển các quá trình công nghiệp, đặc biệt là các quá trình phi tuyến nhiều vào - nhiều ra. Kể từ khi ra đời, cách đây khoảng hơn hai thập kỷ, phương pháp này đã phát triển đáng kể trong lĩnh vực điều khiển cũng như trong các quá trình công nghiệp. MPC là một giải pháp tổng quát nhất để thiết kế bộ điều khiển ở miền thời gian cho các đối tượng tuyến tính hoặc phi tuyến, trong trường hợp tín hiệu đặt biết trước. Tư tưởng của MPC là:

- Sử dụng mô hình đối tượng để dự báo đầu ra của đối tượng/quá trình tại các thời điểm tương lai (gọi là miền dự báo tín hiệu ra - *output horizon*).
- Tính toán chuỗi tín hiệu điều khiển trên cơ sở tối thiểu hóa hàm mục tiêu.
- Sử dụng sách lược tầm xa (receding strategy), tức là ở mỗi thời điểm chỉ tín hiệu điều khiển đầu tiên trong chuỗi được đưa vào sử dụng. Giới hạn dự báo đầu dịch một bước về tương lai sau mỗi lần tính.



Hình 1. Miền dự báo tín hiệu ra $y(t)$ và tín hiệu điều khiển $u(t)$

MPC thể hiện các ưu điểm so với các phương pháp điều khiển khác, nổi bật là:

- Các khái niệm điều trực quan, việc thực thi bộ điều khiển tương đối dễ dàng.
- Áp dụng được cho đa dạng các đối tượng công nghiệp có đặc tính động học đơn giản hoặc phức tạp.
- Thích hợp cho các đối tượng nhiều vào - nhiều ra (đối tượng MIMO).
- Có khả năng tự bù trễ.
- Có khả năng sử dụng luật điều khiển tuyến tính cho đối tượng có số lượng đầu vào, ra lớn.
- Đạt được hiệu quả cao nếu quỹ đạo đặt biết trước (ứng dụng trong điều khiển Robot hoặc điều khiển mề).

Tuy nhiên, phương pháp này cũng có những nhược điểm sau:

- Mô hình dự báo phải thật chính xác để có thể dự báo trạng thái của quá trình trong miền dự báo. Trong thực tế đây là một bài toán không dễ dàng.
- Việc tính toán tín hiệu điều khiển phải thực hiện trực tuyến (online). Điều đó có nghĩa là, phải giải bài toán tối ưu hóa trong một chu kỳ trích mẫu của đối tượng. Khối lượng tính toán lớn đòi hỏi năng lực tính của thiết bị điều khiển và giải thuật tối ưu phải thích hợp.

Các nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển dự báo cho hệ phi tuyến đều tập trung giải quyết hai nhược điểm nêu trên.

Bài báo này trình bày ứng dụng mô hình mờ để xây dựng mô hình dự báo và giải thuật di truyền để giải quyết vấn đề tối ưu hóa trong MPC.

2. ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO TRÊN CƠ SỞ MÔ HÌNH MỜ

2.1. Mô hình mờ

Lý thuyết về tập mờ có thể được sử dụng trong việc mô hình hóa hệ thống. Việc mô hình hóa được thực hiện bởi một hệ thống suy luận mờ (FIS). Các hệ thống suy luận mờ là những đơn vị xử lý để chuyển đổi những thông tin bằng số sang các biến ngôn ngữ bởi quá trình mờ hóa.

Đó là quá trình chuyển đổi từ giá trị vật lý sang giá trị mờ biểu diễn thông qua các tập mờ (fuzzy sets). Hệ luật suy diễn được xây dựng theo cấu trúc *nếu... thì (if... then...)* và được thực hiện bằng một cơ chế suy diễn. Đầu ra của cơ chế suy diễn được biến đổi tiếp thành giá trị rõ qua bộ giải mờ.

FIS là một công cụ xấp xỉ toàn năng. Điều này cho phép các hệ thống suy luận mờ có thể xấp xỉ bất cứ một hàm liên tục nào trong một miền xác định với độ chính xác cao. Tuy nhiên, khả năng xấp xỉ vạn năng của các mô hình mờ chưa phải là điều đáng kể. Quan trọng là các mô hình mờ mờ ra một không gian mới cho phép thông tin có thể được lấy ra từ mô hình. Không gian đó cung cấp những mô tả về đáp ứng của các hệ thống được mô hình hóa dưới dạng ngôn ngữ.

Trong hệ thống điều khiển dự báo thì mô hình mờ TS được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi hơn cả. Mô hình này có ưu điểm là có thể rút ra từ dữ liệu vào - ra quan sát được bằng cách dùng kỹ thuật phân nhóm. Hơn thế, mô hình mờ TS còn có tốc độ tính toán nhanh hơn mô hình Mamdani.

Cấu trúc mô hình được xây dựng tổng quát

cho hệ MIMO với n_i đầu vào:

$$\underline{u} \in U \subset R^{n_i}, n_o \text{ đầu ra: } \underline{y} \in Y \subset R^{n_o}$$

Hệ này có thể được xấp xỉ bằng tổ hợp của nhiều mô hình mờ MISO rời rạc. Giả thiết: ζ, η là các đa thức

với đối số là q^{-1} - toán tử dịch lùi (backward shift operator), tức là:

$$\zeta = \alpha_0 + \alpha_1 q^{-1} + \alpha_2 q^{-2} \dots \quad [2]. \text{ Ký hiệu}$$

$$\{y(k)\}_m^{\text{def}} = [y(k-m), y(k-m-1), \dots, y(k-m-n+1)]$$

$$\text{với } m \leq n$$

Chọn mô hình MISO có cấu trúc NARX (Nonlinear Auto Regressive model with exogenous inputs):

$$y_l(k+1) = F_l(\underline{x}_l(k)), l = 1, 2, \dots, n_o$$

Trong đó $\underline{x}_l(k)$ là vector hồi quy:

$$\underline{x}_l(k) = [\{y_1(k)\}_0^{n_{y1}}, \dots, \{y_1(k)\}_0^{n_{y1}}, \{u_1(k+1)\}_{n_{d1}}^{n_{y1}}, \dots, \{u_{n_i}(k+1)\}_{n_{du_i}}^{n_{yu_i}}] \quad (1)$$

n_y, n_u là ma trận số trễ (delays) của mỗi đầu vào và ra.

n_d : Ma trận của số trễ vận chuyển từ mỗi đầu vào tới đầu ra.

Phần quan trọng trong mô hình mờ chính là luật hợp thành:

$$\begin{aligned} R_{li} &: \text{ if } x_{li}(k) = \Omega_{li1} \quad \text{and... and} \\ x_{lp}(k) &= \Omega_{lip} \quad \text{then} \\ y_{li}(k+1) &= \zeta_{li} y(k) + \eta_{li} u(k) + \theta_{li}, \\ i &= 1, 2, \dots, K_l. \quad (2) \end{aligned}$$

Trong đó, x_{li} là phần tử của vector hồi quy \underline{x}_l , Ω_{li} : Tập mờ của luật thứ i , K_l : Số luật trong mô hình thứ l . Hệ luật này được ước lượng từ tập dữ liệu vào ra của quá trình.

Có nhiều phương pháp để xác định cấu trúc và ước lượng tham số của hệ mờ. Một số phương pháp theo [3] được tổng kết trong bảng sau:

Method	Type of MFs	Number of MFs	Location of the MFs	Consequences
Mosaic scheme	Fixed	Fixed	Fixed	Adjusted
Gradient descent	Fixed	Fixed	Adjusted	Adjusted
Clustering + gradient descent	Fixed	Adjusted	Adjusted	Adjusted
Evolutionary strategies (1)	Adjusted	Adjusted	Adjusted	Adjusted

2.2. Phiếm hàm mục tiêu

Các tín hiệu đầu ra tương lai nằm trong một miền xác định N , gọi là miền dự báo, được tính toán tại mỗi thời điểm t , sử dụng mô hình của đối tượng/quá trình. Các đầu ra dự báo $y(t+k|t)$ với $k=1 \dots N$ phụ thuộc vào các giá trị đầu vào và đầu ra quá khứ tính tới thời điểm t và các tín hiệu điều khiển tương lai $u(t+k|t), k=0 \dots N-1$

Chuỗi tín hiệu điều khiển tương lai được tính toán từ việc tối ưu một phiếm hàm mục tiêu để giữ cho quá trình “bám” càng gần quỹ đạo đặt $w(t+k)$ (reference trajectory) càng tốt (quỹ đạo đặt - setpoint), đồng thời phải đảm bảo sai lệch tín hiệu điều khiển Δu tối ưu. Biểu thức tổng quát của phiếm hàm mục tiêu có dạng sau

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - \omega(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (3)$$

N_1 và N_2 là giới hạn trên và dưới của miền dự báo, N_u là giới hạn điều khiển. Các hệ

số $\delta(j)$ và $\lambda(j)$ xác định trọng số các thành phần trong hàm mục tiêu.

Trong phép hàm cực tiểu hóa (3), các thuật toán MPC thường sử dụng một quỹ đạo quy chiếu $w(t+k)$. $w(t+k)$ không nhất thiết phải bằng tín hiệu đặt mà thường là xấp xỉ gần đúng, thường được tạo ra bằng bộ lọc bậc nhất.

$$\begin{aligned} w(t) &= y(t), \\ w(t+k) &= \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha)r(t+k), \\ k &= 1 \dots N \quad 0 < \alpha < 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Tác dụng của bộ lọc là làm "trơn" đáp ứng, nhờ đó làm tăng độ bền vững của hệ thống.

Trên thực tế, các quá trình công nghiệp đều khó tránh khỏi các điều kiện ràng buộc (còn gọi là điều kiện biên), do đó, phép hàm mục tiêu (3) thường kết hợp với:

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u \leq u_{\max}, \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}, \\ y_{\min} &\leq y \leq y_{\max}, \\ \Delta y_{\min} &\leq \Delta y \leq \Delta y_{\max}, \end{aligned} \quad (5)$$

Chính các điều kiện ràng buộc này làm cho bài toán tối ưu phi tuyến không lời càng trở nên phức tạp, thời gian và khối lượng tính toán lớn, do đó khó áp dụng thuật toán này cho hệ có động học nhanh. Hơn thế, các thuật toán lặp tìm tối ưu như Nelder - Mead hay SQP thường hội tụ vào cực trị cục bộ, phương pháp ngược hướng gradient thường phụ thuộc giá trị khởi tạo. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng giải thuật di truyền (Genetic Algorithms - GA) để giải quyết bài toán tối ưu hóa.

3. GIẢI THUẬT DI TRUYỀN

Thuật toán di truyền là thuật toán tối ưu ngẫu nhiên dựa trên cơ chế chọn lọc tự nhiên và tiến hóa di truyền. Nguyên lý cơ bản của thuật toán di truyền được Holland giới thiệu vào năm 1962 [12]. Cơ sở toán học của nó được phát triển từ cuối những năm 60 và được giới thiệu trong quyển sách đầu tiên của Holland, *Adaptive in Natural and Artificial Systems*. Trong lĩnh vực tối ưu hóa, thuật toán di truyền được phát triển nhanh chóng và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như tối ưu hóa, xử lý ảnh, bài toán hành trình, nhận dạng hệ thống và điều khiển.

Việc sử dụng giải thuật di truyền trong bài toán tối ưu sẽ sớm được điểm lần cận cực trị toàn cục, tránh được cực trị địa phương như một số phương pháp khác đó cung bổ. Chi tiết các bước thực hiện thuật giải di truyền đó được nêu trong nhiều tài liệu [3].

Tuy nhiên, trở ngại lớn nhất khi sử dụng trong bài toán MPC chính là GA đòi hỏi thời gian tính toán khá lớn. Trong những năm gần đây, tốc độ xử lý của máy tính ngày càng cao, nên việc ứng dụng thuật toán trên phù hợp với nhiều đối tượng khác nhau.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN LÒ PHẢN ỨNG DÂY TRUYỀN LIÊN TỤC

Đối tượng nghiên cứu là điều khiển lò phản ứng dây truyền liên tục CSTR mô tả bởi hệ phương trình vi phân phi tuyến [13]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -x_1 + D_a(1-x_1)e^{\frac{x_2}{1+x_2/\varphi}} \\ \frac{dx_2}{dt} &= -(1-\beta)x_2 + BD_a(1-x_1)e^{\frac{x_2}{1+x_2/\varphi}} + \beta u \\ y &= x_2 \end{aligned}$$

Trong đó x_1 và x_2 đại diện cho nồng độ các chất trong phản ứng (không có đơn vị) còn e là nhiệt độ của lò phản ứng. Tín hiệu điều khiển u là nhiệt độ làm mát của vỏ bọc bao quanh lò phản ứng. Các hằng số nhiệt vật lý là: D_a : hệ số Damkoler, φ : năng lượng kích hoạt phản ứng, B : nhiệt độ phản ứng, β : hệ số truyền nhiệt

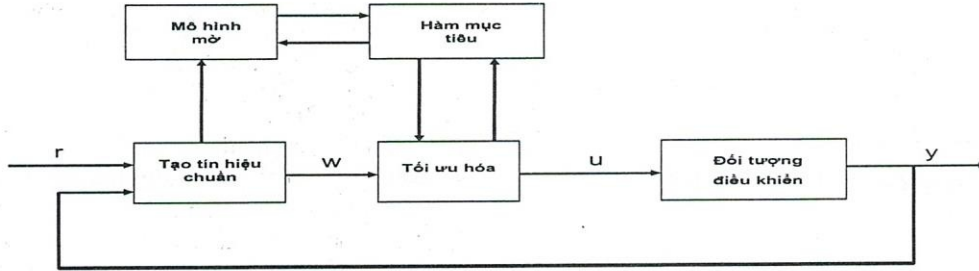
Tham số định mức của hệ là: $D_a=0.072$, $\varphi=20$, $B=8$, $\beta=0.3$. Với các tham số này hệ thống là không ổn định (Chen và pọng, 1997 đã khảo sát).

$$\text{Điều kiện ràng buộc: } \begin{aligned} 0 &\leq u \leq 2; \\ -0.5 &\leq \Delta u \leq 0.5. \end{aligned}$$

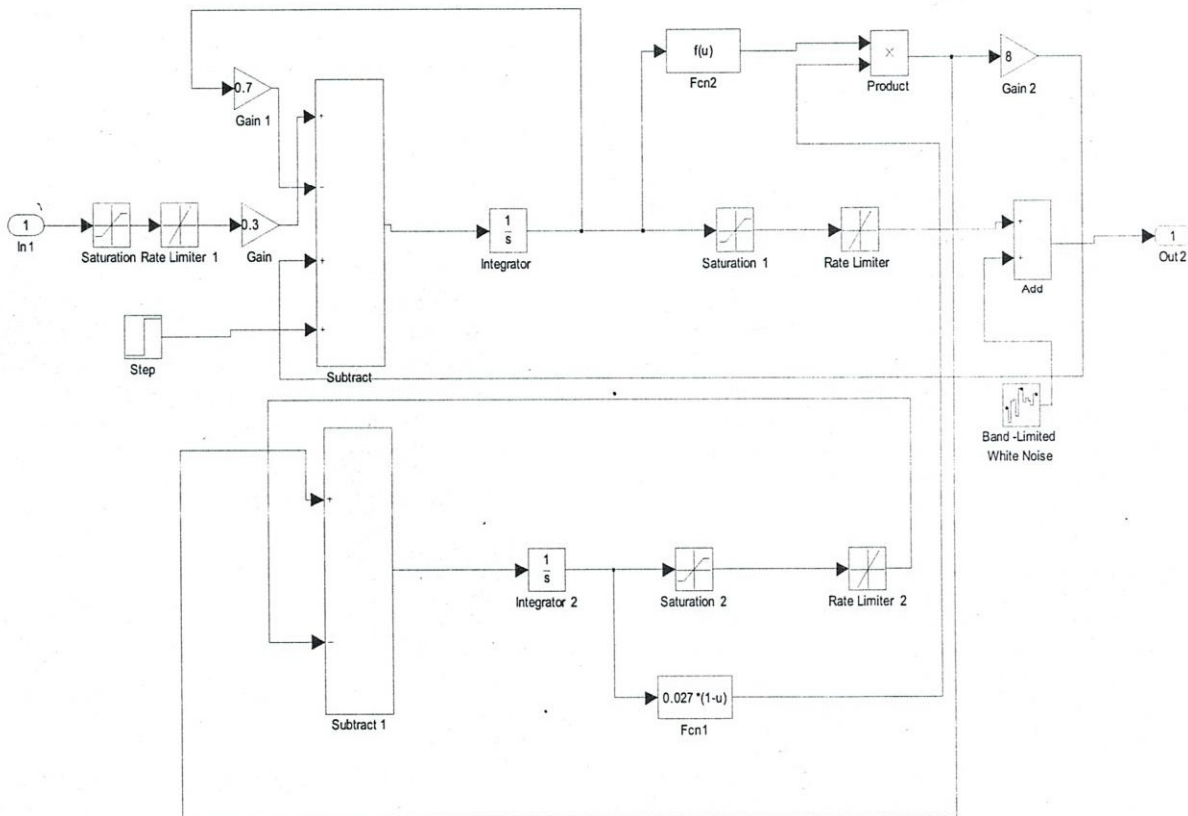
Cấu trúc mô hình được đưa về dạng sau:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2), u(k-1))$$

Từ lý thuyết về điều khiển dự báo như đã trình bày ở trên, ta có thể xây dựng sơ đồ khối của điều khiển dự báo dựa vào mô hình mờ như sau (hình 2)



Hình 2. Sơ đồ khối điều khiển dự báo dựa mô hình mờ



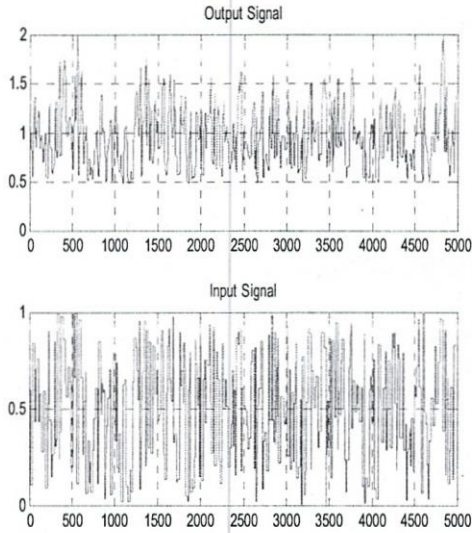
Hình 3. Sơ đồ Simulink

Cấu trúc tập mờ: Mỗi đầu vào gồm 2 tập mờ, dạng hình thang.

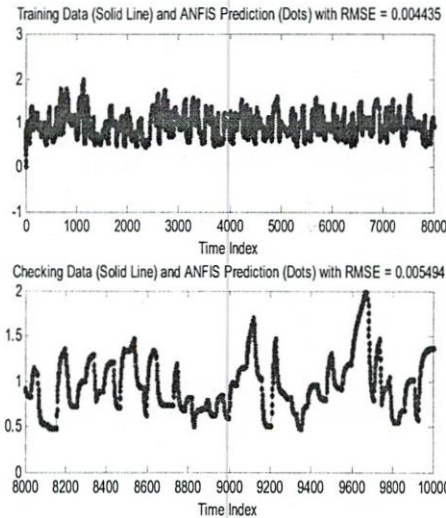
Miền dự báo điều khiển $H_c=2$; dự báo đầu ra $H_p=6$.

Sử dụng giải thuật di truyền:

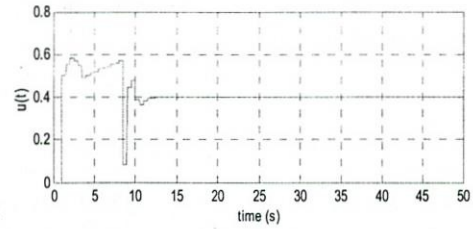
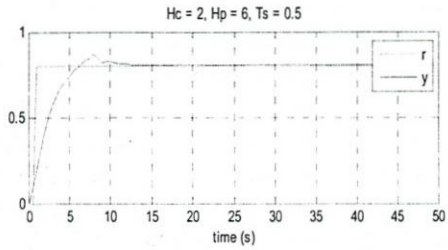
$n = 10$ bits; số NST = 50; số thế hệ = 6.



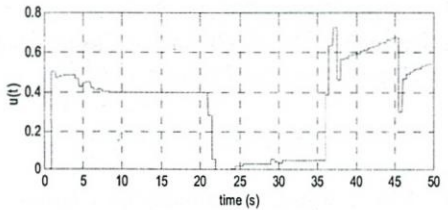
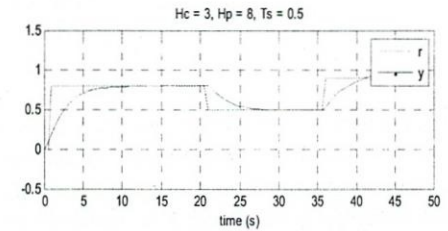
Hình 4. Tín hiệu vào - ra



Hình 5. Kết quả huấn luyện



Hình 6. Tín hiệu ra $y(t)$ và tín hiệu điều khiển $u(t)$, tín hiệu đặt là hằng số



Hình 7. Tín hiệu ra $y(t)$ và tín hiệu điều khiển $u(t)$, tín hiệu đặt dạng hình thang

5. KẾT LUẬN

Hiện nay, điều khiển dự báo đã được phát triển mạnh mẽ và đã có rất nhiều ứng dụng trong công nghiệp. Điều khiển dự báo đặc biệt hấp dẫn bởi vì những khái niệm đưa ra đều rất trực quan, đồng thời việc điều chỉnh bộ điều khiển tương đối dễ dàng. Điều khiển dự báo có thể được sử dụng để điều khiển rất nhiều quá trình, từ những quá trình có đặc tính động học đơn giản cho tới những quá trình phức tạp hơn, kể cả những hệ thống có

thời gian trễ lớn hoặc hệ pha không cực tiểu, hệ không ổn định, hệ nhiễu loạn...

Bằng cách sử dụng mô hình mờ TS và thuật giải di truyền trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một thuật toán khả thi để giải bài toán điều khiển dự báo hệ phi tuyến. Kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng của bộ điều khiển khá tốt, tín hiệu ra $y(t)$ bám tín hiệu đặt $r(t)$ với sai số có thể chấp nhận được. Với sự phát triển vượt bậc của ngành công nghệ thông tin, tốc độ tính toán của vi xử lý được cải thiện đáng kể, điều

này tạo điều kiện thuận lợi cho việc áp dụng các thuật toán trên vào các bài toán điều khiển thời gian thực.

Một hướng nghiên cứu tiếp theo là tìm ra thuật toán để chỉnh định thích nghi các hệ số $\delta(j)$, $\lambda(j)$ trong hàm mục tiêu (3), nghiên cứu ảnh hưởng của nhiễu tác động tới hệ thống để nâng cao hơn nữa chất lượng bộ điều khiển.

MODEL PREDICTIVE CONTROL BASED ON FUZZY SYSTEM, APPLICATION FOR A CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR (CSTR)

Tran Quang Tuan⁽¹⁾, Phan Xuan Minh

(1) Ministry of Science and Technology

(2) Hanoi university of Technology

ABSTRACT: The paper presents one method to design the Model Predictive Controller based on Fuzzy Model. The Plant is simulated by Takagi-Sugeno Fuzzy Model and the Optimisation Problem is solved by the Genetic Algorithms. By using the Fuzzy Model and Genetic Algorithm this MPC gives better quality than the other General Predictive Controllers. The case study of a continuous stirred tank reactor (CSTR) control is presented in this paper.

Keywords: Model Predictive Control (MPC), Takagi Sugeno Fuzzy Model, Genetic Algorithms (GA), Multiple Inputs-Multiple Outputs (MIMO).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J.M. Sousa. *Optimization Issues in Predictive Control with Fuzzy Objective Functions*. International Journal of intelligent systems. Vol. 15, 879-899- (2000).
- [2]. T. Takagi, M.Sugeno. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*. IEEE Trans. System, Man and Cybernetic 15. (1985).
- [3]. D. E. Goldberg. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Wesley. (1989).
- [4]. J. Espinosa, J.Vandewalle, V. Wetz. *Fuzzy logic, Identification and Predictive Control*. Springer Verlag, London. (2004).
- [5]. DiAckley, D. H.; Littman, M. L. *A case for Lamarckian evolution*, Artificial Life III, Langton, C. G. (eds.), SFI Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XVII, Addison-Wesley, pp. 3-10.
- [6]. Åström K. J.; Wittenmark, B. *Computer controlled system: theory and design*, Prentice-Hall, NJ, Bartolini, G.; Punta, E. *Second order sliding mode tracking control of underwater vehicles*, Proceedings of the American Control Conference, Chicago, IL, pp. 65-69. (1984).

- [7]. Bartoszewicz, A. *Discrete-time quasi-sliding mode control strategies*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 4, pp. 633-637, (1998).
- [8]. Bogosyan, O. S.; Gokasan, M.; Jafarov, E. M. *A sliding mode position controller for nonlinear time-varying motion control system*, Proceedings of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 1008-1013, (1999).
- [9]. Chen, C. -T.; Peng, S. -T. *A nonlinear control strategy based on using a shape tunable neural controller*, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 30, no. 4, pp. 637-646, (1997).
- [10]. Coelho, L. S.; Almeida, O. M.; Sumar, R. R.; Coelho, A. A. R. *Predictive control of nonlinear process using multiple models optimization based on fast evolutionary programming*, Soft computing and Industry: recent applications, Rajkumar Roy; Mario Köppen; Seppo Ovaska; Takeshi Furuhashi (eds.), Springer, London, UK, pp. 179-190, 2002a.
- [11]. Coelho, L. S.; Coelho, A. A. R.; Krohling, R. A. *Parameters tuning of multivariable controllers based on memetic algorithm: fundamentals and application*, 17th IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC'02, Vancouver, British Columbia, Canada, 2000b (accepted for publication).
- [12]. John H. Holland, Journal of the ACM (JACM), Volume 9, Issue 3, (1962).
- [13]. Leandro dos Santos Coelho; Renato A. Krohling, *Discrete Variable Structure Control Design based on Lamarckian Evolution*, Springer, London, pp361-370, (2003).