

PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT DÙNG CHO ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO NĂNG LƯỢNG TRONG CÁC TÒA NHÀ

DEVELOPMENT OF THERMAL MODELS FOR PREDICTIVE CONTROL OF ENERGY IN BUILDINGS

Nguyễn Minh Hòa, Nghị Vĩnh Khanh

Trường Đại học Trà Vinh; hoatvu@tvu.edu.vn, nghivinhkhanh@tvu.edu.vn

Tóm tắt - Một trong những giải pháp điều khiển tối ưu các hệ thống điều hòa nhiệt độ trong các tòa nhà dưới sự tác động của nhiệt độ môi trường là phương pháp điều khiển dự báo dựa vào mô hình truyền nhiệt. Để thực thi được các bộ điều khiển dự báo hiệu quả đòi hỏi phải có mô hình toán mô tả chính xác quá trình truyền nhiệt của tòa nhà. Ngoài ra, mô hình truyền nhiệt cũng phải tương đối đơn giản về mặt tính toán để không làm ảnh hưởng đến độ phức tạp và thời gian thực thi của các bộ điều khiển dự báo. Trong bài báo này, một mô hình truyền nhiệt mới theo cấu trúc mạng điện trở và tụ điện được đề xuất dựa trên sự cải tiến mô hình truyền nhiệt chuẩn theo tiêu chuẩn ISO 13790. Mô hình truyền nhiệt mới được kiểm chứng và so sánh với mô hình truyền nhiệt chuẩn. Qua kết quả nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm cho thấy mô hình truyền nhiệt mới có độ chính xác cao hơn mô hình truyền nhiệt chuẩn.

Từ khóa - quản lý năng lượng trong các tòa nhà; mô hình truyền nhiệt; điều khiển dự báo; ISO 13790; mạng điện trở và tụ điện.

1. Đặt vấn đề

Theo kết quả nghiên cứu được công bố trong bài báo [1] thì các tòa nhà tiêu thụ từ 20% - 40% tổng năng lượng tiêu thụ ở các nước phát triển, và mỗi năm lượng năng lượng tiêu thụ trong các tòa nhà tăng từ 0,5% - 5%. Vì vậy, tiết kiệm năng lượng trong các tòa nhà đã và đang trở thành một chủ đề nghiên cứu nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới.

Trong những năm gần đây, bắt đầu xuất hiện các công trình nghiên cứu ứng dụng phương pháp điều khiển dự báo dựa vào mô hình trong lĩnh vực điều khiển thời tiết trong các tòa nhà [2]. Kết quả nghiên cứu của các công trình này cho thấy tiềm năng to lớn của điều khiển dự báo đối với vấn đề tiết kiệm năng lượng trong các tòa nhà.

Tuy nhiên, một trong những công đoạn khó khăn nhất và tốn thời gian nhiều nhất của điều khiển dự báo là quá trình xây dựng mô hình toán mô tả các đặc điểm động học của đối tượng điều khiển [3]. Với đối tượng điều khiển là các tòa nhà thì các mô hình động học chính là các mô hình truyền nhiệt. Các mô hình truyền nhiệt này mô tả quá trình thay đổi nhiệt độ bên trong các tòa nhà dưới sự ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường và sự tác động các hệ thống điều hòa nhiệt độ. Có rất nhiều công trình nghiên cứu xây dựng mô hình truyền nhiệt của các tòa nhà được khảo sát, đánh giá và bàn luận trong các tài liệu [4-7]. Nhìn chung có ba loại mô hình truyền nhiệt đã và đang được tập trung nghiên cứu. Loại mô hình thứ nhất là mô hình hộp đen. Các mô hình hộp đen được nhận dạng chỉ dựa vào dữ liệu vào - ra, không yêu cầu phải biết trước cấu trúc và các phương trình vật lý của tòa nhà. Hai cấu trúc mô hình truyền nhiệt hộp đen điển hình là mô hình hồi quy và mô hình mạng thần

Abstract - One of the optimal control methods of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems for buildings under the impact of environmental temperatures is the thermal model-based predictive control. The implementation of predictive controllers requires mathematical models that can accurately describe heat transfer processes of buildings. In addition, the thermal models must be computationally simple in order not to increase the complexity and computational time of predictive controllers. In this paper, a new thermal model with resistance and capacitance (RC) network structure is proposed based on the improved standard thermal model according to the ISO standard 13790. The proposed thermal model has been validated and compared with the standard thermal model. It is shown from the simulation and experimental results that the proposed thermal model is better than the standard thermal model with respect to the accuracy of fitting.

Key words - energy control of buildings; thermal models; predictive control; ISO 13790; resistance and capacitance networks.

kinh nhân tạo [7]. Loại mô hình thứ hai là mô hình hộp xám. Việc nhận dạng mô hình truyền nhiệt hộp xám của các tòa nhà đòi hỏi phải kết hợp các thông tin vật lý biết trước và dữ liệu vào - ra đo lường được [8]. Loại mô hình thứ ba, tương đối phổ biến, là mô hình hộp trắng. Các mô hình hộp trắng được xây dựng hoàn toàn dựa vào các quan hệ vật lý cơ bản của các quá trình truyền nhiệt trong các tòa nhà. Hai cấu trúc mô hình truyền nhiệt dưới dạng hộp trắng điển hình là mô hình mô phỏng trên phần mềm (Energy Plus, TRNSYS, ESP-r,...) và mô hình mạng nhiệt trở và tụ nhiệt RC giống như mô hình điện trở và tụ điện. Các mô hình mô phỏng trên phần mềm mô tả rất chi tiết quan hệ vật lý giữa các thành phần nhiệt trong tòa nhà. Tuy nhiên, các mô hình loại này chỉ thích hợp cho mục đích phân tích và dự báo năng lượng sử dụng trong các tòa nhà, chứ không thể áp dụng cho điều khiển dự báo. Ngược lại, các mô hình truyền nhiệt RC rất thích hợp áp dụng cho điều khiển dự báo vì tính đơn giản và “trong sáng” của chúng. Có nhiều công trình nghiên cứu mô hình hóa quá trình truyền nhiệt trong các tòa nhà sử dụng mô hình RC đã được công bố. Chẳng hạn như các tác giả trong bài báo [9] nghiên cứu xây dựng mô hình RC để đánh giá sự tương tác giữa thời tiết ở các vùng ngoại ô với sự tiêu thụ năng lượng trong các tòa nhà. Tác giả K.J. Kontoleon [10] đề xuất một phương pháp xây dựng mô hình truyền nhiệt RC để nghiên cứu sự ảnh hưởng của bề mặt tường và khung kính đến quá trình tiêu thụ năng lượng trong các tòa nhà. Ngoài ra còn có các công trình nghiên cứu xây dựng mô hình truyền nhiệt RC cho các thành phần cấu tạo của tòa nhà, chẳng hạn như tường [11,12]. Tuy nhiên, các mô hình RC được liệt kê ở trên không thể áp dụng cho mục đích điều khiển được. Vì vậy, Coley và Penman [13] đã đề xuất một mô hình RC đơn giản

gồm 3 nhiệt trở và 2 tụ nhiệt (gọi là mô hình 3R2C) dùng để mô tả quá trình truyền nhiệt giữa môi trường bên ngoài và bên trong tòa nhà. Tuy mô hình 3R2C này thích hợp cho mục đích điều khiển nhưng nó lại thiếu chính xác vì không có xem xét các thành phần bức xạ và đối lưu nhiệt. Khắc phục được hạn chế của mô hình 3R2C trong [13], Fraisse và các cộng sự đã mở rộng kết quả nghiên cứu trong [11] khi đề xuất nhiều mô hình RC khác nhau, bao gồm các mô hình 1R2C, 3R2C, 3R4C, và phát triển một phương pháp xây dựng mô hình truyền nhiệt RC toàn cục cho tòa nhà từ các mô hình RC riêng rẽ của các bức tường nhà. Tuy nhiên, mô hình RC toàn cục xây dựng được trở nên phức tạp vì bậc của mô hình tăng lên đáng kể, nên nếu áp dụng cho điều khiển dự báo thì sẽ mất nhiều thời gian tính toán. Để giảm bớt thời gian tính toán của các giải thuật điều khiển dựa vào mô hình RC, các bài báo [15,16] đã đề xuất các phương pháp giảm bậc mô hình RC. Tuy nhiên các phương pháp giảm bậc này chỉ áp dụng cho một số tòa nhà có cấu trúc đặc biệt, chứ không thể áp dụng đại trà cho tất cả các loại tòa nhà được. Như vậy, các mô hình RC được đề xuất ở trên hoặc là quá đơn giản, hoặc là quá phức tạp nên khó có thể áp dụng cho điều khiển dự báo. Xuất phát từ khó khăn này, tổ chức chuẩn hóa quốc tế (ISO) đã đề xuất mô hình RC tương đối đơn giản mà hiệu quả, bao gồm 5 nhiệt trở và 1 tụ nhiệt (5R1C) trong bộ tiêu chuẩn ISO 13790:2008 [17], để làm mô hình chuẩn cho các nghiên cứu phân tích và tính toán năng lượng sử dụng trong các tòa nhà. Vì vậy, mô hình 5R1C này đã được sử dụng làm mô hình chuẩn so sánh với nhiều mô hình RC khác [18]. Tuy nhiên, mô hình chuẩn 5R1C có hạn chế là chưa xem xét đầy đủ các yếu tố quán tính nhiệt thành phần nên không có độ chính xác cao. Vì vậy trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một mô hình RC mới dựa trên cấu trúc của mô hình chuẩn 5R1C. Mô hình mới này, gồm 5 nhiệt trở và 2 tụ nhiệt (gọi là mô hình 5R2C) sẽ được trình bày rõ hơn trong các nội dung sau.

2. Giải quyết vấn đề

Mô hình truyền nhiệt mới 5R2C được đề xuất dựa trên sự cải tiến của mô hình chuẩn 5R1C nên phần này sẽ giới thiệu sơ nét về mô hình 5R1C trước khi trình bày chi tiết về mô hình 5R2C.

2.1. Mô hình truyền nhiệt 5R1C

Cấu trúc của mô hình truyền nhiệt chuẩn 5R1C được minh họa trong hình 1. Mô hình gồm 5 nhiệt trở và 1 tụ nhiệt. Trong đó, các thông số của mô hình 5R1C được định nghĩa như sau:

- $R_{ei} = \frac{1}{H_{ei}}$: nhiệt trở của hệ thống thông gió (KW⁻¹);

gió (KW⁻¹);

- $R_{is} = \frac{1}{H_{is}}$: nhiệt trở của đối lưu và bức xạ nhiệt bên trong tòa nhà (KW⁻¹);

bên trong tòa nhà (KW⁻¹);

- $R_{es} = \frac{1}{H_{es}}$: nhiệt trở của các khung kính (KW⁻¹);

- $R_{ms} = \frac{1}{H_{ms}}$: nhiệt trở của các lớp tường bên trong (KW⁻¹);

(KW⁻¹);

- $R_{em} = \frac{1}{H_{em}}$: nhiệt trở của các lớp tường bên ngoài (KW⁻¹);

(KW⁻¹);

- C_m : nhiệt dung của tường (JK⁻¹);

- θ_{ei} : nhiệt độ không khí bên ngoài (°C);

- θ_i : nhiệt độ không khí bên trong (°C);

- θ_{es} : nhiệt độ bên ngoài khung kính (°C);

- θ_s : 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 (°C);

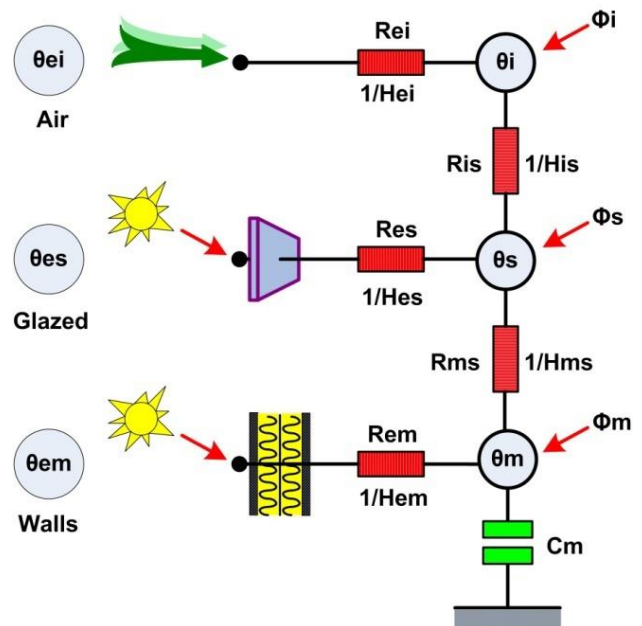
- θ_{em} : nhiệt độ bên ngoài tường (°C);

- θ_m : nhiệt độ bên trong tường (°C);

- ϕ_i : tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_i (W);

- ϕ_s : tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_s (W);

- ϕ_m : tổng các nguồn nhiệt tác động tại nút θ_m (W).

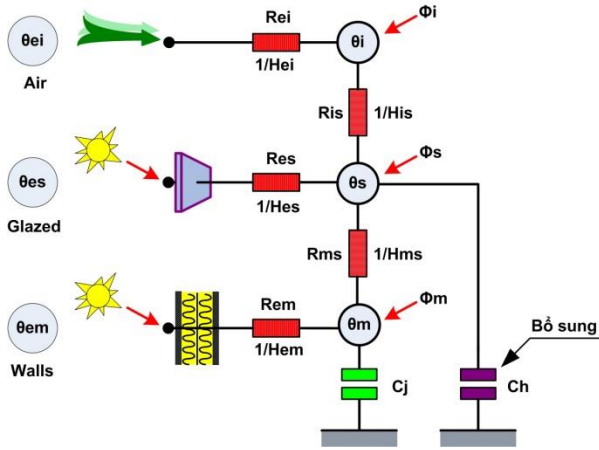


Hình 1. Cấu trúc của mô hình truyền nhiệt 5R1C

Như được minh họa trong hình 1, mô hình 5R1C có tất cả 6 thông số cần phải được ước lượng, bao gồm 5 nhiệt trở (R_{ei} , R_{es} , R_{em} , R_{is} , R_{ms}) và 1 nhiệt dung (C_m). Phương pháp ước lượng các thông số trên được trình bày chi tiết trong tài liệu tham khảo [17]. Ngoài ra tài liệu này cũng trình bày chi tiết các phương trình nhiệt động học của mô hình 5R1C.

2.2. Mô hình truyền nhiệt 5R2C

2.2.1. Cấu trúc của mô hình 5R2C



Hình 2. Cấu trúc của mô hình truyền nhiệt 5R2C

Mô hình 5R1C tuy có ưu điểm là đơn giản, dễ tính toán, nhưng nó có hạn chế là trong mô hình chỉ dùng một tụ nhiệt C_m đại diện cho quán tính nhiệt của tòa nhà. Tuy nhiên, trong thực tế tồn tại 3 loại quán tính nhiệt khác nhau đối với các tòa nhà: (1) Quán tính nhiệt theo giờ: biểu diễn sự thay đổi nhiệt độ tại bề mặt tường bên trong tòa nhà do hệ thống sưởi ấm hoặc điều hòa không khí với đơn vị thời gian là một giờ; (2) Quán tính nhiệt theo ngày: biểu diễn mức độ hồi nhiệt trong mùa đông và sự suy giảm nhiệt độ trong mùa hè với đơn vị thời gian là 24 giờ; (3) Quán tính nhiệt theo mùa: biểu diễn sự suy giảm nhiệt độ trong mùa hè với đơn vị thời gian là 12 ngày. Vì vậy, để tăng độ chính xác của mô hình 5R1C, trong bài báo này chúng tôi đề xuất thêm một tụ nhiệt C_h đại diện cho quán tính nhiệt theo giờ của bề mặt lớp tường bên trong tòa nhà, và thay tụ nhiệt C_m bằng tụ nhiệt C_j đại diện cho quán tính nhiệt theo ngày của tòa nhà. Như vậy, về cơ bản thì mô hình cải tiến 5R2C (xem hình 2) có cấu trúc tương tự như mô hình 5R1C, chỉ khác là có thêm một tụ nhiệt C_h nối giữa nút θ_s với đất.

2.2.2. Phương pháp xác định các thông số của mô hình 5R2C

Vì các nhiệt trở (R_{ei} , R_{es} , R_{em} , R_{is} , R_{ms}) trong hai mô hình là như nhau nên phương pháp xác định thông số của các nhiệt trở trong mô hình 5R2C cũng tương tự như trong mô hình 5R1C.

Vấn đề còn lại là làm sao xác định được các thông số của các tụ nhiệt C_j và C_h . Trong mô hình 5R1C, thông số tụ nhiệt được xác định dựa vào tổng diện tích bề mặt trao đổi nhiệt của tòa nhà. Tuy nhiên, trong mô hình 5R2C chúng ta không thể áp dụng công thức tương tự được. Đây là một khó khăn lớn nhất trong quá trình xác định các thông số của mô hình 5R2C. Trong bài báo này, phương pháp thống kê dựa vào hệ số tương quan được đề xuất để xác định các thông số của các tụ nhiệt C_j và C_h . Ý tưởng cơ bản của phương pháp là cho C_j và C_h lần lượt nhận các giá trị khác nhau trong các khoảng giá trị vật lý được xác định trước. Tương ứng với mỗi cặp giá trị (C_j, C_h), ta tính được đường nhiệt độ đầu ra của mô hình. Sau đó ta tiến hành so sánh mức độ tương tự giữa đường nhiệt độ đầu ra của mô hình với đường nhiệt độ thực tế dựa vào hệ số tương quan giữa hai đại lượng này. Hệ số tương quan càng lớn thì mức độ tương tự của đường nhiệt độ đầu ra của mô hình với đường nhiệt độ thực tế càng cao. Như vậy, sau khi kết thúc

các vòng lặp giá trị của C_j và C_h , ta tìm được cặp giá trị (C_j, C_h) có hệ số tương quan cao nhất. Tuy nhiên, tìm được hệ số tương quan cao nhất cũng chưa thể đảm bảo có được cặp thông số (C_j, C_h) tốt nhất, vì hệ số tương quan chỉ xác định được mức độ tương tự của hai đường nhiệt độ, chứ không xác định được mức độ tiệm cận hay trùng khớp giữa hai đường nhiệt độ. Trong khi đó, mục tiêu cuối cùng là xác định cặp thông số (C_j, C_h) sao cho đường nhiệt độ đầu ra của mô hình càng trùng khớp với đường nhiệt độ thực tế càng tốt. Để đo lường mức độ trùng khớp giữa hai đường nhiệt độ, bài báo này đề xuất chỉ số trùng khớp được định nghĩa như sau:

$$f = \frac{r}{d} \quad (1)$$

Trong đó: f là hệ số trùng khớp; r là hệ số tương quan; và d là khoảng cách trung bình giữa hai đường nhiệt độ. Như vậy, theo công thức (1) thì khoảng cách trung bình giữa hai đường nhiệt độ càng nhỏ (hai đường nhiệt độ càng trùng khớp với nhau) thì chỉ số trùng khớp f càng lớn. Cuối cùng, dựa vào hệ số tương quan và chỉ số trùng khớp, ta có thể tìm được cặp giá trị (C_j, C_h) tốt nhất trong không gian tìm kiếm.

2.2.3. Các phương trình nhiệt của mô hình 5R2C

Các phương trình cân bằng nhiệt của mô hình 5R2C được xác định như sau:

$$\phi_i = H_{ei}(\theta_i - \theta_{ei}) + H_{is}(\theta_i - \theta_s) \quad (2)$$

$$\phi_s = H_{ms}(\theta_s - \theta_m) + C_h \frac{d\theta_s}{dt} + H_{es}(\theta_s - \theta_{es}) + H_{is}(\theta_s - \theta_i) \quad (3)$$

$$\phi_m = C_j \frac{d\theta_m}{dt} + H_{em}(\theta_m - \theta_{em}) + H_{ms}(\theta_m - \theta_s) \quad (4)$$

Từ các phương trình cân bằng nhiệt (2) – (4), kết hợp với các phép biến đổi đại số, ta có thể rút ra các phương trình nhiệt của mô hình 5R2C như sau:

$$\theta_i(t) = \frac{\phi_i + H_{ei}\theta_{ei}(t)}{H_{ei} + H_{is}} + \frac{H_{is}}{H_{ei} + H_{is}}\theta_s(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_s(t)}{dt} = A_s\theta_s(t) + B_s\theta_m(t) + \Delta_s(t) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = A_m\theta_s(t) + B_m\theta_m(t) + \Delta_m(t) \quad (7)$$

Trong đó:

$$A_s = -\left[\frac{H_{ms} + H_{es} + H_{is}}{C_h} + \frac{H_{is}^2}{C_h(H_{ei} + H_{is})} \right]$$

$$B_s = \frac{H_{ms}}{C_h}$$

$$\Delta_s(t) = \frac{\phi_s}{C_h} + \frac{H_{es}}{C_h} \theta_{es}(t) + \frac{\phi_i H_{is} + H_{ei} H_{is} \theta_{ei}(t)}{C_h (H_{ei} + H_{is})}$$

$$A_m = \frac{H_{ms}}{C_j}$$

$$B_m = -\frac{H_{em} + H_{ms}}{C_j}$$

$$\Delta_m(t) = \frac{\phi_m + H_{em} \theta_{em}(t)}{C_j}$$

Như vậy với các thông số được ước lượng của mô hình, các biến nhiệt độ $\theta_{ei}(t)$, $\theta_{es}(t)$, $\theta_{em}(t)$ được phân tách từ dữ liệu thời tiết thu thập được, và các nguồn nhiệt ϕ_i , ϕ_s ,

ϕ_m được xác định trước, ta có thể xác định nhiệt độ tại các nút $\theta_i(t)$, $\theta_s(t)$, $\theta_m(t)$ theo các công thức (5) – (7). Tuy nhiên, để xác định nhiệt độ tại nút $\theta_s(t)$ và $\theta_m(t)$, ta phải giải phương trình vi phân (6) và (7). Việc tìm nghiệm giải tích dưới dạng tường minh của các phương trình vi phân trên gặp nhiều khó khăn nên trong bài báo này, phương pháp xấp xỉ Crank–Nicholson được đề xuất để giải các phương trình vi phân trên, vì phương pháp này cho kết quả khá xấp xỉ có độ chính xác cao, ổn định và thời gian giải nhanh.

2.3. Mô phỏng kiểm chứng mô hình 5R2C

Để kiểm chứng tính hiệu quả của mô hình cải tiến 5R2C so với mô hình chuẩn 5R1C, lần lượt các mô hình này được lập trình và mô phỏng trên phần mềm Matlab. Đối tượng mô phỏng là phòng họp nằm ở tầng I, tòa nhà Khoa Kỹ thuật và Công nghệ (KTCN), Trường Đại học Trà Vinh. Phòng họp có bốn bề mặt tường tham gia trực tiếp vào quá trình trao đổi nhiệt. Các thông số vật lý của phòng họp được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số vật lý của phòng họp

| Tường | Góc hướng Bắc [°] | Diện tích tường [m ²] | Diện tích các khung kính [m ²] |
|-----------|-------------------|-----------------------------------|--|
| Bên ngoài | 350 | 25 | 6,2 |
| Bên phải | 260 | 32 | 6,4 |
| Sàn nhà | 0 | 49 | 0 |
| Mái nhà | 0 | 49 | 0 |

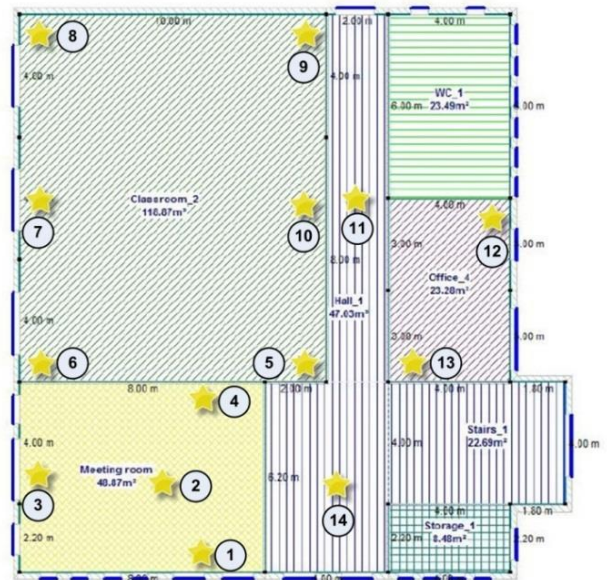
Giá trị của các nhiệt trở trong mô hình 5R2C phụ thuộc vào các thông số vật lý của phòng họp được trình bày trong bảng 1. Dựa vào các thông số vật lý của phòng họp và các công thức tính toán được trình bày trong tài liệu [17], các nhiệt trở của mô hình 5R2C được tính toán và trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số nhiệt trở của mô hình 5R2C

| Nhiệt trở | R _{ei} | R _{es} | R _{em} | R _{is} | R _{ms} |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Giá trị | 0,0150 | 0,0168 | 0,0087 | 0,0025 | 0,0012 |

Ngoài ra, các cảm biến nhiệt độ (loại DHT21) cũng được lắp đặt tại nhiều vị trí khác nhau trong tòa nhà Khoa KTCN để đo lường nhiệt độ thực tế tại các điểm khác nhau

trong tòa nhà. Nhiệt độ bên ngoài tòa nhà được lấy từ dữ liệu thu thập được từ trạm đo thời tiết Weather Station PCE-FWS 20. Sơ đồ bố trí cảm biến được minh họa trong hình 3. Mục đích bố trí cảm biến như trong hình 3 là để nghiên cứu năng lượng tiêu thụ của toàn bộ tòa nhà. Tuy nhiên, trong khuôn khổ bài báo này, đối tượng kiểm chứng chỉ là phòng họp khoa nên chỉ có bốn cảm biến (1, 2, 3, 4) được sử dụng để đo lường nhiệt độ thực tế trong phòng họp (nhiệt độ thực tế trong phòng họp được tính bằng trị trung bình của bốn cảm biến). Các cảm biến được kết nối với nhau qua mạng RS-485 được điều khiển các bởi board mạch Arduino Mega 2560. Dữ liệu nhiệt độ được thu thập và truyền về máy chủ web thông qua board Raspberry Pi. Nhiệt độ thực bên trong phòng họp được thu thập trong suốt hai tuần (từ 25/6/2016 đến 09/7/2016) trong điều kiện không có bật chế độ điều hòa nhiệt độ và không có người trong phòng họp. Thời gian lấy mẫu là một giờ.



Hình 3. Sơ đồ bố trí các cảm biến (hình ngôi sao) tại tầng I, tòa nhà Khoa KTCN

3. Kết quả nghiên cứu

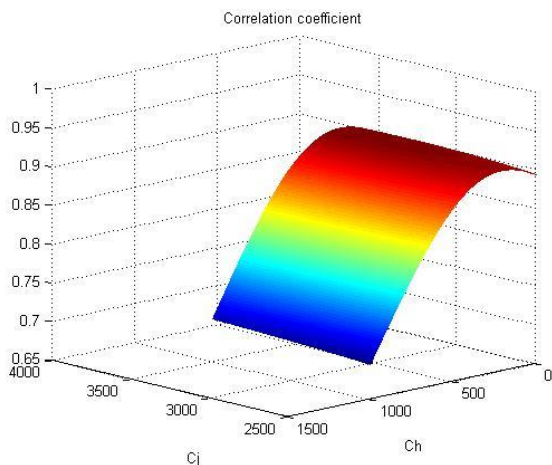
3.1. Kết quả ước lượng các thông số mô hình 5R2C

Sau khi thu thập đầy đủ các dữ liệu thời tiết cần thiết, cùng với các thông số nhiệt dẫn tính toán được, mô hình 5R2C được lập trình và mô phỏng trên phần mềm Matlab để tiến hành ước lượng hai thông số nhiệt dung còn lại của mô hình bằng phương pháp phân tích hệ số tương quan như đã được trình bày trong mục 2.2.2. Kết quả ước lượng các thông số nhiệt dung của mô hình 5R2C được cho như sau: $C_j = 3501$ (JK⁻¹), $C_h = 198$ (JK⁻¹). Kết quả tính toán hệ số tương quan và hệ số trùng khớp của hai mô hình 5R1C và 5R2C được cho trong bảng 3.

Bảng 3. Hệ số tương quan và hệ số trùng khớp của hai mô hình 5R1C và 5R2C

| Mô hình | Hệ số tương quan [r] | Hệ số trùng khớp [f] |
|---------|----------------------|----------------------|
| 5R1C | 0,76 | 0,54 |
| 5R2C | 0,93 | 2,1 |

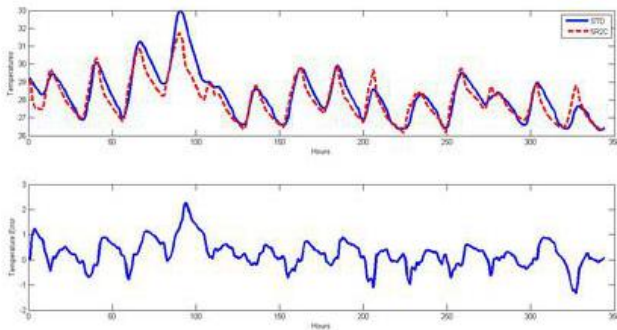
Ngoài ra, kết quả ước lượng thông số nhiệt dung C_j và C_h theo hệ số tương quan còn được biểu diễn trong hình 4.



Hình 4. Hệ số tương quan của hai đại lượng nhiệt dung

3.2. Kết quả mô phỏng mô hình 5R2C

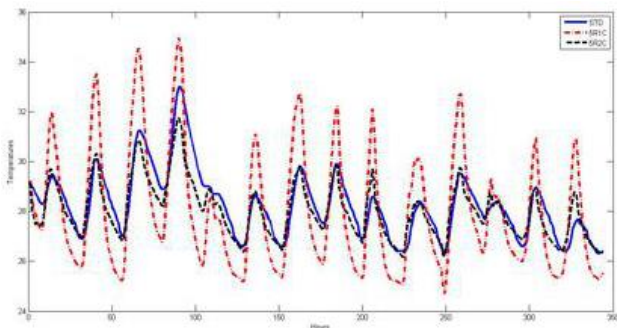
Để có cơ sở kiểm chứng và so sánh, cả 2 mô hình 5R1C và 5R2C được thực thi và mô phỏng trong Matlab.



Hình 5. So sánh mô hình 5R2C với nhiệt độ thực tế

Kết quả mô phỏng nhiệt độ đầu ra của mô hình 5R2C trong khoảng thời gian 2 tuần (344 giờ) được minh họa trong hình 5. Đồ thị ở phía trên trong hình 5 biểu diễn đường nhiệt độ đầu ra của mô hình 5R2C (đường màu đỏ nét đứt khúc "--") và đường nhiệt độ thực tế (đường màu xanh nét liền khúc "-"). Đồ thị phía dưới biểu diễn sai lệch nhiệt độ giữa mô hình 5R2C và nhiệt độ thực tế.

3.3. Kết quả so sánh mô hình 5R1C và mô hình 5R2C



Hình 6. So sánh mô hình 5R1C và 5R2C với nhiệt độ thực tế

Hình 6 biểu diễn các đường nhiệt độ đầu ra của mô hình

5R1C (đường màu đỏ nét đứt khúc "--"), đường nhiệt độ đầu ra của mô hình 5R2C (đường màu đen nét đứt khúc "-."), và đường nhiệt độ thực tế (đường màu xanh nét liền khúc "-").

4. Đánh giá và bàn luận

Từ dữ liệu thực tế đo lường được cho thấy nhiệt độ trong phòng thay đổi từ 26°C – 33°C trong suốt hai tuần. Kết quả mô phỏng ở hình 5 cho thấy đường nhiệt độ của mô hình 5R2C bám khá sát với đường nhiệt độ thực tế. Tuy nhiên, mô hình không bám tốt (sai lệch khoảng 2°C) tại thời điểm giờ thứ 90. Đây là thời điểm nhiệt độ bên ngoài nóng bất thường.

Ngoài ra, tính ưu việt của mô hình 5R2C cũng được thể hiện qua hình 6. Các đồ thị cho thấy mô hình 5R2C bám tốt hơn nhiều so với mô hình 5R1C. Theo kết quả tính toán được cho trong bảng 3 ta thấy cả hệ số tương quan và hệ số trùng khớp của mô hình 5R2C đều lớn hơn so với mô hình 5R1C, điều này chứng tỏ mô hình 5R2C có mức độ tương tự và phù hợp cao hơn mô hình 5R1C. Ngoài ra, độ lệch nhiệt độ chuẩn của mô hình 5R2C ($\sigma = 0,58^\circ\text{C}$) nhỏ gần gấp 3 lần độ lệch nhiệt độ chuẩn của mô hình 5R1C ($\sigma = 1,62^\circ\text{C}$), cho thấy mô hình 5R2C có độ chính xác cao hơn mô hình 5R1C.

5. Kết luận

Như vậy, các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy mô hình cải tiến 5R2C được đề xuất trong bài báo này có độ chính xác cao hơn mô hình chuẩn 5R1C, qua đó cho thấy mô hình 5R2C có thể được áp dụng cho điều khiển dự báo năng lượng trong các tòa nhà tốt hơn so với mô hình 5R1C.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings*, 40 (3), 2008, 394–398.
- [2] Samuel Prívvara, Jiří Cigler, Zdeněk Váňa, Frauke Oldewurtel, Carina Sagerschnig, Eva Záhčeková, "Building modeling as a crucial part for building predictive control", *Energy and Buildings*, 56, Elsevier, 2013, 8-22.
- [3] Y. Zhu, *Multivariable System Identification for Process Control*, Elsevier, 2001.
- [4] María del Mar Castilla, José Domingo Álvarez, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel, "Comfort control in buildings", Springer, 2014.
- [5] Xiwang Li, JinWen, "Review of building energy modeling for control and operation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, Elsevier, 2014, 517–537.
- [6] Daniel Coakley, Paul Raftery, Marcus Keane, "A review of methods to match building energy simulation models to measured data", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, Elsevier, 2014, 123–141.
- [7] Rick Kramer, Josvan Schijndeln, Henk Schellen, "Simplified thermal and hygric building models: A literature review", *Frontiers of Architectural Research*, 1, Higher Education Press, 2012, 318–325.
- [8] Peder Bacher, Henrik Madsen, "Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings", *Energy and Buildings*, 43, Elsevier, 2011, 1511–1522.
- [9] Bruno Bueno, Leslie Norford, Grégoire Pigeon, Rex Britter, "A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate", *Building and Environment*, 54, Elsevier, 2012, 116-125.
- [10] K.J. Kontoleon, "Dynamic thermal circuit modelling with

- distribution of internal solar radiation on varying facade orientations”, *Energy and Buildings*, 47, Elsevier, 2012, 139–150.
- [11] M. G. Davies, “Optimal RC networks for walls”, *Applied Mathematical Modelling*, 6, 1982, 403-404.
- [12] M. J. Jimenez, H. Madsen, “Models for describing the thermal characteristics of building components”, *Building and Environment*, 43, Elsevier, 2008, 152–162.
- [13] D. A. Coley, J. M. Penman, “Second Order System Identification in the Thermal Response of Real Buildings. Paper II: Recursive Formulation for On-line Building Energy Management and Control”, *Building and Environment*, 27, Elsevier, 1992, 269-277.
- [14] Gilles Fraisse, Christelle Viardot, Oliver Lafabrie, Gilbert Achard, “Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy”, *Energy and Buildings*, 34, Elsevier, 2002, 1017–1031.
- [15] Siddharth Goyal, Prabir Barooah, “A method for model-reduction of non-linear thermal dynamics of multi-zone buildings”, *Energy and Buildings*, 47, Elsevier, 2012, 332–340.
- [16] Alfonso P. Ramallo-González, Matthew E. Eames, David A. Coley, “Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions”, *Energy and Buildings*, 60, Elsevier, 2013, 174–184.
- [17] International Organization for Standardization, Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling, 2nd ed, Geneva, ISO; 2008 (ISO 13790:2008, E).
- [18] M. Lauster, J. Teichmann, M. Fuchs, R. Streblow, D. Mueller, “Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale”, *Building and Environment*, 73, Elsevier, 2014, 223 – 231.

(BBT nhận bài: 31/12/2016, hoàn tất thủ tục phản biện: 15/02/2017)