

Sử dụng cực tiểu hóa từng đoạn sai lệch đầu ra trong miền thời gian để điều khiển dự báo hệ bùồng sấy giấy đa biến

Using Receding Horizon Minimization of Output Errors In Time Domain for Model Predictive Control of Multivariable Paper Drying Systems

Trần Kim Quyên¹, Bùi Quốc Khánh², Nguyễn Doãn Phước^{2*}

¹ Trường Cao đẳng Công nghiệp Tuy Hòa, Nguyễn Tất Thành, TP. Tuy Hòa, Phú Yên

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

Đến Tòa soạn: 22-4-2016; chấp nhận đăng: 20-12-2016

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển dự báo cho hệ MIMO với mô hình dự báo là hệ phương trình sai phân trong miền thời gian. Phương pháp điều khiển dự báo đề xuất này làm việc theo nguyên tắc cực tiểu hóa từng đoạn sai lệch đầu ra của hệ trong miền thời gian. Bộ điều khiển này có cấu trúc tương tự như của GPC truyền thống, chỉ thay đổi khâu dự báo tín hiệu ra và khâu tối ưu hóa để tính hàm điều khiển trực tiếp trên miền thời gian thay vì trong miền tần số, nhờ đó không cần phải tìm nghiệm phương trình Diophantine mà vẫn đảm bảo được chất lượng điều khiển bám giá trị đặt trước. Hơn thế nữa, bộ điều khiển đề xuất này còn có tính tách kênh và kháng nhiễu cao hơn bộ điều khiển GPC truyền thống. Để minh chứng cho kết luận này, bài báo cũng đã trình bày một ứng dụng của bộ điều khiển đề xuất vào điều khiển đa biến bùồng sấy giấy, sau đó so sánh chất lượng điều khiển thu được với chất lượng của hệ khi được điều khiển bằng điều khiển phản hồi đầu ra kết hợp với bộ điều khiển truyền thẳng để tách kênh, cũng như chất lượng của hệ khi được điều khiển với bộ điều khiển GPC truyền thống.

Từ khóa: Độ ẩm, Tối ưu hóa từng đoạn, Bùồng sấy, MPC, Miền thời gian

Abstract

The paper proposes a model predictive control method for MIMO system, in which the difference system equations are used for output prediction. The proposed control method is based on piecewise minimizing of output tracking errors in time domain. The structure of proposed controller is similar to that of conventional GPC, except that its system output prediction and minimization of tracking error will be carried out directly in time domain instead of frequency domain. Hence the solution of Diophantine equation can be avoided but the tracking control performance to a desired value is still guaranteed. Moreover, the decoupling and disturbance attenuation behavior of proposed controller is much better than conventional GPC. To demonstrate these assertions, the paper presents also an application of proposed method to control the multivariable paper drying system and then compares the resulted system control performance with which obtained by using the output feedback control system in combination with the feedforward controller for system decoupling, and also with which obtained by using conventional GPC.

Keywords: Moisture, Piecewise optimization, Drying section, MPC, Time domain

1. Giới thiệu chung

Bùồng sấy giấy là khâu cuối trong dây chuyền xeo giấy. Giấy từ ép keo có độ ẩm tương đối 0.2 kg/kg được đưa qua bùồng sấy để đạt độ ẩm đầu ra mong muốn là 0.05 kg/kg . Hình 1 trình bày sơ đồ nguyên lý điều khiển bùồng sấy giấy.

Bùồng sấy có 10 lô sấy vận hành ổn định tại tốc độ xeo $V = 600\text{ m/min}$ với định lượng 50 g/m^2 . Gió nóng vào W_{a1} có lưu lượng vận hành là 3.25 kg/s . Lưu lượng định mức là 6.5 kg/s với nhiệt độ 110°C . Độ ẩm tỷ lệ 0.001 kg/kg . Gió thải ra có lưu lượng

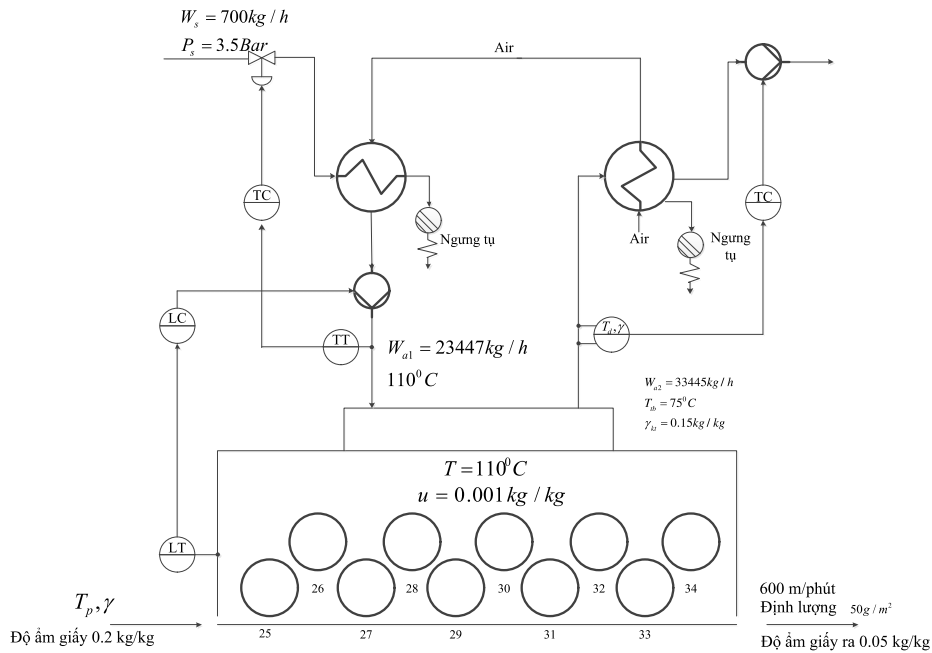
vận hành 4.75 kg/s . Lưu lượng định mức là 9.5 kg/s . Nhiệt độ khí thải 75°C . Độ ẩm tỷ lệ là 0.15 kg/kg . Nhiệt độ điểm sương được đặt là 60°C .

Để đạt được các thông số kỹ thuật trên, hệ điều khiển hiện tại trong nhà máy giấy Bãi Bằng có bốn nhiệm vụ cụ thể như sau:

– Điều khiển gia nhiệt cho gió cấp vào bùồng sấy. Gió lấy từ ngoài trời lưu lượng W_{a1} được gia nhiệt một phần từ không khí thải qua bộ HRU (bộ thu hồi nhiệt), sau đó gió ẩm được đưa sang thiết bị trao đổi nhiệt và được gia nhiệt thêm bằng hơi bão hòa. Nhiệt độ gió sấy được điều chỉnh nhờ van điều khiển lưu lượng hơi. Mạch vòng điều khiển gia nhiệt gió hoạt động tương đối độc lập.

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 976791415

Email: phuc.nguyendoan@hust.edu.vn



Hình 1. Sơ đồ P & ID của buồng sấy

– Gió nóng có nhiệt độ $110^{\circ}C$, độ ẩm tỷ lệ $0.001kg/kg$ được thổi vào hai mặt giấy bằng vòi phun, kết hợp với sấy áp suất hơi cấp cho lô sấy tạo nên mạch vòng điều khiển sấy giấy. Động học quá trình sấy trong buồng sấy đã được trình bày chi tiết trong tài liệu [4].

– Điều khiển cân bằng gió vào-ra, với mục tiêu đảm bảo gió nóng chiếm giữ khoảng không giữa hai lô (vùng sấy) để truyền nhiệt cho mặt giấy phục vụ quá trình bay hơi, nên cần điều khiển cân bằng gió nóng thổi vào W_{a1} kết hợp với lượng hơi nước bay ra từ giấy W_{bh} , phải cân bằng với gió hút khí thải ra khỏi buồng sấy W_{a2} , sao cho không có không khí lạnh từ ngoài hút vào vùng sấy. Điều khiển cân bằng thông qua điều áp suất không nên người ta gọi là hệ điều khiển ZL. Đại lượng điều khiển là lưu lượng gió thổi vào W_{a1} , cơ cấu chấp hành là quạt thổi đã được nghiên cứu trong [5].

– Điều khiển môi trường sấy thông qua nhiệt độ điểm sương. Khi sấy giấy nước bay hơi vào không khí, làm cho độ ẩm không khí tăng dẫn đến tăng nhiệt độ điểm sương. Khi nhiệt độ điểm sương tăng cao thì khả năng bay hơi nước từ giấy càng giảm, nếu nhiệt độ điểm sương gần với nhiệt độ môi trường thì nước có xu thế ngưng tụ.

Nhiệt độ điểm sương trong buồng sấy được giữ ổn định thấp hơn nhiệt độ môi trường sấy trong khoảng $15-25^{\circ}C$. Nhiệt độ điểm sương được điều

kiểm thông qua điều chỉnh lưu lượng gió ra W_{a2} nhờ quạt hút [4].

Trong thực tế sản xuất, các hệ điều khiển quá trình công nghệ phần lớn là hệ điều khiển đa biến, giải pháp thiết kế và cài đặt là điều khiển phản hồi kết hợp với điều khiển tách kênh Feedforward.

Tuy nhiên một số giải pháp thiết kế còn chưa đáp ứng được yêu cầu công nghệ như đối với hệ cân bằng lượng đặt và kháng nhiễu. Cụ thể là:

– Thuật toán điều khiển theo mô hình, viết tắt là MAC được xây dựng dựa trên mô hình đáp ứng xung cho hệ tuyến tính SISO. Thuật toán này chỉ áp dụng được cho các quá trình SISO ổn định. Hơn nữa, do không sử dụng tín hiệu đầu ra y từ đối tượng ngược về để hiệu chỉnh lại mô hình dự báo cũng như trong khâu tối ưu hóa, nên MAC là phương pháp điều khiển vòng hở. Các tài liệu [3], [8] còn khuyến cáo thêm là chỉ nên áp dụng khi đối tượng điều khiển là: Chỉ có nhiễu hằng tác động ở đầu ra, có tính động học đủ chậm.

– Phương pháp ma trận động học điều khiển, viết tắt là DMC được xây dựng dựa trên mô hình đáp ứng bước nhảy cho hệ tuyến tính SISO. Theo [8], [9] thì DMC mang tính bền vững cao, dễ cài đặt, song lại hạn chế là cần phải có tham số M, N đủ lớn, cũng như khi có thêm điều kiện ràng buộc là tín hiệu điều khiển bị chặn và nó cũng chỉ là bộ điều khiển vòng hở.

– Khác với MAC và DMC, phương pháp điều khiển dự báo GPC của Clarke đưa ra năm 1987 lại sử

dùng mô hình hàm truyền không liên tục của quá trình (đối tượng điều khiển). Phương pháp GPC áp dụng được cho những đối tượng, quá trình không ổn định [8]. Hơn thế nữa nó cũng còn có thể áp dụng được cho cả những quá trình có tính pha không cực tiểu [8], và cho tới nay nó được biết là phương pháp điều khiển dự báo phổ thông và áp dụng nhiều nhất trong thực tế, có thể phát triển mở rộng cho hệ MIMO [8].

Do phương pháp GPC được xây dựng trên nền mô hình hàm truyền không liên tục, có các tham số rất dễ được xác định bằng những thuật toán nhận dạng, nên GPC hoàn toàn có thể được phát triển thành bộ điều khiển vòng kín mang tính thích nghi nếu như ta bổ sung thêm khâu nhận dạng trực tuyến các tham số hai đa thức này.

Ngoài ra, cũng vì sử dụng hàm truyền làm mô hình dự báo nên việc tối ưu hóa trong nó bắt buộc phải được thực hiện trong không gian phức thông qua bước trung gian là tìm nghiệm phương trình Diophantine. Điều này đã hạn chế khả năng kháng nhiễu cũng như chất lượng tách kênh của hệ thống trong miền thời gian.

Từ kết quả phân tích ưu nhược điểm của từng phương pháp điều khiển dự báo nói trên, chúng tôi đã đi đến một phương pháp điều khiển dự báo mới cho hệ MIMO, trong đó mô hình dự báo là hệ phương trình sai phân trong miền thời gian, thay vì sử dụng ma trận hàm truyền. Phương pháp điều khiển dự báo đề xuất này, về cấu trúc nó hoàn toàn tương tự như GPC truyền thống, ngoài việc thay đổi khâu tối ưu hóa để tính hàm điều khiển và thực hiện tìm nghiệm bài toán tối ưu trực tiếp trên miền thời gian. Điều này giúp ta tránh được việc phải tìm nghiệm phương trình Diophantine và có thể kết hợp thêm các điều kiện ràng buộc về tín hiệu điều khiển trong lời giải.

Nội dung bài báo trình bày gồm ba phần. Phần một trình bày phương pháp thiết kế điều khiển dự báo tối ưu hóa từng đoạn cho hệ MIMO đa biến, tức là về nguyên tắc làm việc của bộ điều khiển được đề xuất. Phần hai là ứng dụng của nó vào điều khiển buồng sấy giấy và các kết quả mô phỏng, so sánh với chất lượng của hệ khi sử dụng bộ điều khiển GPC truyền thống. Cuối cùng trong phần ba là những đánh giá ưu nhược điểm của bộ điều khiển được đề xuất.

2. Nội dung

2.1. Thuật toán điều khiển dự báo hệ MIMO có trễ trong miền thời gian bằng phân hồi đầu ra

Phương pháp điều khiển dự báo đề xuất này sẽ được nhóm tác giả gọi là *bộ điều khiển dự báo tối ưu hóa từng đoạn*. Về cấu trúc điều khiển tương tự như MPC truyền thống, chỉ thay đổi khâu tối ưu hóa để tính hàm điều khiển và thực hiện trên miền thời gian

Xét hệ hai vào, hai ra, có trễ với mô hình tổng quát trong miền thời gian:

$$\begin{aligned} y_1[k] + a_{11}y_1[k-1] + \dots + a_{1n_1}y_1[k-n_1] = & \\ & (b_{10}u_1[k-m_{11}] + b_{11}u_1[k-m_{11}-1] + \\ & \dots + b_{1q_{11}}u_1[k-m_{11}-q_{11}]) + \\ & + (c_{10}u_2[k-m_{12}] + c_{11}u_2[k-m_{12}-1] + \\ & \dots + c_{1q_{12}}u_2[k-m_{12}-q_{12}]) \\ y_2[k] + a_{21}y_2[k-1] + \dots + a_{2n_2}y_2[k-n_2] = & \\ & (b_{20}u_1[k-m_{21}] + b_{21}u_1[k-m_{21}-1] + \\ & \dots + b_{2q_{21}}u_1[k-m_{21}-q_{21}]) + \\ & + (c_{20}u_2[k-m_{22}] + c_{21}u_2[k-m_{22}-1] + \\ & \dots + c_{2q_{22}}u_2[k-m_{22}-q_{22}]) \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó

- m_{11} là độ trễ đầu vào thứ nhất ứng với đầu ra thứ nhất và m_{12} là độ trễ đầu vào thứ hai ứng với đầu ra thứ nhất,
- m_{21} là độ trễ đầu vào thứ nhất ứng với đầu ra thứ hai và m_{22} là độ trễ đầu vào thứ hai ứng với đầu ra thứ hai.

Nhiệm vụ điều khiển đặt ra ở đây là xác định bộ điều khiển, tức là tìm $(u_1[k], u_2[k])$ để có chất lượng bám:

$$(y_1[k], y_2[k]) \rightarrow (w_1[k], w_2[k])$$

với $w_1[k], w_2[k], k = 0, 1, \dots$ là dãy giá trị mẫu đặt trước cho từng kênh.

Không mất tính tổng quát ta luôn viết được lại mô hình (1) thành:

$$\begin{aligned} y_1[k] + a_{11}y_1[k-1] + \dots + a_{1n_1}y_1[k-n] = & \\ & (b_{10}u_1[k-m_1] + b_{11}u_1[k-m_1-1] + \\ & + \dots + b_{1q}u_1[k-m_1-q]) + \\ & (c_{10}u_2[k-m_2] + c_{11}u_2[k-m_2-1] + \\ & + \dots + c_{1q}u_2[k-m_2-q]) \\ y_2[k] + a_{21}y_2[k-1] + \dots + a_{2n_2}y_2[k-n] = & \\ & (b_{20}u_1[k-m_1] + b_{21}u_1[k-m_1-1] + \\ & + \dots + b_{2q}u_1[k-m_1-q]) + \\ & (c_{20}u_2[k-m_2] + c_{21}u_2[k-m_2-1] + \\ & + \dots + c_{2q}u_2[k-m_2-q]) \end{aligned} \quad (2)$$

tức là:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k] &+ \begin{pmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{21} \end{pmatrix} \underline{y}[k-1] + \dots + \begin{pmatrix} a_{1n} & 0 \\ 0 & a_{2n} \end{pmatrix} \underline{y}[k-n] \\ &= \begin{pmatrix} b_{10} & c_{10} \\ b_{20} & c_{20} \end{pmatrix} \underline{u}[k] + \dots + \begin{pmatrix} b_{1q} & c_{1q} \\ b_{2q} & c_{2q} \end{pmatrix} \underline{u}[k-q] \end{aligned}$$

trong đó:

$$q = \max(q_{11} - m_{11}, q_{12} - m_{12}, q_{21} - m_{21}, q_{22} - m_{22}),$$

$$n = \max(n_1, n_2),$$

$$m_1 = \min(m_{11}, m_{12}), m_2 = \min(m_{21}, m_{22})$$

$$\underline{y}[k] = \begin{pmatrix} y_1[k] \\ y_2[k] \end{pmatrix}, \underline{y}[k-1] = \begin{pmatrix} y_1[k-1] \\ y_2[k-1] \end{pmatrix}, \dots$$

$$\underline{y}[k-n] = \begin{pmatrix} y_1[k-n] \\ y_2[k-n] \end{pmatrix}$$

$$\underline{u}[k] = \begin{pmatrix} u_1[k-m_1] \\ u_2[k-m_2] \end{pmatrix}, \underline{u}[k-1] = \begin{pmatrix} u_1[k-m_1-1] \\ u_2[k-m_2-1] \end{pmatrix}, \dots$$

$$\underline{u}[k-q] = \begin{pmatrix} u_1[k-m_1-q] \\ u_2[k-m_2-q] \end{pmatrix}$$

Ký hiệu tiếp:

$$\begin{aligned} A_{1,0} &= \begin{pmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{21} \end{pmatrix}, \dots, A_{n,0} = \begin{pmatrix} a_{1n} & 0 \\ 0 & a_{2n} \end{pmatrix}, \\ B_{0,0} &= \begin{pmatrix} b_{10} & c_{10} \\ b_{20} & c_{20} \end{pmatrix}, \dots, B_{q,0} = \begin{pmatrix} b_{1q} & c_{1q} \\ b_{2q} & c_{2q} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

thì mô hình ban đầu (1) của hệ sẽ trở thành:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k] + A_{1,0} \underline{y}[k-1] + \dots + A_{n,0} \underline{y}[k-n] &= \\ &= B_{0,0} \underline{u}[k] + \dots + B_{q,0} \underline{u}[k-q] \end{aligned} \quad (4)$$

Từ đây ta được các đầu ra dự báo của hệ là $\underline{y}[k+i]$, $i=0,1, \dots, N-1$, với $N > \max(n,q)$, như sau:

- Khi $i=0$ thì:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k] &= (B_{0,0} \underline{u}[k] + \dots + B_{q,0} \underline{u}[k-q]) - \\ &\quad - (A_{1,0} \underline{y}[k-1] + A_{2,0} \underline{y}[k-2]) \end{aligned} \quad (5)$$

- Khi $i=1$ thì:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k+1] &= (B_{0,0} \underline{u}[k+1] + \dots + B_{q,0} \underline{u}[k-q+1]) - \\ &\quad - (A_{1,0} \underline{y}[k] + A_{2,0} \underline{y}[k-1] + \dots + A_{n,0} \underline{y}[k-n+1]) \\ &= (B_{0,0} \underline{u}[k+1] + \dots + B_{q,0} \underline{u}[k-q+1]) - \\ &\quad - (A_{1,0} [(B_{0,0} \underline{u}[k] + \dots + B_{q,0} \underline{u}[k-q]) - \\ &\quad - (A_{1,0} \underline{y}[k-1] + A_{2,0} \underline{y}[k-2] + \dots + A_{n,0} \underline{y}[k-n])] + \\ &\quad + A_{2,0} \underline{y}[k-1] + \dots + A_{n,0} \underline{y}[k-n+1]) \end{aligned}$$

hay:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k+1] &= [B_{0,0} \underline{u}[k+1] + (B_{1,0} - A_{1,0} B_{0,0}) \underline{u}[k] + \dots + \\ &\quad + (B_{q,0} - A_{1,0} B_{q-1,0}) \underline{u}[k-q+1] - A_{1,0} B_{q,0} \underline{u}[k-q]] \\ &\quad - [(A_{2,0} - A_{1,0} A_{1,0}) \underline{y}[k-1] + (A_{3,0} - A_{1,0} A_{2,0}) \underline{y}[k-2] + \\ &\quad + \dots + (A_{n,0} - A_{1,0} A_{n-1,0}) \underline{y}[k-n+1] - A_{1,0} A_{n,0} \underline{y}[k-n]] \\ &= (B_{0,1} \underline{u}[k+1] + \dots + B_{q+1,1} \underline{u}[k-q]) - \\ &\quad - (A_{1,1} \underline{y}[k-1] + A_{2,1} \underline{y}[k-2] + \dots + A_{n,1} \underline{y}[k-n]) \end{aligned}$$

với các hệ số của nó lần được được xác định theo công thức truy hồi sau:

$$\begin{aligned} B_{0,1} &= B_{0,0} \\ B_{1,1} &= B_{1,0} - A_{1,0} B_{0,0} \\ &\vdots \\ B_{q,1} &= B_{q,0} - A_{1,0} B_{q-1,0} \\ B_{q+1,1} &= -A_{1,0} B_{q,0} \\ A_{1,1} &= A_{2,0} - A_{1,0} A_{1,0} \\ A_{2,1} &= A_{3,0} - A_{1,0} A_{2,0} \\ &\vdots \\ A_{n-1,1} &= A_{n,0} - A_{1,0} A_{n-1,0} \\ A_{n,1} &= -A_{1,0} A_{n,0} \end{aligned} \quad (6)$$

- Tương tự như vậy, khi $i=2$ thì:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k+2] &= (B_{0,2} \underline{u}[k+2] + \dots + B_{q+2,2} \underline{u}[k-q]) - \\ &\quad - (A_{1,2} \underline{y}[k-1] + A_{2,2} \underline{y}[k-2] + \dots + A_{n,2} \underline{y}[k-n]) \end{aligned}$$

trong đó:

$$\begin{aligned} B_{0,2} &= B_{0,1} \\ B_{1,2} &= B_{1,1} \\ B_{2,2} &= B_{2,1} - A_{1,1} B_{0,1} \\ &\vdots \\ B_{q+1,2} &= B_{q+1,1} - A_{1,1} B_{q-1,1} \\ B_{q+2,2} &= -A_{1,1} B_{q,1} \\ A_{1,1} &= A_{2,0} - A_{1,0} A_{1,0} \\ A_{2,1} &= A_{3,0} - A_{1,0} A_{2,0} \\ &\vdots \\ A_{n-1,1} &= A_{n,0} - A_{1,0} A_{n-1,0} \\ A_{n,1} &= -A_{1,0} A_{n,0} \end{aligned} \quad (7)$$

- Tổng quát cho tất cả các chỉ số $i=3,4, \dots, N-1$ còn lại, ta được:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k+i] &= (B_{0,i} \underline{u}[k+i] + \dots + B_{q+i,i} \underline{u}[k-q]) - \\ &\quad - (A_{1,i} \underline{y}[k-1] + A_{2,i} \underline{y}[k-2] + \dots + A_{n,i} \underline{y}[k-n]) \end{aligned} \quad (8)$$

và:

$$\begin{aligned} \underline{y}[k+i+1] = & (B_{0,i+1}\underline{u}[k+i+1] + \dots + \\ & + B_{q+i+1,i+1}\underline{u}[k-q]) - \\ & - (A_{1,i+1}\underline{y}[k-1] + A_{2,i+1}\underline{y}[k-2] + \\ & + \dots + A_{n,i+1}\underline{y}[k-n]) \end{aligned}$$

trong đó

$$\begin{aligned} B_{0,i+1} &= B_{0,i} \\ B_{1,i+1} &= B_{1,i} \\ &\vdots \\ B_{i,i+1} &= B_{i,i} \\ B_{i+1,i+1} &= B_{i+1,i} - A_{1,i}B_{0,0} \\ &\vdots \\ B_{q+i,i+1} &= B_{q+i,i} - A_{1,i}B_{q-1,0} \\ B_{q+i+1,i+1} &= -A_{1,i}B_{q,0} \\ A_{1,i+1} &= A_{2,i} - A_{1,i}A_{1,0} \\ A_{2,i+1} &= A_{3,i} - A_{1,i}A_{2,0} \\ &\vdots \\ A_{n-1,i+1} &= A_{n,i} - A_{1,0}A_{n-1,0} \\ A_{n,i+1} &= -A_{1,i}A_{n,0} \end{aligned} \quad (9)$$

Tiếp theo, để xây dựng hàm mục tiêu phục vụ mục tiêu điều khiển bám $\underline{y}[k] \rightarrow \underline{w}[k]$ của bài toán, ta sẽ viết lại toàn bộ $N+1$ giá trị đầu ra dự báo $\underline{y}[k+i]$, $i=0,1, \dots, N$ đã nêu ở trên chung lại thành một phương trình nhờ các ký hiệu như sau:

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \begin{pmatrix} \underline{y}[k] \\ \underline{y}[k+1] \\ \vdots \\ \underline{y}[k+N] \end{pmatrix}, \quad \underline{u} = \begin{pmatrix} \underline{u}[k+N] \\ \underline{u}[k+N-1] \\ \vdots \\ \underline{u}[k] \end{pmatrix}, \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{pmatrix} \Theta & \dots & \Theta & B_{0,0} \\ \Theta & \dots & B_{0,1} & B_{1,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{0,N} & \dots & B_{N-1,N} & B_{N,N} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

và Θ là ký hiệu của ma trận có tất cả các phần tử đều bằng 0. Với các ký hiệu này, các phương trình (5)-(8) cho tất cả các chỉ số $i=0,1, \dots, N$ sẽ được viết chung lại thành:

$$\underline{y} = \mathbf{B}_1 \underline{u} + \underline{g} \quad (11)$$

trong đó:

$$\underline{g} = \mathbf{B}_2 \underline{u}' - \mathbf{A} \underline{y}' \quad (12)$$

và

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_2 &= \begin{pmatrix} B_{1,0} & B_{2,0} & \dots & B_{q,0} \\ B_{2,1} & B_{3,1} & \dots & B_{q+1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N+1,N} & B_{N+2,N} & \dots & B_{q+N,N} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} A_{1,0} & A_{2,0} & \dots & A_{n,0} \\ A_{1,1} & A_{2,1} & \dots & A_{n,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{1,N-1} & A_{2,N-1} & \dots & A_{n,N-1} \end{pmatrix} \\ \underline{u}' &= \begin{pmatrix} \underline{u}[k-1] \\ \underline{u}[k-2] \\ \vdots \\ \underline{u}[k-q] \end{pmatrix}, \quad \underline{y}' = \begin{pmatrix} \underline{y}[k-1] \\ \underline{y}[k-2] \\ \vdots \\ \underline{y}[k-n] \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

Như vậy, ở công thức (11) thì \underline{u} cho bởi (10) là vector các tín hiệu điều khiển tương lai cần xác định, \underline{y} là vector các tín hiệu đầu ra tương ứng được dự báo trong tương lai và chúng là những giá trị chưa biết. Còn lại các vector \underline{u}' , \underline{y}' trong (12) định nghĩa bởi (13) đều là những giá trị quá khứ nên là đã biết ở thời điểm k hiện tại, hay \underline{g} cũng là hằng số đã biết.

Tiếp tục, để đạt được mục đích $\underline{y}[k] \rightarrow \underline{w}[k]$, ta sẽ xây dựng hàm mục tiêu tương ứng với nhiệm vụ $\underline{y} \rightarrow \underline{w}$, hay $\underline{e} = \underline{y} - \underline{w} \rightarrow \underline{0}$, trong đó

$$\underline{w} = \text{col}(\underline{w}[k], \underline{w}[k+1], \dots, \underline{w}[k+N]) \quad (14)$$

là vector các giá trị đặt, nên cũng là đã biết. Hàm mục tiêu này có dạng như sau

$$J = \underline{e}^T Q_k \underline{e} + \underline{u}^T R_k \underline{u} \rightarrow \min \quad (15)$$

trong đó Q_k , R_k là hai ma trận trọng số đối xứng xác định dương tùy chọn.

Thay $\underline{e} = \underline{y} - \underline{w}$ và (11) vào (15) sẽ có:

$$\begin{aligned} J &= (\underline{y} - \underline{w})^T Q_k (\underline{y} - \underline{w}) + \underline{u}^T R_k \underline{u} \\ &= (\mathbf{B}_1 \underline{u} + \underline{g} - \underline{w})^T Q_k (\mathbf{B}_1 \underline{u} + \underline{g} - \underline{w}) + \underline{u}^T R_k \underline{u} \\ &= \underline{u}^T (\mathbf{B}_1^T Q_k \mathbf{B}_1 + R_k) \underline{u} - 2(\underline{w} - \underline{g})^T Q_k \mathbf{B}_1 \underline{u} \\ &\quad + (\underline{g} - \underline{w})^T Q_k (\underline{g} - \underline{w}) \end{aligned}$$

nên nhiệm vụ (15) là tương đương với:

$$\underline{u}^T (\mathbf{B}_1^T Q_k \mathbf{B}_1 + R_k) \underline{u} - 2(\underline{w} - \underline{g})^T Q_k \mathbf{B}_1 \underline{u} \rightarrow \min$$

Có thể thấy ngay đây là bài toán tối ưu toàn phương nên trong trường hợp không bị ràng buộc thì

khi áp dụng phương pháp Newton-Raphson, ta có nghiệm tối ưu của nó như sau:

$$\underline{u} = (\mathbf{B}_1^T Q_k \mathbf{B}_1 + R_k)^{-1} \mathbf{B}_1^T Q_k (\underline{w} - \underline{g}) \quad (16)$$

Nếu viết ra một cách chi tiết nghiệm tối ưu \underline{u} tìm được ở trên thành:

$$\underline{u} = \text{col}(\underline{u}[k+N], \underline{u}[k+N-1], \dots, \underline{u}[k])$$

ta sẽ thấy luôn lấy ra được từ đó tín hiệu điều khiển hiện tại:

$$\begin{pmatrix} u_1[k-m_1] \\ u_2[k-m_2] \end{pmatrix} = \underline{u}[k] = (\Theta, \dots, \Theta, I_2) \underline{u} \quad (17)$$

để điều khiển đối tượng, trong đó I_2 là ma trận đơn vị kiểu 2×2 . Tất nhiên ta luôn lấy ra được cả những giá trị tín hiệu vượt trước:

$$\begin{pmatrix} u_1[k+p] \\ u_2[k+q] \end{pmatrix} \text{ với } -m_1 \leq p \leq N, -m_2 \leq q \leq N$$

từ \underline{u} theo công thức:

$$\begin{pmatrix} u_1[k+p] \\ u_2[k+q] \end{pmatrix} = C_{(2N+1-2m_1-2p), (2N+2-2m_2-2q)} \underline{u}$$

trong đó $C_{(i),(j)}$ là ma trận 2 hàng, $2(N+1)$ cột có hai phần tử $(1,i)$ và $(2,j)$ bằng 1, các phần tử còn lại đồng nhất bằng 0.

Tổng kết lại thì bộ điều khiển tối ưu hóa từng đoạn để điều khiển bám giá trị đặt trước cho hệ đa biến sẽ làm việc theo các bước sau:

1. Chọn độ rộng $N > \max(n, q)$ cho cửa sổ dự báo và xây dựng các ma trận:

$$A_{1,0}, \dots, A_{n,0}, B_{0,0}, \dots, B_{q,0}$$

từ các tham số mô hình hàm truyền theo (3).

2. Xây dựng các ma trận $A_{i,j}, B_{i,j}$ theo các công thức (6),(7) và (9).

3. Xác định các ma trận $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{A}$ theo (10),(13).

4. Khai báo mảng dữ liệu một chiều $\underline{u}', \underline{y}'$, trong đó \underline{u}' có $2q$ phần tử và \underline{y}' có $2n$ phần tử định nghĩa theo (13) với thứ tự như sau:

$$\underline{u}' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_{2q}), \underline{y}' = (y'_1, y'_2, \dots, y'_{2n})$$

5. Gán $\underline{u}' = \mathbf{0}, \underline{y}' = \mathbf{0}$ và $k = 0$.

6. Chọn Q_k, R_k đối xứng xác định dương.

7. Xác định vector \underline{g} theo (12) và \underline{w} theo (14).

8. Tính \underline{u} theo (16) và $\underline{u}[k]$ theo (17) rồi đưa vào điều khiển đối tượng.

9. Đo tín hiệu ra $\underline{y} = (y_1, y_2)^T$ của hệ rồi sắp xếp lại hai mảng dữ liệu $\underline{u}', \underline{y}'$ như sau:

$$u'_i := u'_{i-2}, i = 2q, 2q-1, \dots, 3$$

$$u'_i := u_1[k+p] \text{ và } u'_i := u_2[k+q]$$

$$y'_j := y'_{j-2}, j = 2n, 2n-1, \dots, 3 \text{ và}$$

$$y'_1 := y_1, y'_2 := y_2.$$

10. Gán $k := k+1$ và quay về 6.

2.2. Áp dụng vào điều khiển buồng sấy giấy

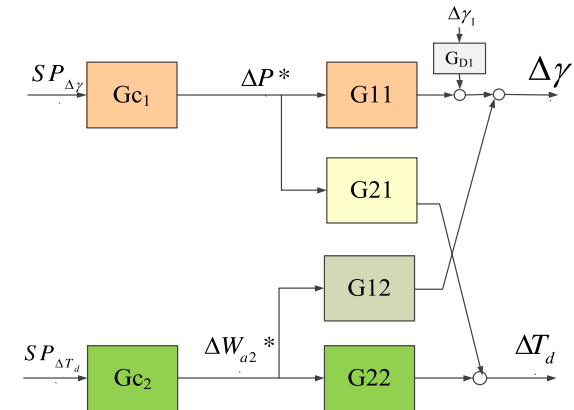
Mô hình buồng sấy giấy được xây dựng theo tài liệu [4] cho nhà máy giấy Bãi Bằng có cấu trúc ma trận hàm truyền như mô tả ở hình 2 gồm bốn hàm truyền như sau:

$$G_{11} = \frac{\Delta\gamma}{\Delta P^*} = \frac{0.000815}{48s+1} e^{-14s}$$

$$G_{12} = \frac{\Delta\gamma}{\Delta W_{a2}^*} = \frac{-0.0007945}{68s+1} e^{-28s}$$

$$G_{21} = \frac{\Delta T_d}{\Delta P^*} = \frac{0.334}{210s+1} e^{-50s}$$

$$G_{22} = \frac{\Delta T_d}{\Delta W_{a2}^*} = \frac{-0.2671}{202s+1} e^{-45s}$$



Hình 2. Mô hình buồng sấy giấy

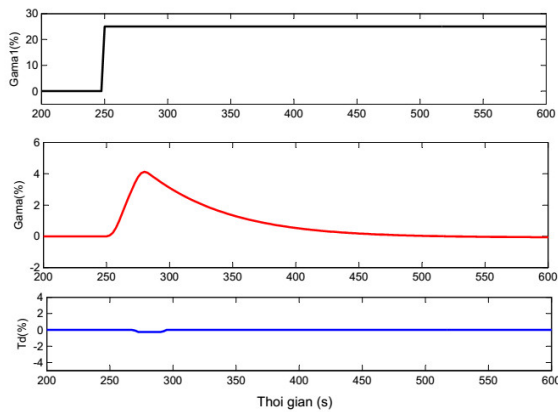
Chọn chu kỳ trích mẫu $T = 5s$ và khi ký hiệu lại các đầu vào ra:

$$y_1 = \Delta\gamma, y_2 = \Delta T_d, u_1 = \Delta P^*, u_2 = \Delta W_{a2}^*$$

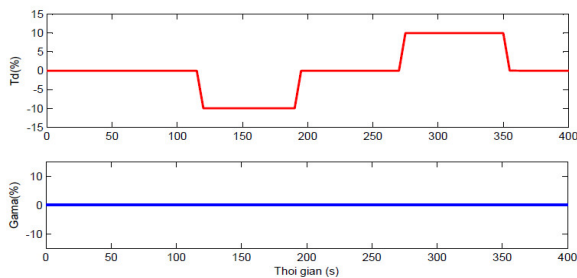
thì hệ phương trình sai phân của nó dạng (4) sẽ có các tham số lần lượt là $n = 2, q = 9$ và:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -1,8302, a_{12} = 0,8372 \\ a_{21} &= -1,9521, a_{22} = 0,9527 \\ b_{10} &= -1,68 \cdot 10^{-5}, b_{11} = 1,561 \cdot 10^{-5}, \\ b_{12} &= -0,382 \cdot 10^{-5}, b_{13} = 3,549 \cdot 10^{-6}, \\ b_{14} &= b_{15} = b_{16} = b_{17} = b_{18} = b_{19} = 0, \\ b_{20} &= b_{21} = b_{22} = b_{23} = b_{24} = b_{25} = b_{26} = b_{27} = 0, \\ b_{28} &= -0,007858, b_{29} = -7,666 \\ c_{10} &= -2,303 \cdot 10^{-5}, c_{11} = -3,33 \cdot 10^{-5}, \\ c_{12} &= 2,07 \cdot 10^{-5}, c_{13} = 3 \cdot 10^{-5}, \\ c_{14} &= c_{15} = c_{16} = c_{17} = c_{18} = c_{19} = 0 \\ c_{20} &= c_{21} = c_{22} = c_{23} = c_{24} = c_{25} = c_{26} = c_{29} = 0, \\ c_{27} &= -0,00653, c_{28} = 6,3765 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Áp dụng thuật toán điều khiển tối ưu từng đoạn đã trình bày ở trên để điều khiển hệ buồng sấy giấy, ta thu được kết quả như mô tả ở hình 3 và hình 4.



Hình 3. Đáp ứng của bộ điều khiển MPC tối ưu từng đoạn cho buồng sấy giấy, khi thay đổi nhiệt độ ẩm đầu vào 25%



Hình 4. Đáp ứng của bộ điều khiển MPC tối ưu từng đoạn cho buồng sấy giấy, khi thay đổi nhiệt độ điểm sương $\pm 10\%$

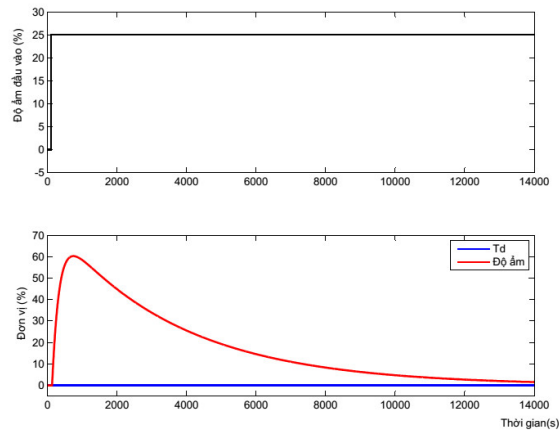
Kết quả mô phỏng cho thấy khi tăng nhiệt độ ẩm giấy đầu vào làm độ ẩm giấy đầu ra tăng, mạch vòng điều khiển độ ẩm tác động làm cho công suất

nhật đầu vào tăng lên, tức là chênh áp ΔP tăng, lưu lượng hơi vào nhiều hơn để tăng nhiệt sấy, kéo độ ẩm giấy đầu ra bám theo giá trị đặt. Mạch vòng nhiệt độ điểm sương tác động tức là W_{a2} tăng, làm giảm nhiệt độ điểm sương. Kết quả mô phỏng này đã cho thấy hệ hoạt động ổn định đáp ứng tốt với nhiễu độ ẩm đầu vào, đảm bảo chất lượng giấy đầu ra.

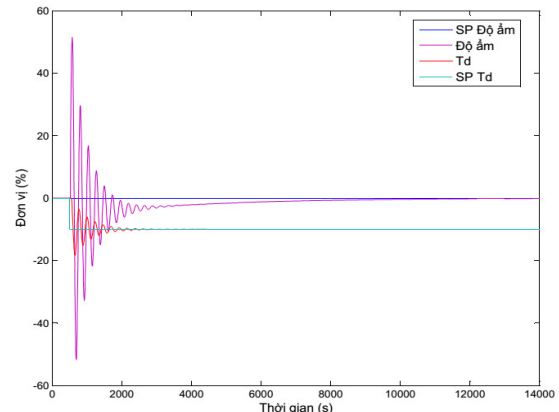
2.3. So sánh kết quả khi điều khiển với bộ điều khiển GPC truyền thống

Kết quả mô phỏng buồng sấy giấy dùng bộ điều khiển MPC trong Toolbox Matlab Simulink, có tên gọi là bộ điều khiển GPC cho ở hình 5 và hình 6.

Từ kết quả mô phỏng này và khi so sánh với các hình 3 và hình 4 ta thấy nếu tác động nhiễu đầu vào γ_{a1} , độ ẩm của giấy tăng lên đồng thời gây ảnh hưởng đến mạch vòng nhiệt độ điểm sương. Dưới tác động của bộ điều khiển MPC trong toolbox Matlab Simulink đã điều khiển độ ẩm của giấy về giá trị đặt nhưng thời gian điều chỉnh lớn (lên đến $10^4 s$), điều này chứng tỏ bộ điều khiển mặc định hoạt động chưa tốt ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm giấy.



Hình 5. Đáp ứng của bộ điều khiển MPC khi thay đổi nhiệt độ ẩm giấy đầu vào (Sử dụng Toolbox MPC của Matlab)



Hình 6. Đáp ứng của bộ điều khiển MPC khi thay đổi nhiệt độ điểm sương

3. Kết luận

Từ việc phân tích thiết kế bộ điều khiển MPC tích hợp sẵn trong toolbox Matlab Simulink, so sánh với bộ điều khiển MPC tối ưu hóa từng đoạn ta thấy bộ điều khiển MPC tối ưu từng đoạn đáp ứng tốt với nhiễu tác động hay nói cách khác là hệ có khả năng kháng nhiễu khi thay đổi thông số độ ẩm đầu vào, đặc biệt đảm bảo tách kênh giữa điều khiển độ ẩm và nhiệt độ điểm sương, hệ bám được lượng đặt khi vận hành thay đổi độ ẩm và nhiệt độ điểm sương. Kết quả nghiên cứu là đúng đắn và có thể triển khai ứng dụng trong thực tế sản xuất.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tài liệu thiết kế và kỹ thuật vận hành giấy Bãi bằng (nâng cấp lần 2), 2014.
- [2] Bùi Quốc Khánh, et al. (2014): *Điều khiển quá trình*. NXB khoa học kỹ thuật Hà Nội.
- [3] Đỗ Thị Tú Anh, Nguyễn Doãn Phước (2013): *Giới thiệu về điều khiển dự báo hệ tuyến tính*. Hội nghị khoa học khoa Điện tử Đại học Công nghiệp Thái Nguyên.
- [4] Trần Kim Quyên, Bùi Quốc Khánh, Lê Khắc Trường, *Động học quá trình sấy giấy đối lưu*, tạp chí Tự động hóa ngày nay, chuyên san Điều khiển và Tự động hóa số 11, tháng 12 năm 2014, pp 58-63.
- [5] Trần Kim Quyên, Lê Khắc Trường, Phạm Văn Tuynh: *Động học quá trình cân bằng gió -Zerolevel trong buồng sấy giấy*. Tạp chí Tự động hoá ngày nay, chuyên san Điều khiển và Tự động hoá số 12, tháng 4/2015, pp36-41.
- [6] Trần Kim Quyên, Đoàn Quang Vinh, and Lê Khắc Trường: *Điều khiển đa biến tách kênh cho buồng sấy giấy*. 2015, Hội nghị tự động hóa Toàn quốc, VCCA 2015.
- [7] Camacho, E. and Bordons, C. (1999): *Model predictive control*. Springer.
- [8] Holkar, K.K. and Waghmare, L.M.(2010): *An overview of model predictive control*. Int. Journal of Control and Automation, Vol. 3, No. 4, December 2010, pp. 47-64.
- [9] Maciejowski, M.J. (2011): *Predictive control with constraints*. Prentice Hall.