ỨNG DỤNG MPC TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NHIỆT ĐỘ

APPLYING MPC CONTROLLER IN TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

Trần Thái Anh Âu, Trương Thị Bích Thanh

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ttaau@dut.udn.vn; ttbichthanh@gmail.com

Tóm tắt - Lò nhiệt công nghiệp có đặc trưng chung là tính trễ và biến thiên chậm. Do đó, trong công nghiệp bộ điều khiển PID được sử dụng phổ biến trong điều khiển nhiệt độ, vì tính ổn định và dễ cài đặt của nó. Tuy nhiên, vấn đề với PID là tinh chỉnh các tham số PID để thích nghi với việc điều khiển nhiều chế độ hoặc tham số đối tượng có sự biến thiên, cũng như cài đặt các ràng buộc của tín hiệu điều khiển vào bộ điều khiển. Trước những vấn đề đó, bài báo áp dụng điều khiển dự báo (MPC) để tăng chất lượng điều khiển và tăng khả năng thích nghi với nhiều đối tượng lò nhiệt khác nhau, cũng như kiểm soát các ràng buộc điều khiển. Kết quả mô phỏng của bài báo sẽ được so sánh với kết quả của bộ điều khiển PID kinh điển về một số chỉ tiêu chất lượng, đặc biệt là độ quá điều chỉnh và thời gian đáp ứng với các giá trị đặt khác nhau. Qua đó, bộ điều khiển dự báo sẽ cho thấy cho các chỉ tiêu chất lượng điều khiển tốt.

Từ khóa - điều khiển dự báo; quá điều chỉnh; thời gian đáp ứng; điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân; ràng buộc.

Abstract - Industrial furnace is characterized by a time delay and slow response. Therefore, PID controller is commonly used for temperature control, due to its stability and easy installation. However, with PID, we have to refine PID parameters corresponding to different control cases, or variability of process parameters. Moreover, an issue arises in PID controller is how to set constraints for controller signals. For those issues, this article proposes a method based on Model Predictive Control (MPC) for improving performance of the controller and capability to adapt to different temperature objects, as well as control signal constraints. Simulation results of MPC control are compared with the results of PID in terms of performance indices, especially overshoot, response time for different set point values. It is observed that MPC for temperature process control provides better performance indices.

Key words - Model Predictive Control; over shoot; response time; PID controller; constraints.

1. Đặt vấn đề

Các bộ trao đổi nhiệt, hay các lò nhiệt có đặc điểm khá đặc biệt là biến thiên chậm, và có tính trễ về đặc tính thời gian [1], [2]. Để điều khiển ổn định nhiệt độ cho các đối tượng này trong thực tế công nghiệp từ rất lâu đời, PID luôn là sự lựa chọn ưu tiên do cấu trúc khá đơn giản và dễ cài đặt trong thực tế [3], [4], [5]. Tuy nhiên, trong bộ điều khiển PID, hiện tượng "Windup" do tương tác của khâu tích phân trong bộ PID và sự bão hòa có thể gây ra sai lệch tĩnh khá lớn, làm ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bộ điều khiển PID. Do đó đã có nhiều nghiên cứu khắc phục hiện tượng này [6], [7]. Tuy nhiên, việc kiểm soát các ràng buộc tín hiệu điều khiển cũng như việc tinh chỉnh PID khi điều khiển bám tín hiệu đặt khác nhau, hay tham số đối tượng thay đổi vẫn còn là hạn chế của bộ điều khiển PID. Với những vấn đề đó, phương pháp điều khiển dự báo theo mô hình (Model Predictive Control-MPC), với những tính năng điều khiển tốt hơn đã được nghiên cứu nhiều trong những năm gần đây [8], [9]. Trong bài báo này, nhóm tác giả đưa ra phương pháp điều khiển dự báo theo mô hình có ràng buộc áp dụng cho mô hình đối tượng lò nhiệt có trễ.

Nội dung bài báo sẽ được chia thành các mục như sau: Trong mục 2, nhóm tác giả sẽ giới thiệu về phương pháp điều khiển dự báo theo mô hình và các phương trình toán học liên quan. Tiếp theo, mô tả toán học về đối tượng lò nhiệt sẽ được trình bày trong mục 3. Các kết quả mô phỏng sẽ được trình bày trong mục 4. Mục 5 sẽ tóm tắt một số kết luận của bài báo.

2. Điều khiển dự báo

Điều khiển dự báo theo mô hình (Model Predictive Control- MPC) là phương pháp xây dựng dựa trên mô hình hệ thống trong thực tế để dự đoán các đáp ứng dự báo trong tương lai. Tín hiệu điều khiển sẽ được tính toán để đảm bảo sai lệch giữa đáp ứng dự báo trong tương lai và đáp ứng mô hình tham chiếu là nhỏ nhất.

2.1. Xây dựng bài toán

Cho mô hình trạng thái của hệ thống một tín hiệu vào và một tín hiệu ra như sau:

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \qquad (1)$$
$$y(k) = C_m x_m(k)$$

Ở đây, u là tín hiệu điều khiển, y là tín hiệu đầu ra, x_m là biến trạng thái. Ta chuyển mô hình về dạng phù hợp với mục tiêu thiết kế.

Ta dễ dàng có được:

$$\begin{aligned}\Delta x_m(k+1) &= x_m(k+1) - x_m(k)\\ &= A_m\big(x_m(k) - x_m(k-1)\big)\\ &\quad + B_m\big(u(k) - u(k-1)\big)\end{aligned}$$

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k)$$

$$\begin{aligned}y(k+1) - y(k) &= C_m\big(x_m(k+1) - x_m(k)\big)\\ &= C_m \Delta x_m(k+1)\\ &= C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k)\end{aligned}$$

Đặt: $x(k) = \begin{bmatrix}\Delta x_m(k)\\ y(k)\end{bmatrix}$

Ta có, mô hình trạng thái mới như sau:

$$x(k+1) = \overbrace{\begin{bmatrix}A_m & 0_m^T\\ C_m A_m & 1\end{bmatrix}}^{A} x(k) + \overbrace{\begin{bmatrix}B_m\\ C_m B_m\end{bmatrix}}^{B} \Delta u(k) \qquad (2)$$

$$y(k) = \overbrace{[0_m \quad 1]}^{C} \begin{bmatrix}\Delta x_m(k)\\ y(k)\end{bmatrix} = Cx(k)$$

Vậy:

Tại thời điểm lấy mẫu k_i, giả sử rằng vét tơ trạng thái tín hiệu $x(k_i)$ đã đo được.

Giả sử tập hợp các tín hiệu điều khiển dự báo tương lai được ký hiệu như sau:

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i+1), \dots, \Delta u(k_i+N_c-1)$$

Với N_c được gọi là giới hạn điều khiển.

Ký hiệu các vét tơ tín hiệu dự báo như sau:

$x(k_i+1|k_i), x(k_i+2|k_i), \dots x(k_i+N_p|k_i)$

N_p là cửa sổ tối ưu.

Dựa vào mô hình trạng thái (A, B, C), véc tơ trạng thái hiện tại $x(k_i)$ và tập hợp các tín hiệu điều khiển dự báo $\Delta u(k)$, các véc tơ trạng thái tương lai được tính toán như sau:

$$x(k_i+1|k_i) = Ax(k_i) + B\Delta u(k_i)$$

$$x(k_i+2|k_i) = A^2x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i+1)$$

$$\begin{aligned} x(k_i+N_p|k_i) = {} & A^{N_p}x(k_i) + A^{N_p-1}B\Delta u(k_i) \\ & + A^{N_p-2}B\Delta u(k_i+1) + \cdots \\ & + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i+N_c-1) \end{aligned}$$

Các biến đầu ra dự báo sẽ được tính:

$$y(k_i+1|k_i) = CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i)$$

$$\begin{aligned} y(k_i+2|k_i) = {} & CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i \\ & +1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(k_i+N_p|k_i) = {} & CA^{N_p}x(k_i) + CA^{N_p-1}B\Delta u(k_i) \\ & + CA^{N_p-2}B\Delta u(k_i+1) + \cdots \\ & + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i+N_c-1) \end{aligned}$$

Định nghĩa:

$$Y = [y(k_i+1|k_i)\ y(k_i+2|k_i) \dots y(k_i+N_p|k_i)]^T$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i)\ \Delta u(k_i+1) \dots \Delta u(k_i+N_c-1)]^T$$

Ta có:

$$Y = Fx(k_i) + \Phi\Delta U \quad \textbf{(3)}$$

Ở đây:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

Cho một tín hiệu đặt trước $r(k_i)$ tại thời điểm lấy mẫu k_i, mục tiêu của hệ thống điều khiển dự báo là mang đầu ra tín hiệu dự đoán gần bằng tín hiệu đặt trước nhất có thể. Ở đây, ta giả thiết rằng tín hiệu đặt không đổi trong cửa sổ tối ưu.

Tín hiệu đặt trong cửa sổ tối ưu không đổi nghĩa là:

$$R_s{}^T = \overbrace{[1\ 1 \dots 1]}^{N_p} r(k_i)$$

Ta định nghĩa hàm mục tiêu:

$$J = (R_s - Y)^T(R_s - Y) + \Delta U^T\bar{R}\Delta U$$

$$\bar{R} = r_w I_{N_c x N_c} \ (r_w \geq 0)$$

Điều kiện cần để J đạt giá trị nhỏ nhất là:

$$\frac{\partial J}{\partial U} = 0$$

Ta dễ dàng tính được:

$$\Delta U = (\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T(\overline{R_s}r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (4)$$

2.2. Chiến thuật điều khiển lùi dần

Mặc dù véc tơ ΔU chứa các mẫu tín hiệu điều khiển $\Delta u(k_i),\ \Delta u(k_i+1), \dots \Delta u(k_i+N_c-1)$, nguyên lý điều khiển lùi dần chỉ thực hiện lấy mẫu tín hiệu điều khiển đầu tiên $\Delta u(k_i)$ và bỏ qua các mẫu còn lại.

Giá trị tín hiệu này được sử dụng để tính toán véc tơ trạng thái $x(k_i+1)$ phục vụ cho việc tính toán tín hiệu điều khiển ở bước tiếp theo. Qui trình này được thực hiện liên tục cho đến khi $\Delta U = 0$. Cụ thể, ta có các bước tính toán theo chiến thuật điều khiển lùi dần như sau.

Giả sử tại thời điểm k_i ta đã có giá trị $x_m(k_i),\ u(k_i)$

Bước 1: Tính được $x_m(k_i+1)$dựa vào $x_m(k_i),\ u(k_i)$ theo công thức (1)**.** Từ đó, ta suy ra được:

$$\Delta x_m(k_i+1) = x_m(k_i+1) - x_m(k_i)$$

và $y(k_i+1) = C_m x_m(k_i+1)$

Bước 2: Tính được:

$$x(k_i+1) = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k_i+1) \\ y(k_i+1) \end{bmatrix}$$

Bước 3: Tính tín hiệu điều khiển theo **(4):**

$$\Delta U = (\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T(\overline{R_s}r(k_i) - Fx(k_i+1))$$

Xác định biến thiên giá trị điều khiển $\Delta u(k_i+1)$ là thành phần đầu tiên của ΔU.

Do đó, tín hiệu điều khiển ở bước k_i+1

$$u(k_i+1) = u(k_i) + \Delta u(k_i+1)$$

Vậy tại đây, ta có các giá trị trạng thái điều khiển tại thời điểm lấy mẫu k_i+1: $x_m(k_i+1),\ u(k_i+1)$.

Ta lặp lại bước 1 cho đến khi $\Delta U = 0$.

2.3. Điều khiển dự báo theo mô hình có ràng buộc

Trong thực tế, cụ thể đối với đối tượng lò nhiệt trong bài báo, tín hiệu điều khiển sẽ có sự ràng buộc trong giới hạn giá trị nhất định.

Giả sử: $u_{min} \leq u(k_i) \leq u_{max}$

Ta có:

$$u(k_i) = u(k_i-1) + \Delta u(k_i)$$

$$\Delta u(k_i) = \overbrace{[1\ 0\ 0 \dots 0]}^{N_c}\Delta U$$

Từ đó suy ra:

$$\overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}}^{M}\Delta U \leq \overbrace{\begin{bmatrix} u_{max} - u(k_i-1) \\ u_{min} + u(k_i-1) \end{bmatrix}}^{\gamma}$$

Như vậy, tại thời điểm k_i, bài toán tìm ΔU là bài toán tối ưu ràng buộc để hàm mục tiêu:

$$J = (R_s - Y)^T(R_s - Y) + \Delta U^T\bar{R}\Delta U \quad (5)$$

Đạt giá trị nhỏ nhất với tín hiệu ΔU phải thỏa mãn:

$$M\Delta U \leq \gamma$$

Với các giá trị M và γ như trên.

Bài toán này dễ dàng giải được bằng các phương pháp kinh điển như: Active set, Hildreth và nhiều phương pháp khác và đã được cụ thể bằng các công cụ tính toán trong phần mềm thông dụng như Matlab.

Như vậy, các bước giải bài toán điều khiển dự báo có ràng buộc thực hiện như sau:

Giả sử tại thời điểm k_i ta đã có giá trị $x_m(k_i),\ u(k_i)$

Bước 1: Tính được $x_m(k_i+1)$ theo công thức **(1)**. Từ đó suy ra được:

$$\Delta x_m(k_i+1) = x_m(k_i+1) - x_m(k_i)$$

và $y(k_i+1) = C_m x_m(k_i+1)$

Bước 2: Tính được:

$$x(k_i+1) = \begin{bmatrix}\Delta x_m(k_i+1)\\ y(k_i+1)\end{bmatrix}$$

Bước 3: Xác định giá trị

$$\gamma = \begin{bmatrix}u_{max} - u(k_i)\\ u_{min} + u(k_i)\end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix}1 & 0 & \dots & 0\\ -1 & 0 & \dots & 0\end{bmatrix}$$

Giải bài toán tối ưu, tìm giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu như (5).

$$J = (R_s - Y)^T(R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U$$

Với điều kiện ràng buộc:

$$M\Delta U \le \gamma$$

Xác định biến thiên giá trị điều khiển $\Delta u(k_i+1)$ là thành phần đầu tiên của ΔU.

Do đó, tín hiệu điều khiển ở bước k_i+1

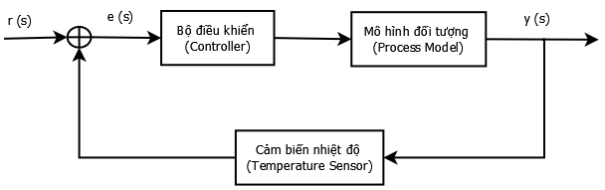
$$u(k_i+1) = u(k_i) + \Delta u(k_i+1)$$

Vậy tại đây ta có các giá trị trạng thái điều khiển tại thời điểm lấy mẫu k_i+1: $x_m(k_i+1),\ u(k_i+1)$.

Ta lặp lại bước 1 cho đến khi $\Delta U = 0$.

3. Mô hình đối tượng lò nhiệt

Mục đích chính của bài báo này là xây dựng bộ điều khiển dự báo để điều khiển nhiệt độ của một lò nhiệt với các giới hạn ràng buộc theo yêu cầu. Mô hình điều khiển chung được cho như **Hình 1**.



Hình 1. *Sơ đồ nguyên lý điều khiển nhiệt độ*

Trước khi thiết kế bộ điều khiển, ta cần tìm hiểu về mô hình đối tượng cần điều khiển. Trong bài báo này, nhóm tác giả xét đến đối tượng điều khiển ở đây là điều khiển nhiệt độ lò điện trở (heating tank) công nghiệp được nung bằng điện.

Lò điện công nghiệp thường được mô phỏng bằng một khâu quán tính bậc 1, dựa trên sự cân bằng năng lượng với giả định điều kiện đồng nhất của môi chất bên trong lò. Mô hình lò điện còn chứa một khâu trễ, tượng trưng cho thời gian trễ xuất hiện giữa kích thích làm nóng lò và cảm biến nhiệt độ [2]. Trong miền Laplace, mô hình chung của một đối tượng lò điện công nghiệp có dạng sau:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \quad (6)$$

Trong đó: K: hằng số khuếch đại của đối tượng;

τ: hằng số thời gian trễ;

T: hằng số thời gian bậc nhất.

Áp dụng phép nội suy Taylor ta có:

$$e^{\tau s} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\tau s)^n}{n!} = 1 + \tau s + \frac{(\tau s)^2}{2!} + \frac{(\tau s)^3}{3!} + \cdots.$$

Một cách gần đúng ta có:

$$e^{\tau s} = 1 + \tau s$$

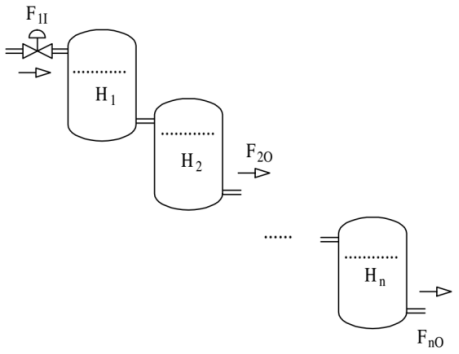
Do đó, đối tượng lò nhiệt có thể mô phỏng như một khâu quán tính bậc 2, có dạng:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s+1)((T_2 s+1)} \quad (7)$$

Trong đó, T_1, T_2 lần lượt là các hằng số thời gian bậc 1, bậc 2.

Trong trường hợp đối tượng là một hệ thống nhiều lò nhiệt ghép nối tiếp với nhau (**Hình 2**), mỗi một lò nhiệt là một khâu quán tính bậc 1, và như vậy hệ thống các lò nhiệt sẽ được mô hình hóa thành một chuỗi các khâu quán tính bậc 1 [10]. Giả sử, hệ thống có 3 lò nhiệt ghép nối tiếp với nhau, thì mô hình đối tượng sẽ có dạng:

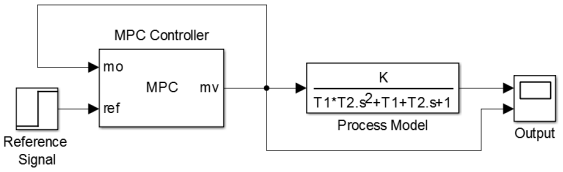
$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s+1)((T_2 s+1)((T_3 s+1)(T_4 s+1)} \quad (8)$$



Hình 2. *Hệ thống lò nhiệt ghép nối tiếp*

4. Kết quả mô phỏng

Để đánh giá kết quả việc vận dụng phương pháp điều khiển dự báo theo mô hình có ràng buộc vào điều khiển nhiệt độ lò nhiệt một hệ thống điều khiển được lập trình và mô phỏng trong matlab. Mô hình điều khiển dự báo được cho như sau (**Hình 3**):



Hình 3. *Mô hình điều khiển dự báo (MPC)*

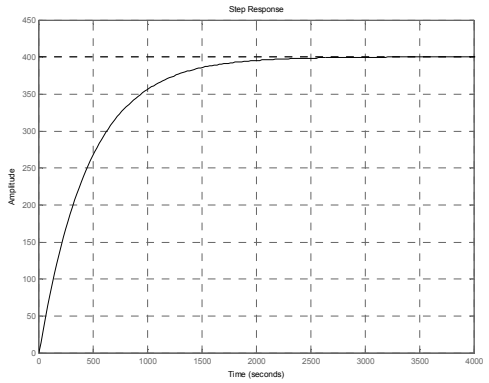
Để đánh giá bộ điều khiển đề xuất, ta chọn 2 loại đối tượng điều khiển là lò nhiệt đơn, tương ứng khâu quán tính bậc 2 và hệ lò nhiệt gồm 3 lò nhiệt ghép nối tiếp, ứng với khâu quán tính bậc 4. Việc lựa chọn này nhằm thử nghiệm khả năng áp dụng trên mô hình đối tượng có các tham số thay đổi. Và kết quả mô phỏng ở nhiều giá trị đặt khác nhau là để thử nghiệm khả năng điều khiển ở nhiều chế độ khác nhau.

Đối tượng lò nhiệt thứ nhất được trích lại từ [11]:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s+1)((T_2 s+1)}$$

Trong đó: K=400°C, T_1=450s, T_2=5s.

Đường đặc tính tự nhiên của đối tượng được thể hiện như Hình 4.

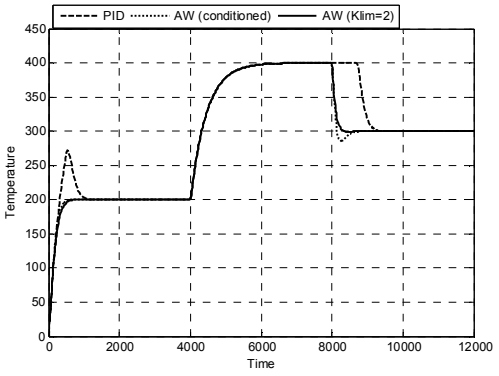


Hình 4. *Đặc tính tự nhiên của đối tượng*

Ta nhận thấy rằng, lò nhiệt đạt đến trạng thái xác lập sau khoảng thời gian t = 2000s.

Dùng phương pháp Relay-feedback để xác định tham số bộ điều khiển PID [11], ta được:

Kp = 6.6396 Ki = 0.0375 Kd = 2.0375

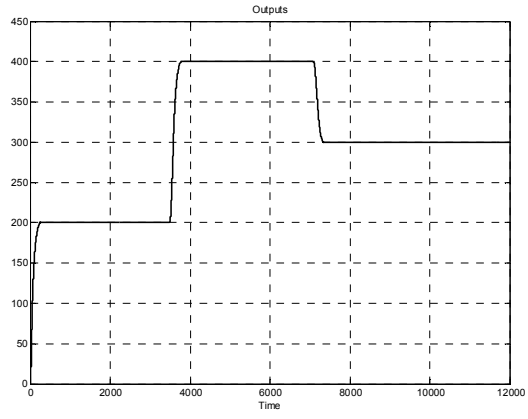


Hình 5. *Đáp ứng lò nhiệt với bộ điều khiển PID*

Sử dụng các sơ đồ PID có tích hợp AW [11], ta được kết quả điều khiển PID như **Hình 5**.

Từ đồ thị, ta thấy, kết quả PID phải có sự tinh chỉnh qua hệ số Klim để đạt kết quả bám tốt nhất khi giá trị đặt thay đổi. Tuy nhiên, việc chọn Klim phụ thuộc vào từng đối tượng sẽ gây khó khăn cho quá trình điều khiển.

Sử dụng MPC có ràng buộc cho đối tượng trên, ta được kết quả điều khiển như sau (**Hình 6**).



Hình 6. *Đáp ứng lò nhiệt với điều khiển MPC*

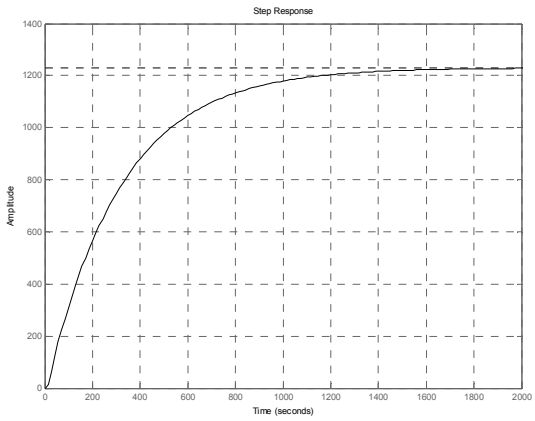
Từ đồ thị, ta thấy việc đưa các ràng buộc tín hiệu điều khiển phải là tín hiệu không âm (u_{min}=0, u_{max}=∞), kết quả điều khiển bằng MPC có ràng buộc thu được tốt hơn rất nhiều, độ quá điều chỉnh bằng 0, và thời gian đáp ứng nhanh hơn khá nhiều, khoảng 300s.

Xét đối tượng lò nhiệt có biến thiên rất chậm, là một khâu bậc 4 có các hằng số thời gian như sau :

T_1=300^{o}C ; T_2=10^{o}C ; T_3=10^{o}C ; T_4=0,1^{o}C ; K = 1230^{o}C

Đây là trích dẫn tham số của mô phỏng của một lò nhiệt thực tế đang được thử nghiệm tại Công ty TNHH Shinko Technos.

Đặc tính nhiệt độ tự nhiên của lò có dạng như **Hình 7**.



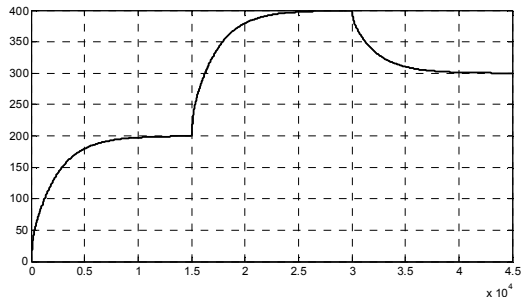
Hình 7. *Đặc tính tự nhiên của đối tượng*

Với đối tượng này, kết quả dò tìm PID được cho như sau:

Kp = 0.2224 Ki = 0.0005 Kd = 0.5942

Áp dụng lại sơ đồ PID có tích hợp AW [11], ta được kết quả điều khiển PID như sau (**Hình 8**).

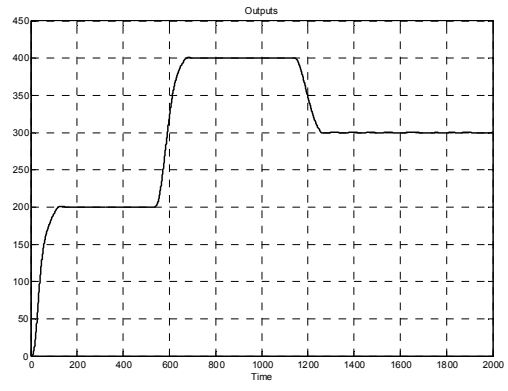
Từ đồ thị, ta nhận thấy, dù điều khiển bằng PID hay PID-AW, đáp ứng lò nhiệt đều chậm, tuy không có độ quá điều chỉnh. Việc này gây tốn nhiều năng lượng.



Hình 8. *Đáp ứng lò nhiệt có điều khiển PID-AW*

Với một đối tượng là loại lò nhiệt có độ trễ thời gian lớn thì bộ điều khiển PID đã không tỏ ra hiệu quả trong việc làm đáp ứng nhanh hơn. Để có kết quả tốt hơn, ta phải chọn lại tham số bổ sung a trong khâu tính các giá trị Kp, Ki, Kd. Hoặc ta phải lựa chọn phương pháp khác trong việc xác định tham số bộ điều khiển PID.

Sử dụng MPC có ràng buộc cho đối tượng trên, ta được kết quả như **Hình 9**.



Hình 9. *Đáp ứng lò nhiệt với điều khiển MPC*

Từ đồ thị, đáp ứng nhiệt độ lò nhiệt với điều khiển MPC có ràng buộc nhanh hơn đáng kể so với PID, thời gian đáp ứng chỉ còn 130s. Độ quá điều chỉnh hầu như bằng 0.

Như vậy, qua 2 loại đối tượng này, điều khiển MPC có ràng buộc có ưu điểm hơn về khả năng đáp ứng tốt với các loại đối tượng lò nhiệt nhanh chậm khác nhau.

5. Kết luận và kiến nghị

Qua khảo sát lý thuyết và ứng dụng bộ điều khiển dự báo theo mô hình vào đối tượng lò nhiệt và so sánh với phương pháp điều khiển PID, ta thấy chất lượng điều khiển được cải thiện rõ rệt: Độ quá điều chỉnh bằng không và thời gian đáp ứng nhanh hơn nhiều so với phương pháp PID. Ngoài ra, điều khiển dự báo theo mô hình xử lý được vấn đề tín hiệu điều khiển bị ràng buộc, cái mà PID không thể tích hợp vào được. Điều này cho thấy khả năng ứng dụng rất triển vọng của bộ điều khiển dự báo theo mô hình vào thực tế điều khiển đối tượng nhiệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nithyarani, N., & GirirajKumar, S. M.: Model Identification of Temperature Process and Tuning with Advanced Control Techniques. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2013,(p.443-447).

[2] Dumitrace, I and al.: Electronical Automatisation, E.D.P.Bucuresti 1993.

[3] Åström, K.J and Hägglund, T.: Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

[4] Sowmya, V. Selvi, et al.: Application of various PID controller tuning techniques for a temperature system. International Journal of Computer Applications103.14 (2014).

[5] Hussain, K. M., Zepherin, R. A. R., & Kumar, M. S.: Comparison of tuning methods of PID controllers for FOPTD system. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering 2014, 2(3), 1177-1180.

[6] Tarbouriech, S.; Turner M. Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems. Control theory & Applications, IET, 2009.

[7] Ghoshal, Anirban and John, Vinod: *Anti-windup Schemes for Proportional Integral and Proportional Resonant Controller.* National Power Electronics Conference, 2010.

[8] Darandale, R. A., Kadu, C. B., & Patil, C. Y. (2013). Design of Model Predictive Control for Temperature Process. In proceedings of International Conference on advances in signal processing and communication.

[9] Rojas, J. D., Ocampo-Martinez, C., & Kunusch, C. (2013, November). Thermal modelling approach and model predictive control of a water-cooled PEM fuel cell system. In Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE (pp. 3806-3811). IEEE.

[10] Normey-Rico, J. E.; Camacho, E. F.: Dead-time Processes. Book: Control of Dead-time Processes (Chapter 2, p.9 – 53). Springer London, 2007.

[11] Trương, T.B.T.; Đoàn, Q.V.; Trần, T.A.A., "Ứng dụng PID trong hệ thống điều khiển nhiệt độ", *Tạp chí KH&CN,* Đại học Đà Nẵng, 2013.

(BBT nhận bài: 31/10/2016, phản biện xong: 17/11/2016)