

TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ CỦA HỆ THỐNG ĐIỀU HÒA KHÔNG KHÍ TRONG TÒA NHÀ SỬ DỤNG CHIẾN LƯỢC ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH

OPTIMIZATION OF ENERGY USED BY AIR-CONDITIONING SYSTEMS IN BUILDINGS USING MODEL PREDICTIVE CONTROL STRATEGY

Nguyễn Minh Hòa^{1*}

¹Trường Đại học Trà Vinh

*Tác giả liên hệ: hoatvu@tvu.edu.vn

(Nhận bài: 10/3/2021; Chấp nhận đăng: 21/5/2021)

Tóm tắt - Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ứng dụng chiến lược điều khiển dự báo mô hình để tối ưu hóa năng lượng sử dụng của hệ thống điều hòa không khí trong các tòa nhà. Mục tiêu điều khiển là vừa đảm bảo nhiệt độ tiện nghi trong phòng làm việc dưới tác động thay đổi liên tục của môi trường thời tiết bên ngoài tòa nhà, vừa tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ của hệ thống điều hòa không khí. Mô hình dự báo nhiệt độ và năng lượng tiêu thụ trong các tòa nhà được đề xuất áp dụng trong bài báo là mô hình nhiệt trở - nhiệt dung (RC). Điều khiển dự báo mô hình được so sánh với điều khiển PID truyền thống qua mô phỏng trên máy tính. Kết quả cho thấy chiến lược điều khiển dự báo giúp giảm năng lượng tiêu thụ trong khi vẫn đảm bảo yêu cầu về tiện nghi nhiệt của tòa nhà.

Từ khóa - Hệ thống điều hòa không khí; điều khiển dự báo mô hình; quản lý năng lượng trong các tòa nhà; mô hình nhiệt trở - nhiệt dung; tiện nghi nhiệt

1. Đặt vấn đề

Năng lượng tiêu thụ trong các tòa nhà chiếm khoảng 40% năng lượng tiêu thụ toàn cầu [1]. Phần lớn năng lượng trong các tòa nhà được sử dụng để điều hòa không khí, duy trì tiện nghi nhiệt cho người sử dụng. Các hệ thống điều hòa không khí thường ưu tiên duy trì tiện nghi nhiệt hơn nên vấn đề tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ chưa được chú trọng đúng mức. Vì vậy, thiết kế hệ thống điều khiển sao cho đáp ứng tốt về tiện nghi nhiệt mà vẫn đảm bảo tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ đang là yêu cầu bắt buộc của các hệ thống điều hòa không khí hiện đại. Trong số các phương pháp điều khiển hiện đại đang được áp dụng, điều khiển dự báo mô hình (MPC) được sử dụng phổ biến trong các hệ thống điều hòa không khí [2].

Một số các nghiên cứu liên quan tiêu biểu có thể kể đến qua các công bố [3], [4], [5]. Gongsheng Huang và các cộng sự [3], nghiên cứu áp dụng MPC cho hệ thống điều hòa không khí, nhưng chủ yếu tập trung giải quyết vấn đề bền vững của bộ điều khiển dưới tác động của nhiễu và các yếu tố bất định. Nghiên cứu [4] áp dụng MPC cho hệ thống sưởi của tòa nhà Đại học Kỹ thuật Cộng hòa Séc. Kết quả nghiên cứu cho thấy, MPC có thể tiết kiệm năng lượng đến 29% so với các phương pháp điều khiển thông thường khác. Công bố [5] đề xuất chiến lược MPC phân tán điều khiển nhiệt độ cho các tòa nhà có nhiều khu vực và nhiều nguồn điều hòa khác nhau. Mục đích là để giảm tải tính toán cho bộ điều khiển MPC trung tâm thông qua các bộ điều khiển MPC cục bộ. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên bị hạn chế trong sử dụng các mô hình dự báo. Cụ thể, mô hình

Abstract - This article presents a study of using model predictive control strategy to optimize energy used by air-conditioning systems in buildings. The control objective is to simultaneously maintain the thermal comfort in building offices under the impact of continuously changing weather conditions outside the buildings and minimize the energy used by air-conditioning systems. The model used for the prediction of temperature and energy used is the the resistance capacitance (RC) thermal model. The model predictive control was compared to the classical PID control via computer simulation. The results show that the model predictive control can both reduce energy used and guarantee thermal comfort in buildings.

Key words - Air-conditioning systems; Model Predictive Control (MPC); energy management in buildings; Resistance Capacitance (RC) thermal models; thermal comfort

dự báo quá phức tạp [5] hoặc quá đơn giản như mô hình bậc 1 có trễ trong [3] hoặc thiếu tính “trong sáng” như mô hình không gian trạng thái nhận dạng bằng phương pháp không gian con (subspace identification) trong [4]. Gần đây nhất, bài báo [6] đề xuất các mô hình để dự báo lượng năng lượng sử dụng của 1325 máy điều hoà trong các tòa nhà dân dụng dựa trên nền tảng đám mây. Các mô hình này tuy dự báo tương đối chính xác lượng năng lượng sử dụng của các máy điều hoà nhưng không thể áp dụng trong điều khiển dự báo vì tính phức tạp của mô hình và tính phân tán của hệ thống. Trong bài báo này, tác giả sử dụng mô hình dự báo dựa trên mạng nhiệt trở - nhiệt dung (Resistance Capacitance - RC) được đề xuất trong công bố [7]. Mô hình RC được sử dụng khá phổ biến trong mô hình hóa và mô phỏng nhiệt động học trong các tòa nhà. Tùy theo tính chất và yêu cầu mô hình hóa, số lượng nhiệt trở và nhiệt dung trong mạng RC có thể khác nhau [8]. Các mô hình RC thường được dùng là 2R2C, 3R2C, 5R1C, 5R2C [9-11]. Một số tham số của các mô hình này thường được xác định dựa vào đáp ứng trong miền tần số kết hợp với các giải thuật tối ưu hóa như giải thuật di truyền. Ưu điểm lớn nhất của mô hình RC là vừa có bậc thấp vừa có tính xấp xỉ cao các đặc tính nhiệt của tòa nhà.

2. Mô tả đối tượng điều khiển

2.1. Tòa nhà khoa Kỹ thuật và Công nghệ

Tòa nhà khoa Kỹ thuật và Công nghệ gồm 1 trệt và 1 lầu và có 12 phòng chức năng, tọa lạc trong khuôn viên chính của trường Đại học Trà Vinh, thuộc thành phố Trà

¹ Tra Vinh University (Hoa M. Nguyen)

Vinh, tỉnh Trà Vinh. Đây là nơi có khí hậu nóng ẩm với nhiệt độ dao động trong năm từ 23 – 33°C, độ ẩm trung bình trong năm khoảng 72%.

2.2. Phòng họp khoa

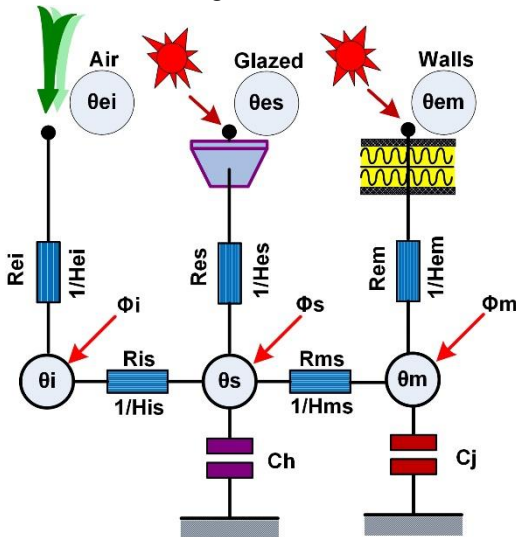
Phòng họp khoa chính là đối tượng được dùng để thu thập các thông số vật lý cho mục đích nhận dạng mô hình và mô phỏng hệ thống điều khiển dự báo trong nghiên cứu này. Phòng họp khoa có được đặt ở tầng 1, có diện tích là 48,87 m². Vật liệu cấu trúc của phòng họp chủ yếu là tường, cửa nhôm, khung kính. Hệ thống cảm biến được lắp đặt để thu thập dữ liệu thời tiết, nhiệt độ, độ ẩm bên trong và bên ngoài phòng họp.

3. Mô hình nhiệt động RC

Quá trình tương tác và lan truyền nhiệt của các tòa nhà có thể được mô hình hóa bằng nhiều mô hình khác nhau. Tuy nhiên, mô hình đơn giản nhất được sử dụng là mô hình nhiệt RC. Mô hình này mô phỏng đặc tính đáp ứng điện của các mạch điện trở và tụ điện để mô hình hóa đáp ứng nhiệt của các tòa nhà. Tùy theo yêu cầu về độ chính xác và thời gian tính toán mà có thể sử dụng số lượng và cấu trúc các nhiệt trở và tụ nhiệt khác nhau để mô phỏng nhiệt động lực học của một phòng/ tòa nhà. Tuy nhiên, đối với các mô phỏng đơn giản, không đòi hỏi cao về độ chính xác thì người ta thường sử dụng mô hình tiêu chuẩn 5R1C được đề xuất bởi tổ chức tiêu chuẩn quốc tế ISO [9].

3.1. Giới thiệu mô hình 5R2C

Do mô hình 5R1C đơn giản nên không thể có độ chính xác cao trong mô hình hóa. Vì vậy, trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất mô hình 5R2C có độ chính xác cao hơn mô hình 5R1C [7] để xây dựng mô hình dự báo cho phòng họp khoa của tòa nhà khoa Kỹ thuật và Công nghệ. Mô hình này có cấu trúc như trong Hình 1.



Hình 1. Mô hình 5R2C

Mô hình gồm có 5 nhiệt trở và hai tụ nhiệt. Trong đó, $R_{ei} = 1/H_{ei}$ là nhiệt trở do thông gió; $R_{is} = 1/H_{is}$ là nhiệt trở do đối lưu và bức xạ nhiệt bên trong tòa nhà; $R_{es} = 1/H_{es}$ là nhiệt trở của các khung kính; $R_{ms} = 1/H_{ms}$ là nhiệt trở của các lớp tường bên trong; $R_{em} = 1/H_{em}$ là nhiệt trở của các lớp tường bên ngoài; $H_{\times\times}$ là các nhiệt dẫn; C_j và C_h là các nhiệt dung đại diện cho

quán tính nhiệt của phòng; θ_{ei} là nhiệt độ không khí bên ngoài; θ_i là nhiệt độ không khí bên trong; θ_{es} là nhiệt độ bên ngoài khung kính; θ_s là nhiệt độ trung bình có trọng số giữa nhiệt độ không khí bên trong và nhiệt độ bức xạ trung bình bên trong tòa nhà; θ_{em} là nhiệt độ bên ngoài tường; θ_m là nhiệt độ bên trong tường; Φ_i là tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_i ; Φ_s là tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_s ; Φ_m là tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_m .

3.2. Mô hình không gian trạng thái

Các phương trình của mô hình nhiệt 5R2C được trình bày chi tiết trong tài liệu [7]. Bài báo này chỉ trình bày lại mô hình 5R2C dưới dạng hệ phương trình biến trạng thái như sau:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

Trong đó,

$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1(t) \ \dot{x}_2(t)]^T = [\dot{\theta}_s(t) \ \dot{\theta}_m(t)]^T$ là vector vi phân biến trạng thái;

$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T = [\theta_s(t) \ \theta_m(t)]^T$ là vector biến trạng thái;

$u(t) = \Phi_m(t)$ là biến điều khiển;

$d(t) = [\theta_{es}(t) \ \theta_{ei}(t) \ \theta_{em}(t) \ \Phi_s(t) \ \Phi_i(t)]^T$ là vector nhiễu ngoài tác động vào hệ thống;

$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ là ma trận hệ thống;

B là ma trận điều khiển;

B_d là ma trận nhiễu ngoài không điều khiển được;

C là ma trận đầu ra.

Các ma trận (phần tử ma trận) trên được biểu diễn theo các thông số vật lý của phòng họp như sau:

$$a_{11} = -\frac{H_{ms} + H_{es} + H_{is}}{C_h} + \frac{H_{is}^2}{C_h(H_{ei} + H_{is})} \quad (3)$$

$$a_{12} = \frac{H_{ms}}{C_h} \quad (4)$$

$$a_{21} = \frac{H_{ms}}{C_j} \quad (5)$$

$$a_{22} = -\frac{H_{em} - H_{ms}}{C_j} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{C_j} \end{bmatrix} \quad (7)$$

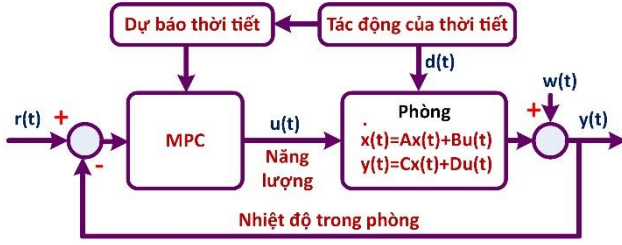
$$B_d = \begin{bmatrix} H_{es} & H_{es} & H_{is} & 0 & \frac{1}{C_h} & \frac{H_{is}}{C_h(H_{ei} + H_{is})} \\ \frac{H_{ms}}{C_h} & \frac{H_{ms}}{C_h(H_{ei} + H_{is})} & \frac{H_{ms}}{C_j} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{H_{em}}{C_j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = [0 \quad 1] \quad (9)$$

4. Điều khiển dự báo mô hình (MPC)

Điều khiển dự báo là một phương pháp điều khiển tối ưu được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực điều khiển công nghiệp. Do yêu cầu tiết kiệm năng lượng điều hoà trong các tòa nhà ngày càng cao trong khi vẫn đảm bảo sự tiện nghi về nhiệt nên MPC là một phương pháp điều khiển phù

hợp với mục tiêu này. Cấu trúc tổng quát hệ thống điều khiển được minh hoạ trong Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc tổng quát hệ thống điều khiển MPC

Trong đó, nhiệt độ bên trong phòng $y(t)$ chịu tác động của nhiệt độ bên ngoài toà nhà $d(t)$ (nhiều đo lường) và các nguồn phát nhiệt bên trong phòng (thiết bị, con người...). Ngoài ra, đầu ra $y(t)$ còn chịu tác động của sai số đo lường $w(t)$. Yêu cầu điều khiển là đảm bảo tiện nghi nhiệt bên trong phòng - nhiệt độ đặt $r(t)$ dưới sự tác động liên tục thay đổi của thời tiết bên ngoài sao cho tiết kiệm năng lượng điều hoà $u(t)$ nhiều nhất có thể.

Trong hệ thống này, vai trò của bộ điều khiển MPC là kết hợp thông tin về nhiệt đặt và sự tác động dự báo của các yếu tố thời tiết bên ngoài toà nhà để tính toán chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu trong khoảng $[t, t_{NC}]$ (khoảng điều khiển):

$$u_t = \{u_{t|t}, u_{t+1|t}, \dots, u_{t+N_c-1|t}\} \quad (10)$$

Với các biến trạng thái ban đầu cho trước kết hợp với ước lượng các tác động nhiễu của thời tiết (bức xạ của mặt trời, nhiệt độ bên ngoài toà nhà...), MPC sẽ dự báo các biến trạng thái trong một khoảng dự báo N_p và tính toán tín hiệu điều khiển trong khoảng điều khiển N_c .

4.1. Hàm mục tiêu

Bộ điều khiển MPC tính toán tín hiệu điều khiển tối ưu thông qua hàm mục tiêu sau:

$$J^*(x_t) = \min_{u_{t|t}, \dots, u_{t+N-1|t}} \sum_{k=0}^{N-1} l_k([Q]x_{t+k|t}, [R]u_{t+k|t}) \quad (11)$$

Với các điều kiện sau:

$$(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}) \in X \times U \quad (12)$$

$$x_{t|t} = x_t \quad (13)$$

$$x_{t+k+1|t} = Ax_{t+k|t} + Bu_{t+k|t} + Bd_d d_{t+k|t} + B_w w_{t+k|t} \quad (14)$$

Trong đó, $J^*(x_t)$ là hàm mục tiêu; l_k là hàm toàn phương; $[Q]$ và $[R]$ lần lượt là các ma trận trọng số của biến trạng thái và biến điều khiển dưới dạng các ma trận chéo; B_w và w_t lần lượt là ma trận và nhiễu không đo lường tác động vào hệ thống. Hàm mục tiêu được cụ thể hoá với hàm toàn phương trong bài báo này như sau:

$$J^*(x_t) = \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\hat{z}_{t+i|t} - r_{t+i|t}\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\Delta u_{t+j|t}\|_R^2 \quad (15)$$

Trong đó, $\hat{z}(t)$ là tín hiệu đầu ra dự báo; $r(t)$ là tín hiệu tham chiếu; Δu là chênh lệch mức năng lượng giữa hai thời điểm điều khiển. Như vậy hàm mục tiêu này phản ánh mục tiêu điều khiển là tối thiểu hoá sai lệch giữa tín hiệu đặt và tín hiệu đầu ra dự báo trong khi tối thiểu hoá mức thay đổi năng lượng.

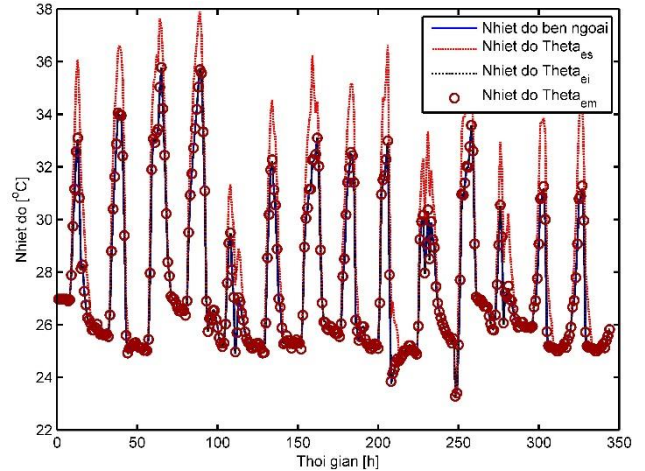
5. Kết quả nghiên cứu

Mô hình 5R2C biểu diễn bởi phương trình (1) và (2) được sử dụng trong thiết kế bộ điều khiển dự báo mô hình. Dữ liệu thời tiết bên ngoài toà nhà được thu thập bao gồm bức xạ nhiệt, nhiệt độ, độ ẩm, tốc độ gió thông qua hệ thống cảm biến và trạm đo thời tiết PCE-FWS 20 (xem Bảng 1). Tuy nhiên, chỉ có hai yếu tố nhiễu ngoài tác động trực tiếp đến nhiệt độ bên trong toà nhà là bức xạ nhiệt và nhiệt độ bên ngoài toà nhà. Các yếu tố này được xem là nguồn nhiễu đo lường trong thiết kế bộ điều khiển dự báo MPC.

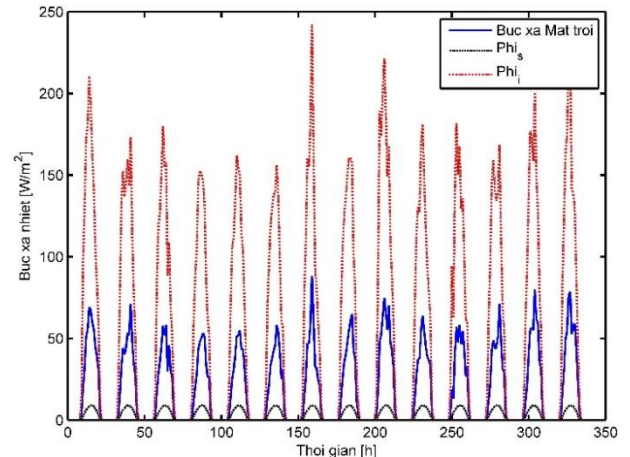
Bảng 1. Tổng hợp dữ liệu đo lường

Giá trị	Các thông số			
	T[°C]	RH [%]	V [m/s]	IR[W/m ²]
Min	23,29	43	0,1	0
Max	35,78	100	12,8	88,59
Mean	27,45	80,78	1,89	19,06
SD(+/-)	2,75	12,52	1,92	23,37

T: nhiệt độ bên ngoài | RH: độ ẩm | V: tốc độ gió | IR: bức xạ mặt trời | Min: Trị nhỏ nhất | Max: Trị lớn nhất | Mean: Trị trung bình | SD(+/-): Độ lệch chuẩn.



Hình 3. Các nguồn nhiễu đo lường là nhiệt độ



Hình 4. Các nguồn nhiễu đo lường là bức xạ nhiệt

Vector nhiễu đo lường bao gồm 5 thành phần $\theta_{es}(t)$, $\theta_{ei}(t)$, $\theta_{em}(t)$, $\Phi_s(t)$, $\Phi_i(t)$. Các thành phần này được đo lường và tính toán dựa trên bức xạ nhiệt và nhiệt độ bên ngoài toà nhà. Do các thông số này không thể trình bày hết

trong khuôn khổ bài báo nên tác giả chỉ trình bày minh họa (xem Hình 3 và 4) các thông số trong một khoảng thời gian ngắn để người đọc có cái nhìn trực quan hơn về các nhiễu đo lường tác động đến hệ thống.

5.1. Các thông số mô phỏng

Toàn bộ hệ thống điều khiển được thiết kế và mô phỏng trên nền tảng *Matlab* và *Simulink* nên cần phải có đầy đủ các thông số của các đối tượng trong hệ thống. Các thông số vật lý của phòng họp được trình bày trong Bảng 2 [7].

Bảng 2. Các thông số vật lý của mô hình 5R2C

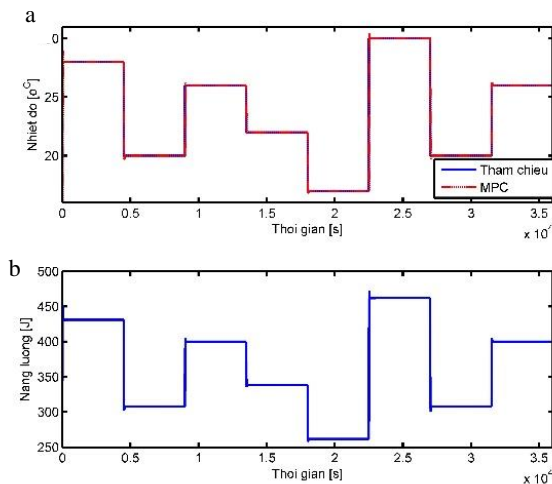
Thông số	R_{ei} [K/W]	R_{es} [K/W]	R_{em} [K/W]	R_{is} [K/W]	R_{ms} [K/W]	C_j [J/K]	C_h [J/K]
Giá trị	0,015	0,0168	0,0087	0,0025	0,0012	3501	198

Các thông số của bộ điều khiển dự báo được điều chỉnh trong quá trình mô phỏng theo phương pháp thử sai để có bộ thông số đạt kết quả tốt nhất. Bộ thông số cuối cùng được xác định như sau: Khoảng dự báo $N_p = 10$; Khoảng điều khiển $N_c = 3$; Thời gian mô phỏng là 36000 s. Do hệ thống có hai biến trạng thái và một biến điều khiển nên các phần tử trên đường chéo của các ma trận trọng số lần lượt là: $q_{11} = q_{22} = 1$ và $r = 100$. Tham số của bộ điều khiển PID được thiết kế bằng phương pháp Zigler-Nichols. Kết quả tính toán được cho như sau: $K_p = 0,0578$, $K_i = 0,0129$, $K_d = 0,0544$. Bộ tham số này được sử dụng cho cả hai trường hợp không có nhiễu và có nhiễu.

5.2. Kích bản mô phỏng

Để có sở sở đánh giá hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển dự báo trong các điều kiện khác nhau, nghiên cứu này tiến hành mô phỏng hệ thống điều khiển qua hai trường hợp khác nhau: Hoàn toàn không có nhiễu (kể cả nhiễu đo lường và không đo lường) và có nhiễu tác động vào hệ thống. Ngoài ra, nhiệt độ đặt được thay đổi theo nhiều nấc từ 18 – 30°C để đánh giá khả năng đáp ứng của điều khiển MPC.

5.2.1. Không có nhiễu



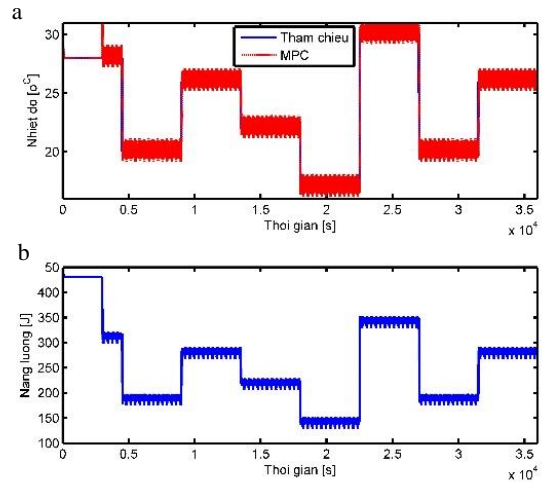
Hình 5. Đáp ứng của điều khiển dự báo khi không có nhiễu

Từ Hình 5a ta thấy, tín hiệu đầu ra - nhiệt độ phòng (đường đứt nét) bám sát tín hiệu tham chiếu - nhiệt độ đặt (đường liền nét) khi nhiệt độ đặt thay đổi theo nhiều nấc khác nhau từ 18 – 30°C với độ vọt lố rất ít. Điều này cho

thấy, bộ điều khiển MPC cho kết quả điều khiển bám (tracking control) rất tốt. Ngoài ra, Hình 5b cũng cho thấy, tín hiệu điều khiển - mức năng lượng sử dụng của máy điều hòa cũng thay đổi khi tín hiệu đặt thay đổi.

5.2.2. Có nhiễu

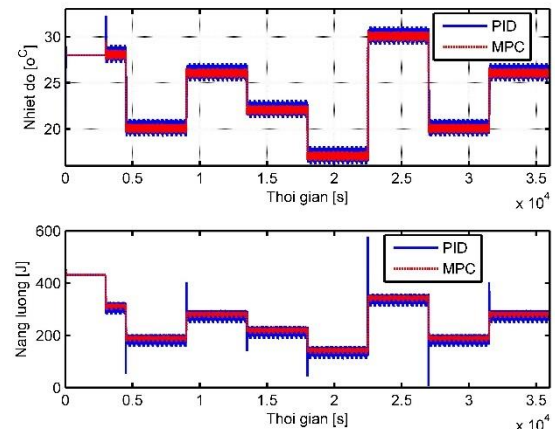
Mô phỏng trong trường hợp có nhiễu bao gồm nhiễu do tác động của bức xạ nhiệt và nhiệt độ bên ngoài toà nhà (xem Hình 3 và 4), và nhiễu đo lường do dụng cụ đo (là nhiễu trắng với mức năng lượng 0,5 tương ứng với tầm sai số của cảm biến đo nhiệt độ).



Hình 6. Đáp ứng của điều khiển dự báo khi có nhiễu

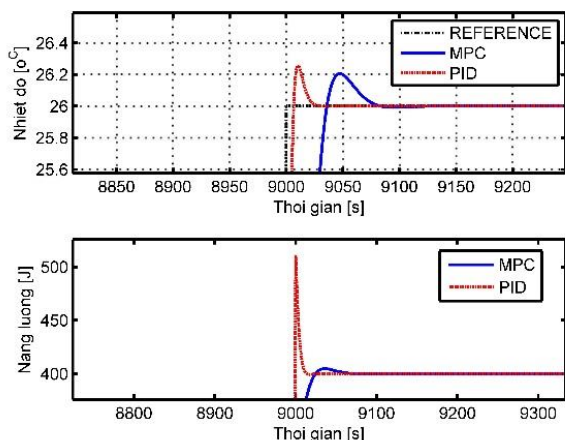
Hình 6 cho thấy, trong trường hợp có nhiễu ngoài ($d(t) \neq 0$) và nhiễu đo lường ($w(t) \neq 0$), nhiệt độ phòng vẫn bám theo nhiệt độ đặt khi nhiệt độ đặt thay đổi theo nhiều nấc khác nhau. Tuy nhiên, nhiệt độ phòng có dao động biên độ nhỏ là do tác động chủ yếu của nhiễu đo lường. Điều này là tất yếu vì trong thực tế nhiệt độ trong phòng chịu tác động rất lớn của nhiệt độ và bức xạ mặt trời bên ngoài toà nhà. Tuy nhiên, biên độ dao động của nhiệt độ phòng nhỏ hơn 1°C nên không ảnh hưởng nhiều đến tiện nghi nhiệt của người dùng trong phòng. Hình 6b cho thấy, năng lượng của máy điều hòa bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiễu đo lường so với trường hợp không có nhiễu khi có sự dao động về biên độ của tín hiệu điều khiển.

5.3. So sánh với bộ điều khiển PID truyền thống



Hình 7. So sánh đáp ứng của điều khiển MPC và PID

Ngoài ra, nghiên cứu còn so sánh đáp ứng của bộ điều khiển dự báo và bộ điều khiển PID truyền thống trong trường hợp có nhiễu tác động (xem Hình 7). Qua mô phỏng ta thấy, tín hiệu đầu ra và tín hiệu điều khiển của PID dao động lớn hơn so với MPC. Điều này sẽ làm cho mức năng lượng của bộ điều khiển PID sẽ tiêu tốn nhiều hơn so với bộ điều khiển MPC. Ngoài ra, so sánh đáp ứng quá độ của hai bộ điều khiển PID và MPC còn được minh họa trong Hình 8.



Hình 8. So sánh MPC và PID trong khoảng quá độ

6. Bàn luận

Qua các kịch bản mô phỏng ta thấy, bộ điều khiển dự báo đáp ứng rất tốt trong trường hợp không có nhiễu (Hình 5). Tuy nhiên, các yếu tố nhiễu, đặc biệt là các nhiễu đo lường do tác động của thời tiết bên ngoài phòng họp là không tránh khỏi nên mô phỏng với nhiễu đo lường có tính thực tế hơn. Kết quả mô phỏng ở Hình 6 cho thấy, đáp ứng của bộ điều khiển dự báo vẫn ổn định mặc dù có các dao động biên độ nhỏ do tác động của nhiễu.

So sánh đáp ứng của bộ điều khiển MPC và bộ điều khiển PID truyền thống ở Hình 8 ta thấy đáp ứng đầu ra MPC có độ vọt ló ($\approx 0,789\%$) nhỏ hơn độ vọt ló của đáp ứng đầu ra PID ($\approx 0,972\%$). Xét về thời gian thì điều khiển MPC xác lập chậm hơn so với điều khiển PID (≈ 40 s). Tuy nhiên, đối với điều khiển nhiệt độ trong tiện nghi nhiệt thì thời gian đáp ứng nhỏ hơn 1 phút không có ảnh hưởng đáng kể đến độ thoải mái tiện nghi nhiệt của con người. Xét về đáp ứng của tín hiệu điều khiển thì đỉnh biên độ của PID cao hơn rất nhiều lần so với đỉnh biên độ của MPC (chênh lệch hơn 100 J). Trong trường hợp có nhiễu đo lường tác động liên tục do thời tiết thay đổi thường xuyên thì các dao động với biên độ cao của tín hiệu điều khiển PID cũng xuất hiện liên tục (xem Hình 7). Điều này cho thấy, điều khiển PID sẽ tiêu tốn năng lượng nhiều hơn điều khiển MPC khi nhiệt độ đặt và thời tiết bên ngoài tòa nhà thay đổi thường xuyên. Kết quả tính toán từ dữ liệu từ mô phỏng cho thấy tổng năng lượng tiêu thụ của điều khiển PID (105,5 KJ) lớn hơn so với tổng năng lượng tiêu thụ của điều khiển MPC

(90,189 KJ). Như vậy, chiến lược điều khiển dự báo giúp tiết kiệm năng lượng tiêu thụ được khoảng 17% so với điều khiển PID.

7. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất ứng dụng điều khiển dự báo để điều khiển nhiệt độ tiện nghi cho các tòa nhà sử dụng mô hình truyền nhiệt 5R2C. Mô hình này có ưu điểm là đơn giản (về cấu trúc và số lượng nhiệt trở R, tụ nhiệt C) nhưng vẫn đảm bảo yêu cầu dự báo so với các mô hình RC nhiều lớp được sử dụng trong các công bố trước đây.

Điều khiển MPC đề xuất ở trên đã được ứng dụng cho phòng họp khoa thuộc tòa nhà Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh. Kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển MPC kết hợp với mô hình 5R2C đáp ứng tốt trong các trường hợp không có hoặc có các nhiễu tác động vào hệ thống. Ngoài ra, so sánh hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển MPC và bộ điều khiển PID cho thấy MPC có đáp ứng tốt hơn PID. Điều quan trọng hơn là điều khiển MPC còn cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng điều hoà tốt hơn với so với điều khiển PID truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Liu Yang, Haiyan Yan, Joseph C. Lam, "Thermal comfort and building energy consumption implications – A review", *Applied Energy*, Vol. 115, 2014, pp. 164-173.
- [2] Abdul Afram, Farrokhan Janabi-Sharifi, "Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC)", *Building and Environment*, Vol. 72, 2014, pp. 343-355.
- [3] Gongsheng Huang, Shengwei Wang, Xinhua Xu, "A robust model predictive control strategy for improving the control performance of air-conditioning systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, 2009, pp. 2650-2658.
- [4] Samuel Prívvara, Jan Siroky, Lukás Ferkl, Jiří Cigler, "Model predictive control of a building heating system: The first experience", *Energy and Buildings*, Vol. 43, 2011, pp. 564-572.
- [5] Petru-Daniel Morosan, Romain Bourdais, Didier Dumur, Jean Buisson, "A distributed MPC strategy based on Benders' decomposition applied to multi-source multi-zone temperature regulation", *Journal of Process Control*, Vol. 21, 2011, pp. 729-737.
- [6] Lu Yan, Meng Liu, "A simplified prediction model for energy use of air conditioner in residential buildings based on monitoring data from the cloud platform", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 60, 2020, pp. 1-18.
- [7] N. M. Hòa, N. V. Khanh, "Phát triển mô hình truyền nhiệt dùng cho điều khiển dự báo năng lượng trong các tòa nhà", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, số 3 (112), 2017, pp. 38-43.
- [8] C. Lombard, E. H. Mathews, "Efficient, Steady State Solution of a Time Variable RC Network, for Building Thermal Analysis", *Building and Environment*, Vol. 27, 1992, pp. 279-287.
- [9] International Organization for Standardization, "Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling", 2nd E., Geneva: ISO; 2008 (ISO 13790:2008, E).
- [10] Qiuyuan Zhu, Xinhua Xu, Jinbo Wang, Fu Xiao, "Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 76, 2014, pp. 258-272.
- [11] Shengwei Wang, Xinhua Xu, "Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 45, 2006, pp. 419-432.