

Xây dựng bộ điều khiển dự báo theo mô hình cho hệ song tuyến bất định và ứng dụng vào điều khiển thiết bị phản ứng khuấy trộn liên tục thủy phân Acetic Anhydride

Model Predictive Controller Design for Uncertain Bilinear Systems and an Application to Control a Continuously Stirred Tank Reactor with Hydrolysis Acetic Anhydride

Mai Thị Đoan Thanh¹, Nguyễn Vũ Anh Tuấn², Trần Đình Vững², Đoàn Quang Vinh^{3*}

¹Trường Cao đẳng nghề Đà Nẵng, 99 Tô Hiến Thành, Đà Nẵng

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

³Đại Học Đà Nẵng, 41 Lê Duẩn, Đà Nẵng

Đến Tòa soạn: 06-1-2017; chấp nhận đăng: 28-02-2017

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển dự báo cho hệ MIMO song tuyến có chứa các thành phần bất định biến đổi chậm. Phương pháp điều khiển dự báo đề xuất này làm việc theo nguyên tắc thiết lập mô hình dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa dọc theo quỹ đạo trạng thái của mô hình song tuyến và ước lượng xấp xỉ các thành phần bất định. Để tăng chất lượng bám tín hiệu đặt, một thành phần bù tín hiệu điều khiển đầu vào cũng đã được bổ sung. Nguyên lý bù tín hiệu đầu vào này được xây dựng hoàn toàn theo nguyên lý của điều khiển thích nghi. Để xác nhận chất lượng bộ điều khiển đề xuất này, bài báo cũng đã trình bày một ứng dụng của bộ điều khiển vào điều khiển bám tín hiệu đặt trước cho hệ phản ứng khuấy trộn liên tục thủy phân Acetic Anhydride.

Từ khóa: Điều khiển dự báo, hệ song tuyến bất định, thủy phân Acetic Anhydride

Abstract

The paper proposes a predictive control method for a bilinear MIMO system with slow varying uncertain parameters. This proposed predictive control method operates under the principle of setting predictive model based on a linearization along the trajectories of the bilinear system and estimated uncertain parameters. To increase the capability to follow the setpoint signal, a compensation input control signal component has also been added. The input compensation signal is added to improve the tracking problem. The input compensation is designed based on an adaptive mechanism. An application of the control algorithm in continuous stirred tank reactor with hydrolysis acetic anhydride is given to illustrate the tracking performance.

Keywords: Control predictive, bilinear uncertain system, hydrolysis Acetic anhydride

1 Giới thiệu chung

Những năm gần đây điều khiển dự báo luôn được xem là một giải pháp kỹ thuật hữu hiệu để giải quyết các bài toán điều khiển hệ tuyến tính đa biến tiên định có ràng buộc [1]. Nhiều ứng dụng thành công trong thực tế đã minh chứng cho điều đó. Cũng chính từ sự thành công đó mà người ta đã cố gắng mở rộng nó sang cho cả hệ phi tuyến tiên định mà các phương pháp mở rộng giới thiệu ở tài liệu [2] là một ví dụ. Tuy nhiên việc ứng dụng những phương pháp điều khiển dự báo phi tuyến này vào thực tế lại gặp nhiều trở ngại, do:

– Cho dù mô hình hệ phi tuyến là chính xác thì công thức dự báo tín hiệu ra là một hàm hợp của rất nhiều hàm phi tuyến, nên sẽ có độ phi tuyến rất cao,

tăng theo cấp hàm mũ của tầm dự báo, làm cho việc giải bài toán tối ưu phi tuyến sau này trở nên quá phức tạp và không còn chính xác [3].

– Tính ổn định của hệ yêu cầu cần phải bổ sung thêm một hàm phạt thích hợp vào hàm mục tiêu, trong khi chưa có một gợi ý khả quan nào cho việc xác định hàm phạt này [2].

Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển dự báo phi tuyến đã có lại càng không thích hợp nếu như trong hệ lại có thêm những thành phần bất định (không xác định được) hoặc mô hình của hệ là không chính xác [1], [2].

Để vượt qua được những nhược điểm trên, bài báo này sẽ giới thiệu một phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho hệ song tuyến bất định, là lớp hệ phi tuyến thường gặp nhất trong các đối tượng công nghiệp thực tế [4], mà không cần phải thực hiện hàm hợp các hàm phi tuyến để dự báo tín hiệu đầu ra

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 903586586

Email: dqvinh@ac.udn.vn

và cũng không cần tới hàm phạt bổ sung để đảm bảo tính ổn định cho hệ kín. Phương pháp điều khiển đề xuất này được xây dựng trên nền tuyến tính hóa mô hình song tuyến của hệ dọc theo quỹ đạo quan sát được từ hệ song tuyến trong quá khứ, phục vụ việc dự báo. Nhờ đó ta lại có thể sử dụng lại được từng đoạn theo thời gian phương pháp điều khiển dự báo tuyến tính mà không cần phải sử dụng thêm hàm phạt vốn bắt buộc phải có của điều khiển dự báo hệ phi tuyến. Hơn thế nữa, phương pháp đề xuất này còn áp dụng được cho cả hệ song tuyến có thành phần bất định biến đổi theo thời gian dạng cộng tính trong mô hình nhờ đã được bổ sung thêm thành phần ước lượng xấp xỉ những thành phần bất định này từ các dữ liệu đo được từ hệ trong quá khứ.

2 Thiết kế bộ điều khiển

Đối tượng phi tuyến được quan tâm trong bài báo này là hệ song tuyến bất định bậc n có mô hình trạng thái không liên tục:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + \underline{z}_k \end{cases} \quad (1)$$

trong đó:

- $\underline{x}_k = (x_1[k], \dots, x_n[k])^T$ là vector của tất cả n biến trạng thái của hệ,
- $\underline{u}_k = (u_1[k], \dots, u_m[k])^T$ là vector của m tín hiệu đầu vào (tín hiệu điều khiển),
- $\underline{y}_k = (y_1[k], \dots, y_p[k])^T$ là vector của q tín hiệu đầu ra,
- $A(\underline{x}_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B(\underline{x}_k) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C(\underline{x}_k) \in \mathbb{R}^{q \times n}$ là các ma trận hệ thống phụ thuộc trạng thái,
- \underline{v}_k , \underline{z}_k là các thành phần bất định phụ thuộc thời gian của hệ và được giả thiết rằng biến đổi chậm,
- chỉ số k biểu diễn giá trị của tín hiệu tại thời điểm $t = kT_a$ với T_a là chu kỳ trích mẫu.

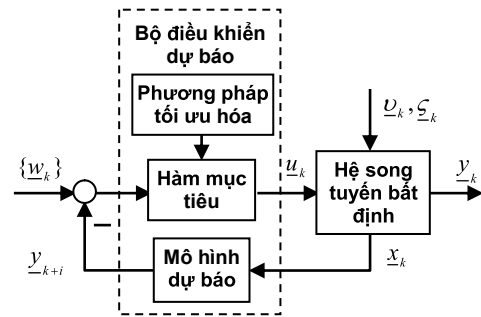
Nhiệm vụ thiết kế là xây dựng một bộ điều khiển phản hồi trạng thái, ký hiệu bởi $\mathcal{K}^{NMPC}(\underline{x}_k)$, để điều khiển đầu ra hệ (1) bám theo được dãy giá trị đặt $\{w_k\}$ cho trước và chất lượng bám giá trị đặt này không bị ảnh hưởng bởi các thành phần bất định \underline{v}_k , \underline{z}_k tác động vào hệ.

Bài báo sẽ sử dụng nguyên tắc điều khiển dự báo theo mô hình (Model Predictive Control) để thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái $\mathcal{K}^{NMPC}(\underline{x}_k)$ cho

hệ song tuyến bất định (1). Như vậy bộ điều khiển này sẽ gồm ba khâu chính:

- 1) Khâu dự báo tín hiệu ra, có nhiệm vụ xác định các giá đầu ra trong tương lai \underline{y}_{k+i} , $i=1,2, \dots, N$ tính từ thời điểm k hiện tại, trong đó $N \geq 2$ là độ rộng cửa sổ dự báo. Kết quả của khâu dự báo tín hiệu ra này là các hàm \underline{y}_{k+i} phụ thuộc tín hiệu đầu vào tương lai \underline{u}_{k+j} , $j=0,1, \dots, N-1$.
- 2) Khâu hàm mục tiêu có nhiệm vụ biểu diễn chất lượng bám dãy giá trị đặt mong muốn $\{w_k\}$ của hệ dưới dạng hàm phụ thuộc các tín hiệu đầu vào tương lai \underline{u}_{k+j} , $j=0,1, \dots, N-1$.
- 3) Khâu tối ưu hóa có nhiệm vụ xác định tín hiệu điều khiển \underline{u}_k hiện tại để cực tiểu hóa hàm mục tiêu trên.

Hình 1 biểu diễn cấu trúc một bộ điều khiển dự báo theo mô hình gồm ba khâu cơ bản đã nêu ở trên.



Hình 1. Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái

Ngoài ra, do hệ là bất định nên bên cạnh ba khâu cơ bản trên của một bộ điều khiển dự báo, bộ điều khiển dự báo của bài báo sẽ còn có thêm khâu ước lượng xấp xỉ hai thành phần bất định \underline{v}_k , \underline{z}_k trong hệ. Những giá trị ước lượng xấp xỉ này sẽ được bài báo ký hiệu là $\hat{\underline{v}}_k$ và $\hat{\underline{z}}_k$.

2.1 Xây dựng mô hình dự báo

Để xây dựng mô hình dự báo, bài báo đi từ mô hình song tuyến (1) của đối tượng điều khiển, trong đó các thành phần bất định \underline{v}_k , \underline{z}_k được thay bằng những giá trị ước lượng của chúng là $\hat{\underline{v}}_k$ và $\hat{\underline{z}}_k$. Các giá trị ước lượng này đều được xem là hằng số trong toàn bộ cửa sổ dự báo hiện tại $[k, k+N-1]$. Khi đó mô hình thay thế này sẽ là:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + \underline{z}_k \end{cases}$$

Do tại thời điểm k hiện tại trạng thái \underline{x}_k của hệ là đã biết, nên tất cả các ma trận hệ thống bao gồm:

$$A_k = A(\underline{x}_k), B_k = B(\underline{x}_k), C_k = C(\underline{x}_k) \quad (2)$$

đều là các ma trận hằng tiền định (xác định rõ được). Khi đó mô hình trên trở thành LTI rõ:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k \underline{u}_k + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + \underline{z}_k \end{cases} \quad (3)$$

Tuy nhiên, do bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái $\mathcal{K}^{NMPC}(\underline{x}_k)$ sẽ được thiết kế sau này lại sử dụng tầm dự báo hữu hạn (độ rộng của cửa sổ dự báo) nên rất có thể trong hệ kín vẫn còn tồn tại sai lệch tĩnh. Do đó để chắc chắn rằng hệ kín không còn sai lệch tĩnh, ta sẽ bổ sung thêm vào hệ hở một thành phần tích phân và việc bổ sung thêm khâu tích phân đó sẽ được thực hiện trên bộ điều khiển thông qua mô hình dự báo.

Viết lại mô hình LTI rõ (3) thành:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k \Delta \underline{u}_k + B_k \underline{u}_{k-1} + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + \underline{z}_k \end{cases}$$

trong đó

$$\Delta \underline{u}_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1}$$

sẽ có:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \underline{x}_{k+1} \\ \underline{u}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ \Theta & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_k \\ I \end{pmatrix} \Delta \underline{u}_k + \begin{pmatrix} \underline{v}_k \\ \underline{0} \end{pmatrix} \\ \underline{y}_k = (C_k, \Theta) \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix} + \underline{z}_k \end{cases}$$

với Θ là ma trận có tất cả các phần tử bằng 0. Đặt:

$$\begin{aligned} \underline{z}_k &= \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}, \mathbf{A}_k = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ \Theta & I \end{pmatrix}, \mathbf{B}_k = \begin{pmatrix} B_k \\ I \end{pmatrix} \\ \mathbf{C}_k &= (C_k, \Theta), \theta_k = \begin{pmatrix} \underline{v}_k \\ \underline{0} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

thì mô hình trên trở thành:

$$\begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \mathbf{A}_k \underline{z}_k + \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_k + \theta_k \\ \underline{y}_k = \mathbf{C}_k \underline{z}_k + \underline{z}_k \end{cases} \quad (5)$$

Rõ ràng mô hình mới (5) đã có thêm thành phần tích phân, vì:

$$0 = \det(sI - \mathbf{A}_k) = \det \begin{pmatrix} sI - A_k & -B_k \\ \Theta & (s-1)^m I \end{pmatrix}$$

có m nghiệm $s=1$.

Ta sẽ sử dụng mô hình LTI rõ này sau khi đã có thêm thành phần tích phân, làm mô hình dự báo. Với mô hình dự báo đó thì:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{k+i} &= \mathbf{A}_k \underline{z}_{k+i-1} + \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1} + \theta_k \\ &= \mathbf{A}_k^2 \underline{z}_{k+i-2} + \mathbf{A}_k \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1} + \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1} + (\mathbf{A}_k + I)\theta_k \\ &\vdots \\ &= \mathbf{A}_k^i \underline{z}_k + \mathbf{A}_k^{i-1} \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_k + \dots + \mathbf{A}_k \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1} + \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1} + (\mathbf{A}_k^{i-1} + \dots + \mathbf{A}_k + I)\theta_k \end{aligned}$$

Suy ra

$$\underline{y}_{k+i} = \mathbf{C}_k (\mathbf{A}_k^i \underline{z}_k + \mathbf{A}_k^{i-1} \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_k + \dots + \mathbf{A}_k \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-2} + \mathbf{B}_k \Delta \underline{u}_{k+i-1}) + \underline{d}_i$$

trong đó

$$\underline{d}_i = \mathbf{C}_k (\mathbf{A}_k^{i-1} + \dots + \mathbf{A}_k + I)\theta_k + \underline{z}_k \quad (6)$$

Bởi vậy, nếu viết chung lại tất cả các đầu ra dự báo thuộc cửa sổ dự báo hiện tại \underline{y}_{k+i} , $i=1, \dots, N$ thành một vector chung:

$$\mathbf{y} = \text{col}(\underline{y}_{k+1}, \underline{y}_{k+2}, \dots, \underline{y}_{k+N})$$

ta sẽ được:

$$\mathbf{y} = E \underline{p} + \mathbf{d} \quad (7)$$

trong đó

$$\begin{aligned} E &= \begin{pmatrix} \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k & \Theta & \dots & \Theta \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N-1} \mathbf{B}_k & \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N-2} \mathbf{B}_k & \dots & \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k \end{pmatrix} \\ \mathbf{d} &= \begin{pmatrix} \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k \\ \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k + \begin{pmatrix} \underline{d}_1 \\ \vdots \\ \underline{d}_N \end{pmatrix} \\ \underline{p} &= \text{col}(\Delta \underline{u}_k, \Delta \underline{u}_{k+1}, \dots, \Delta \underline{u}_{k+N-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

và Θ là ký hiệu của ma trận có tất cả các phần tử bằng 0. Hiển nhiên \mathbf{d} là vector hằng xác định được (vector hàm rõ).

Công thức (7) trên cũng chính là toàn bộ các đầu ra dự báo của hệ song tuyến tính từ thời điểm k hiện tại thuộc cửa sổ dự báo $[k, k+N-1]$. Ta có thể thấy ngay rằng các đầu ra dự báo này của hệ song tuyến bất định (1) ban đầu bây giờ đã được biểu diễn dưới

dạng các hàm tuyến tính của tín hiệu đầu ra trong tương lai, được viết chung lại thành vector \underline{p} .

2.2 Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu có nhiệm vụ biểu diễn mục đích điều khiển bám $\underline{y}_k \rightarrow \underline{w}_k$ dưới dạng hàm của \underline{p} . Tuy nhiên, do sử dụng cửa sổ dự báo hữu hạn nên ở thời điểm điều khiển quá khứ so với thời điểm hiện tại k có thể vẫn tồn tại một sai lệch bám $\underline{w}_{k-1} - \underline{y}_{k-1} \neq \underline{0}$. Do đó để bù lại, ở cửa sổ điều khiển hiện tại ta sẽ điều khiển sao cho đầu ra của hệ bám theo được tín hiệu đặt có bù thích nghi là:

$$\underline{w}_k - (\underline{y}_{k-1} - \underline{w}_{k-1})$$

Nói cách khác, nếu như ta ký hiệu toàn bộ tín hiệu đặt có bù nằm trong khoảng cửa sổ điều khiển hiện tại mà hệ cần phải bám theo là vector \underline{w} thì :

$$\underline{w} = \begin{pmatrix} \underline{w}_{k+1} - (\underline{y}_{k-1} - \underline{w}_{k-1}) \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} - (\underline{y}_{k-1} - \underline{w}_{k-1}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

và hàm mục tiêu phải biểu diễn được sai lệch bám trong toàn bộ cửa sổ điều khiển hiện tại, ký hiệu bởi:

$$\underline{e} = \underline{y} - \underline{w} = E\underline{p} + \underline{d} - \underline{w} = E\underline{p} - \underline{s} \quad \text{với } \underline{s} = \underline{w} - \underline{d} \quad (10)$$

phụ thuộc vào tín hiệu điều khiển tương lai \underline{p} .

Có thể thấy tồn tại vô số hàm mục tiêu đạt thỏa mãn yêu cầu nêu trên. Sau đây, và cũng để đơn giản cho công việc tối ưu hóa sau này mà không làm ảnh hưởng nhiều tới chất lượng điều khiển ở cửa sổ điều khiển hiện tại, ta sẽ sử dụng hàm mục tiêu dạng toàn phương tính từ thời điểm k :

$$J_k(\underline{p}) = \underline{e}^T Q_k \underline{e} + \underline{p}^T R_k \underline{p} \rightarrow \min \quad (11)$$

với Q_k, R_k là hai ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn, miễn là có số chiều phù hợp. Cụ thể là Q_k phải có số chiều là $qN \times qN$ và R_k phải có số chiều là $mN \times mN$.

2.3 Tối ưu hóa

Thay (10) vào công thức (11) của hàm mục tiêu, ta được:

$$J_k(\underline{p}) = (\underline{E}\underline{p} - \underline{s})^T Q_k (\underline{E}\underline{p} - \underline{s}) + \underline{p}^T R_k \underline{p} = \underline{p}^T (E^T Q_k E + R_k) \underline{p} - 2s^T Q_k E \underline{p} + s^T Q_k s$$

Do thành phần $s^T Q_k s$ trong biểu thức trên không phụ thuộc \underline{p} nên mục đích cực tiểu hóa hàm mục tiêu (11) là tương đương với:

$$\underline{p}^T (E^T Q_k E + R_k) \underline{p} - 2s^T Q_k E \underline{p} \rightarrow \min .$$

Suy ra [3]:

$$\underline{p} = (E^T Q_k E + R_k)^{-1} E^T Q_k s$$

và ta có tín hiệu điều khiển $\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + \Delta \underline{u}_k$ cần tìm ở thời điểm k hiện tại là:

$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + (I, \Theta, \dots, \Theta) \underline{p} \quad (12)$$

2.4 Ước lượng xấp xỉ các thành phần bất định

Xuất phát từ mô hình song tuyến bất định (1) ban đầu đã cho là không liên tục của đối tượng điều khiển, ta có ngay:

$$\begin{cases} \underline{v}_{k-1} = \underline{x}_k - A(\underline{x}_{k-1})\underline{x}_{k-1} - B(\underline{x}_{k-1})\underline{u}_{k-1} \\ \underline{z}_k = \underline{y}_k - C(\underline{x}_k)\underline{x}_k \end{cases}$$

Từ đây và với sự hiển nhiên rằng ở thời điểm k hiện tại các giá trị quá khứ $\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}, \underline{y}_{k-1}$ là đã có và $\underline{x}_k, \underline{y}_k$ là đo được, cũng như $\underline{v}_k, \underline{z}_k$ của hệ được giả thiết là biến đổi chậm, ta hoàn toàn xấp xỉ chúng được nhờ:

$$\begin{cases} \widehat{\underline{v}}_k = \underline{x}_k - A(\underline{x}_{k-1})\underline{x}_{k-1} - B(\underline{x}_{k-1})\underline{u}_{k-1} \\ \widehat{\underline{z}}_k = \underline{y}_k - C(\underline{x}_k)\underline{x}_k \end{cases} \quad (13)$$

2.5 Thuật toán điều khiển

Thuật toán điều khiển thực chất gồm các vòng lặp $k = 0, 1, \dots$ với mỗi vòng lặp được hình thành từ các công thức (2) cho việc tuyến tính hóa mô hình song tuyến xung quanh quỹ đạo trạng thái quan sát được, công thức (13) cho việc xấp xỉ hóa các thành phần bất định trong mô hình từ những giá trị vào ra và trạng thái đo được trong quá khứ, cũng như cho việc xác định tín hiệu điều khiển \underline{u}_k hiện tại, trong đó ma trận E và vector s được xây dựng nhờ các công thức (8), (9) và (10).

Tuy nhiên, để có thể tiết kiệm các ô nhớ trung gian trong quá trình cài đặt thuật toán cũng như nâng cao khả năng thỏa mãn thêm điều kiện ràng buộc về biên độ của tín hiệu điều khiển $|\underline{u}_k| \leq U$ với $U > 0$ cho trước, ta có thể sửa đổi lại các công thức đó theo nguyên tắc như sau:

- Thứ nhất là bỏ đi các chỉ số k của các tín hiệu khi cài đặt. Những giá trị quá khứ như $\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}, \underline{y}_{k-1}$ sẽ được thay bằng $\underline{x}', \underline{u}'$ và \underline{y}' .
- Thứ hai là thay Q_k, R_k bởi Q, R có Q được chọn một lần ở bước khởi tạo, còn R được thay đổi giảm dần theo từng vòng lặp. Nguyên tắc thay đổi Q_k, R_k này xuất phát từ cấu trúc hàm mục tiêu (11) là khi R_k càng lớn, p sẽ càng nhỏ và ngược lại khi Q_k càng lớn, quá trình quá độ của hệ càng nhanh, vì có e càng nhỏ.

Cùng với những nhận xét trên thì thuật toán điều khiển đề xuất sẽ có cấu trúc gồm các bước tính sau:

- 1) Chọn $N \geq 2$ và Q, R đối xứng xác định dương, trong đó R nên được chọn đủ lớn. Chọn hằng số $0 < \mu < 1$ để giảm R theo từng vòng lặp.

Gán $k = 0$ và giá trị khởi phát \underline{x}' tùy chọn. Tính $\underline{y}' = C(\underline{x}')\underline{x}'$.

- 2) Đo trạng thái \underline{x} và đầu ra \underline{y} từ hệ (1) rồi ước lượng $\underline{\hat{v}}, \underline{\hat{z}}$ theo (13) mà bây giờ được viết lại thành:

$$\begin{cases} \underline{\hat{v}} = \underline{x} - A(\underline{x}')\underline{x}' - B(\underline{x}')\underline{u}' \\ \underline{\hat{z}} = \underline{y} - C(\underline{x})\underline{x} \end{cases}$$

rồi từ đó tính $\underline{\theta} = \text{col}(\underline{\hat{v}}, I)$

- 3) Tính các ma trận hằng A, B, C theo (2):

$$A = A(\underline{x}), B = B(\underline{x}), C = C(\underline{x})$$

và từ đó là $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ theo (4), tức là:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A & B \\ \Theta & I \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B \\ I \end{pmatrix}, \mathbf{C} = (C, \Theta)$$

- 4) Xây dựng các vector $\underline{d}_i, i = 1, 2, \dots, N$ theo (6) mà bây giờ được viết lại thành:

$$\underline{d}_i = \mathbf{C}(\mathbf{A}^{i-1} + \dots + \mathbf{A} + I)\underline{\theta} + \underline{\hat{z}}$$

rồi từ đó tính \mathbf{d} theo (8), \mathbf{w} theo (9) và cuối cùng là \mathbf{s} theo (10) mà bây giờ được viết chung lại ở dạng mới như sau:

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \underline{w}_{k+1} - (\underline{y}' - \underline{w}_{k-1}) \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} - (\underline{y}' - \underline{w}_{k-1}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ \underline{u}' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \underline{d}_1 \\ \vdots \\ \underline{d}_N \end{pmatrix}$$

- 5) Xây dựng ma trận E theo (8) mà bây giờ được viết lại thành:

$$E = \begin{pmatrix} \mathbf{CB} & \Theta & \dots & \Theta \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{N-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{N-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{CB} \end{pmatrix}$$

- 6) Tính \underline{u} theo (12):

$$\underline{u} = \underline{u}' + (I, \Theta, \dots, \Theta)(E^T Q E + R)^{-1} E^T Q \mathbf{s}$$

rồi đưa vào điều khiển trong một khoảng thời gian đúng bằng chu kỳ trích mẫu T_a .

- 7) Gán:

$$\underline{u}' = \underline{u}, \underline{y}' = \underline{y}, \underline{x}' = \underline{x} \text{ và } k := k + 1.$$

Giảm giá trị ma trận R theo công thức $R := \mu R$ rồi quay về 2).

3 Điều khiển thiết bị phản ứng thủy phân Acetic Anhydride khuấy trộn liên tục

Để minh họa chất lượng của bộ điều khiển dưới dạng thuật toán đã đề xuất, sau đây bài báo sẽ kiểm nghiệm thông qua một ứng dụng điều khiển bám tín hiệu đặt trước cho hệ phản ứng thủy phân Acetic Anhydrid khuấy trộn liên tục.

Hệ phản ứng thủy phân Acetic Anhydrid khuấy trộn liên tục là hệ có hai đầu vào, hai đầu ra, mô tả bởi mô hình trạng thái liên tục dạng song tuyến bất định [7]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A_c(\underline{x})\underline{x} + B_c(\underline{x})\underline{u} + \underline{v}_c \\ \underline{y} = C_c \underline{x} + \underline{z}_c \end{cases} \quad (14)$$

trong đó:

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}, A_c(\underline{x}) = \begin{pmatrix} a_3 & -a_2 x_1 & x_4 & -x_3 \\ -a_4 x_2 & a_5 - a_6 & a_6 & 0 \\ x_4 & a_8 & -a_8 & -x_1 \\ x_2 & -x_1 & x_4 & -x_3 \end{pmatrix}$$

$$B_c(\underline{x}) = \begin{pmatrix} 0 & -a_1 x_1 / x_4 \\ 0 & -a_1 x_2 / x_4 \\ \lambda - a_7 x_3 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{pmatrix}, C_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Hai đầu vào $\underline{u} = (u_1, u_2)^T = (F_j, F_2)^T$ của hệ lần lượt là lưu lượng nước nóng gia nhiệt bình phản ứng và lưu lượng sản phẩm lấy ra. Hai đầu ra $\underline{y} = (y_1, y_2)^T = (C_{A2}, h)^T$ là nồng độ sản phẩm và độ cao (mức) của cột sản phẩm phản ứng trong bình.

Vector $\underline{v}_c, \underline{\zeta}_c$ chứa đầy đủ tất cả các thành phần nhiễu bất định tác động vào hệ.

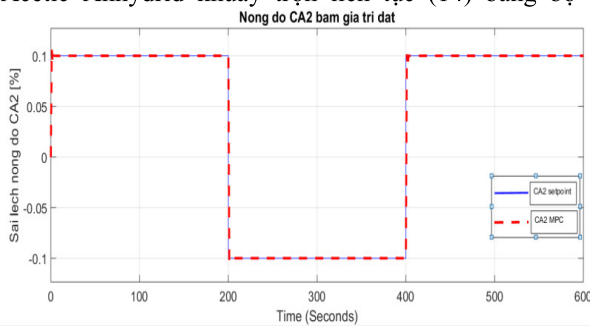
Để chuyển mô hình liên tục (14) trên về dạng không liên tục:

$$\begin{aligned} \underline{x}_{k+1} &= A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k &= C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + \underline{\zeta}_k \end{aligned}$$

ta sẽ rời rạc hóa nó với chu kỳ trích mẫu T_a . Khi đó sẽ có:

$$\begin{aligned} A(\underline{x}_k) &= I + T_a A_c(\underline{x}_k), B(\underline{x}_k) = T_a B_c(\underline{x}_k) \\ C(\underline{x}_k) &= C_c, \underline{v}_k = T_a \underline{v}_c \end{aligned} \quad (15)$$

Các hình từ hình 2 đến hình 10 là kết quả mô phỏng thu được khi điều khiển hệ phản ứng thủy phân Acetic Anhydrid khuấy trộn liên tục (14) bằng bộ

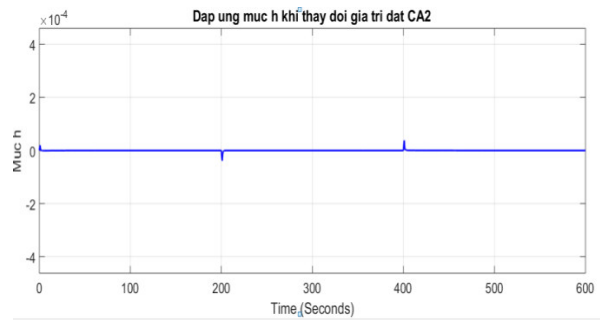


Hình 2. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi thay đổi giá trị đặt w_1

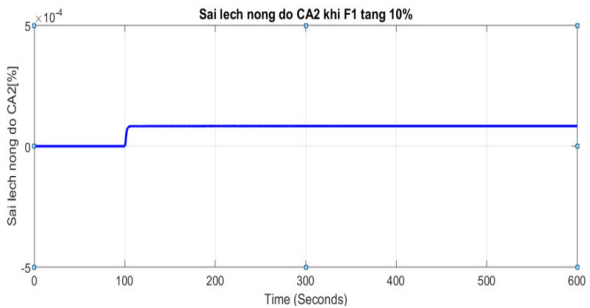
điều khiển đã đề xuất, trong đó các tham số cụ thể của hệ được sử dụng trong mô phỏng bao gồm:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1,639 \cdot 10^{-3}, a_2 = 0,19345, a_3 = 0,15443 \\ a_4 &= 6,5405 \cdot 10^{-6}, a_5 = 5,2212 \cdot 10^{-6}, a_6 = 0,0037 \\ a_7 &= 0,3846 \cdot 10^3, a_8 = 7,2015 \cdot 10^{-4}, T_a = 3,5s \\ \lambda &= 0 \end{aligned}$$

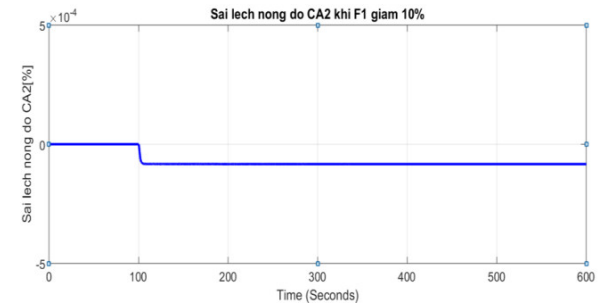
Kết quả ở hình 2 và hình 3 cho thấy khi thay đổi giá trị đặt w_1 tăng hay giảm 10%, bộ điều khiển $\mathcal{K}^{NMPC}(\underline{x}_k)$ đề xuất cho ra đáp ứng $y_1 = C_{A2}$ ở đầu ra bám tốt theo giá trị đặt, đồng thời sai lệch mức sản phẩm trong bình ở đầu ra thứ hai là $y_2 = h$ chỉ thay đổi rất ít tại thời điểm thay đổi giá trị đặt, sau đó về lại ngay giá trị cân bằng. Điều này đã xác nhận khả năng tách kênh rất tốt của bộ điều khiển đề xuất.



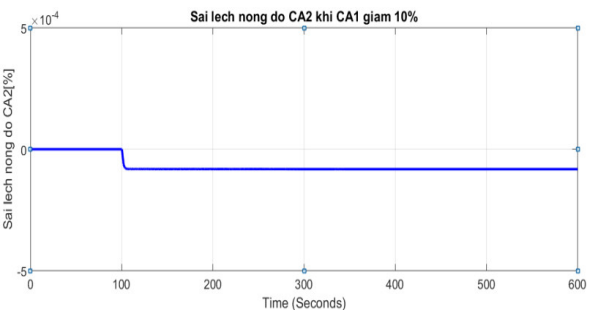
Hình 3. Sai lệch độ cao độ sản phẩm $y_2 = h$ khi thay đổi giá trị đặt w_1



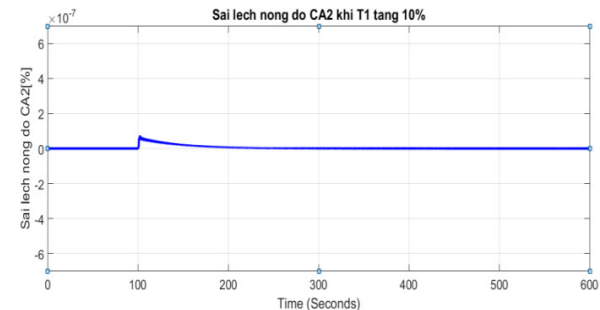
Hình 4. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiễu $F_1(\underline{v}_c)$ tăng 10%



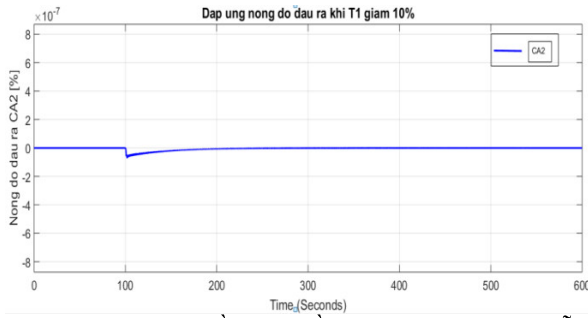
Hình 5. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiễu $F_1(\underline{v}_c)$ giảm 10%



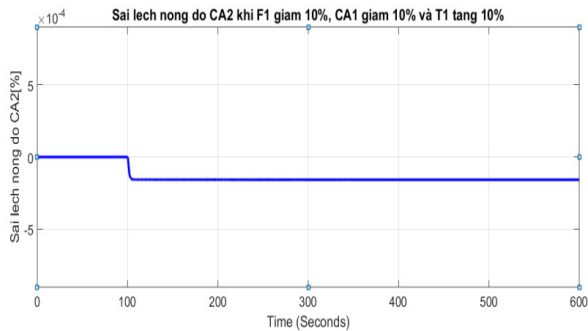
Hình 6. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiễu đầu ra $C_{A2}(\underline{\zeta}_c)$ giảm 10%



Hình 7. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiễu $T_1(\underline{v}_c)$ tăng 10%



Hình 8. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiều $T_1 (\underline{v}_c)$ giảm 10%



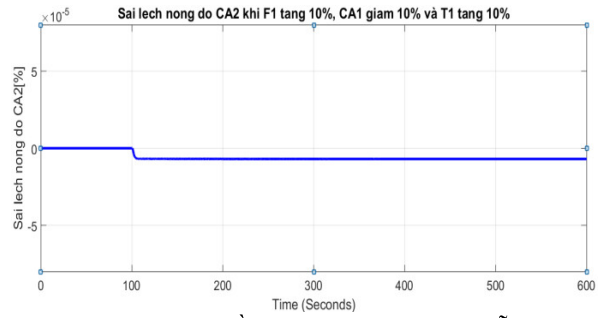
Hình 10. Sai lệch nồng độ đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiều $F_1 (\underline{v}_c)$ giảm 10% nhiều $T_1 (\underline{v}_c)$ tăng 10% và nhiều đầu ra $C_{A2} (\underline{c}_c)$ giảm 10%

Tiếp theo, hình 4 và hình 5 cho thấy khi tại thời điểm 100s có tác động của nhiều F_1 , là thành phần trong vector nhiễu \underline{v}_c của hệ, thay đổi $\pm 10\%$, bộ điều khiển vẫn gần như giữ nguyên được giá trị đặt yêu cầu ở đầu ra là nồng độ sản phẩm C_{A2} với một sai lệch nhỏ không đáng kể trong một khoảng thời gian rất ngắn (tăng giảm $\pm 8.33 \cdot 10^{-5}$).

Tương tự, kết quả ở hình 6 cho thấy khi có nhiễu tác động làm giảm 10% ở đầu ra $y_1 = C_{A2}$ tại thời điểm 100s, bộ điều khiển đã kéo hệ quay trở về về giá trị đặt w_1 ban đầu. Lượng sai lệch ở đầu ra bị ảnh hưởng bởi tác động của nhiễu là không đáng kể, chỉ dao động trong khoảng $\pm 8.2 \cdot 10^{-5}$.

Kết quả mô phỏng ở hình 7 và hình 8 còn xác nhận thêm khả năng kháng nhiễu T_1 , là thành phần có trong vector nhiễu \underline{v}_c của hệ. Nó cho thấy mặc dù có sự tác động của T_1 , song sai lệch nồng độ sản phẩm ở đầu ra là rất nhỏ ($\pm 1.763 \cdot 10^{-10}$) và cũng chỉ tồn tại trong một khoảng thời gian rất ngắn (khoảng 40s).

Cuối cùng, hình 9 và hình 10 là kết quả mô phỏng khi có nhiễu nguồn nhiễu tác động đồng thời vào hệ, bao gồm nhiễu $F_1 (\underline{v}_c)$, $T_1 (\underline{v}_c)$ và nhiễu có lẫn ở đầu ra $y_1 = C_{A2} (\underline{c}_c)$. Mặc dù vẫn ổn định và



Hình 9. Sai lệch đầu ra $y_1 = C_{A2}$ khi nhiễu $F_1, T_1 (\underline{v}_c)$ tăng 10% và nhiễu đầu ra $C_{A2} (\underline{c}_c)$ giảm 10%

tồn tại một sai lệch tĩnh, song rất nhỏ, không đáng kể. Cụ thể là nó chỉ dao động trong khoảng sai lệch $6.958 \cdot 10^{-6} \div 1.57 \cdot 10^{-4}$.

4 Kết luận

Bài báo đã đề xuất phương pháp điều khiển mô hình dự báo phi tuyến NMPC sử dụng mô hình dự báo tuyến tính trong một khoảng nhỏ, kết hợp với dịch chuyển mô hình dự báo tuyến tính dọc trên trục thời gian cùng với cửa sổ dự báo.

Kết quả mô phỏng sử dụng bộ điều khiển đề xuất vào điều khiển hệ phản ứng thủy phân Acetic Anhydrid khuấy trộn liên tục cho thấy hệ hoạt động ổn định, sản phẩm nồng độ đầu ra C_{A2} có đáp ứng nhanh, bám lượng đặt tốt. Hơn nữa kết quả mô phỏng còn cho thấy khả năng tách kênh rất tốt của bộ điều khiển. Cụ thể, khi thay đổi các nhiễu tác động, bộ điều khiển cho đáp ứng tốt, kháng nhiễu hầu như hoàn toàn, hệ đạt trạng thái ổn định, sai lệch nồng độ đầu ra C_{A2} rất nhỏ từ $6.698 \cdot 10^{-6}\%$ đến $2 \cdot 10^{-5}\%$.

Tài liệu tham khảo

- [1] Maciejowski, M.J. (2011): Predictive control with constraints. Prentice Hall.
- [2] Grüne, L. and Pannek, J. (2010): Nonlinear model predictive control. Theory and Algorithms. Springer.
- [3] Nocedal, J. and Wright, S.J. (1996): Numerical Optimization. Springer-New York.
- [4] Pardalos, P.M and Yatsenko, V.A. (2008): Optimization and Control of bilinear System. Theory, Algorithms and Application. Springer.
- [5] Khánh, B.Q và các đồng nghiệp (2014): Điều khiển quá trình. NXB KH&KT.
- [6] Brian Rofel and Ben Betlem (2006): Process Dynamic and Control, John Wiley&Sons, Lt.
- [7] Mai Thị Đoàn Thanh, Nguyễn Đình Lâm, Đoàn Quang Vinh (2016): Xây dựng mô hình thử nghiệm thiết bị phản ứng liên tục thủy phân Acetic Anhydride phục vụ nghiên cứu điều khiển. Tạp chí KHCN Đại học Đà Nẵng, Vol.11 (108), quyển 1, trang 42-47

