

## ỨNG DỤNG BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI KF VÀO ĐIỀU KHIỂN NHIỆT ĐỘ LÒ NUNG

Phạm Thị Hồng Anh\*, Lê Thị Thu Phương, Bùi Thu Thủy  
 Trường Đại học Công nghệ thông tin & Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

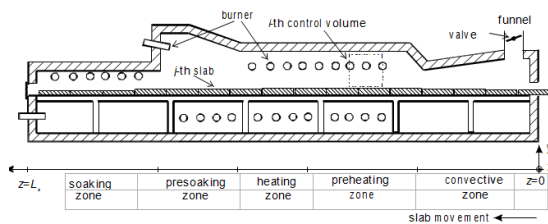
### TÓM TẮT

Với tình trạng ở nước ta hiện nay, một số Nhà máy Cán thép được xây dựng từ những năm 80 cần phải được cải tạo, trong khi công nghệ tự động hóa cùng lý thuyết điều khiển hiện đại ngày càng phát triển vượt bậc, đạt được những thành tựu rực rỡ; nhiệm vụ đặt ra trong điều khiển lò nung là cần phải nâng cao chất lượng các hệ thống điều khiển nhiệt độ để sử dụng hiệu quả nguồn năng lượng trong các nhà máy, xây dựng và hoàn thiện các hệ thống điều khiển cho đối tượng nhiệt nhằm mục đích tối ưu hóa quá trình điều khiển nung kim loại. Quá trình nung thép ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng của quá trình cán, vì vậy lý thuyết điều khiển hiện đại được áp dụng để thiết kế một bộ quan sát trạng thái Kalman (KF) ước lượng nhiệt độ phôi thép và nhiệt độ lò, nhằm phục vụ cho quá trình điều khiển nâng cao chất lượng nung.

**Từ khóa:** bộ quan sát KF, lò nung, điều khiển nhiệt độ, hệ thống điều khiển, Kalman

### ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong sản xuất thép, quá trình nung thép ảnh hưởng chính đến chất lượng đòi hỏi ngày càng cao của quá trình cán. Trong lĩnh vực gia công nhiệt, ta thường giải quyết bài toán điều khiển nhiệt độ trong các lò nung theo một chỉ tiêu nào đó, tuy nhiên chất lượng của các sản phẩm trong quá trình gia công nhiệt lại phụ thuộc vào trường nhiệt độ trong phôi. Vì vậy, lý thuyết điều khiển hiện đại được áp dụng để thiết kế một bộ quan sát trạng thái Kalman (KF) ước lượng nhiệt độ phôi thép và nhiệt độ lò, nhằm phục vụ cho quá trình điều khiển nâng cao chất lượng nung theo chỉ tiêu chất lượng đặt ra mà thông số cần điều khiển không thể dùng sensor đo được.



Hình 1. Bản vẽ sơ đồ mặt cắt của một lò đẩy

### XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ CỦA LÒ NUNG, VẬT NUNG

#### Bài toán

- Bài toán truyền nhiệt từ bên ngoài: từ nhiệt độ của lò ta tính được nhiệt độ của mặt vật,

tùy theo dạng truyền nhiệt là đối lưu hay bức xạ, tuy nhiên trong trường hợp này sự truyền nhiệt chủ yếu do bức xạ, còn sự truyền nhiệt đối lưu ta sẽ tính đến bằng hệ số hiệu chỉnh.

- Bài toán truyền nhiệt trong thỏi: là sự truyền nhiệt từ bên ngoài vào các lớp bên trong thỏi. Sự truyền nhiệt ở đây chủ yếu do dẫn nhiệt.

Từ phương trình truyền nhiệt:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - bv \frac{\partial Q}{\partial y} \quad (2.1)$$

Nếu giả sử có thể bỏ qua sự truyền nhiệt qua các đầu mặt cạnh thỏi và phương trình truyền nhiệt là đơn hướng ta có hệ phương trình vi phân sau:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

Với điều kiện đầu  $Q(x,0) = \varphi(x,0)$ ;  $y = \text{const}$  (chưa xét tới sự chuyển động của phôi nung) và các điều kiện biên truyền nhiệt bên ngoài từ lò tới mặt vật.

Ta xét khi nung phôi một mặt:

$$-\lambda \frac{\partial Q}{\partial x} \Big|_s = C_1 \left[ \frac{\beta_{sp}}{\beta_m} \left( \frac{u(t) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{Q_1 + 273}{100} \right)^4 \right] - \alpha_{kl}(u(t) - Q_1)$$

$$\lambda \frac{\partial Q}{\partial x} \Big|_0 = 0 \quad (2.3)$$

Trong đó:

$\beta_{sp}, \beta_m$  - Các hệ số ghi ảnh hưởng hấp thụ, bề mặt các vật thể tham gia truyền nhiệt và ảnh hưởng của cách hệ số góc  $\beta_{sp} / \beta_m = 1$ .

\* Tel: 0987 229580, Email: lttphuong@ictu.edu.vn

u(t) - nhiệt độ lò thay đổi theo thời gian.  
 x hướng thẳng đứng theo chiều dày thỏi.  
 l chiều dài của thỏi.

Q là nhiệt độ của kim loại và là hàm của x và t.  
 $C_1$  hệ số bức xạ của tường lò.

$\alpha_{k1}$  hệ số truyền nhiệt đối lưu  $[w(m^2)^{-1}c^{-1}]$ .

$Q_1$  nhiệt độ bề mặt thỏi.

Hệ số truyền nhiệt tổng cộng vùng sấy.

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{bx} + \alpha_{dl} = 1.1.135,8 = 149,38w / m^2 K$$

Hệ số truyền nhiệt tổng cộng vùng nung.

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{bx} + \alpha_{dl} = 1,1.175,9 = 193,5w / m^2 K$$

$Q_1$  - Nhiệt độ bề mặt thỏi ( $^0C$ )

$C_n$  - Hệ số bức xạ quy dẫn trong không gian nung. Có thể xác định theo công thức Timofeev:

$$c_n = \frac{\varepsilon_m \left[ \frac{F_m}{F_s} (1 - \varepsilon_p) \right]}{\frac{F_m(1 - \varepsilon_p)}{F_s \varepsilon_p} [\varepsilon_m + \varepsilon_p (1 - \varepsilon_m)] + 1} \quad (2.4)$$

$$= 5,7 \frac{0,8(1 - 0,178 + 2,25)}{1 - 0,178 [0,8 + 0,178(1 - 0,8)]} = 2,29 [w(m^2)^{-1} K^{-1}]$$

Trong đó:  $F_m, F_s$  - Diện tích mặt bức xạ là tường lò  $[m^2]$ .

$E_m, E_p$  - Độ đen của vật liệu và khí.

Giả thiết thể tích buồng lò nhỏ, coi nhiệt độ trong lò là như nhau và bỏ qua sự truyền nhiệt qua các cạnh của tấm kim loại phẳng có bề rộng đủ lớn so với các kích thước cạnh. Tiến hành nung vật một phía, chia phôi nung làm 3 lớp. Ta có các ký hiệu thông số của phôi như sau:

Hệ số dẫn nhiệt của tấm  $\lambda : w / m.K$ .

Hệ số truyền nhiệt của tấm  $\alpha : w / m^2$ .

Chiều dài a: m.

Chiều rộng b: m.

Chiều cao h: m.

Khối lượng riêng  $\rho : kg / m^3$ .

Nhiệt dung riêng c: j.kg/K.

Diện tích bề mặt tiếp xúc  $F = a.b : m^2$ .

Xấp xỉ đối tượng (lò-vật nung) trong không gian n chiều theo bề dày tấm sẽ đưa về vi

phân thường, bề dày tấm được chia thành n lớp có hệ phương trình vi phân thường

$$\begin{cases} Q_0 = \frac{a}{s^2} \frac{\beta}{2 + \beta} u + \frac{a}{s^2} \frac{\beta}{2 + \beta} Q_1 \\ \frac{dQ_1}{dt} = \frac{a}{s^2} 2Q_0 - \frac{a}{s^2} 3Q_1 + \frac{a}{s^2} Q_2 \\ \frac{dQ_i}{dt} = \frac{a}{s^2} Q_{i-1} - \frac{a}{s^2} 2Q_i + \frac{a}{s^2} Q_{i+1} \\ \frac{dQ_n}{dt} = \frac{a}{s^2} Q_{n-1} - \frac{a}{s^2} Q_n \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{dQ_1}{dt} = \frac{a}{s^2} \frac{2\beta}{2 + \beta} u - \frac{a}{s^2} \frac{2 + 3\beta}{2 + \beta} Q_1 + \frac{a}{s^2} Q_2 \\ \frac{dQ_i}{dt} = \frac{a}{s^2} Q_{i-1} - \frac{a}{s^2} 2Q_i + \frac{a}{s^2} Q_{i+1} \\ \frac{dQ_n}{dt} = \frac{a}{s^2} Q_{n-1} - \frac{a}{s^2} Q_n \end{cases} \quad (2.5)$$

Trong đó :  $\beta = \frac{\alpha s}{\lambda}$ ;  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ ;  $s = \frac{h}{3}$

Từ đó ta suy ra khi nung vật với  $n = 3$  ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \dot{Q}_1 = \frac{a}{s^2} \frac{\beta}{2 + \beta} u + \frac{a}{s^2} \frac{2}{2 + \beta} Q_1 \\ \dot{Q}_2 = \frac{a}{s^2} Q_1 - 2 \frac{a}{s^2} Q_2 + \frac{a}{s^2} Q_3 \\ \dot{Q}_3 = \frac{a}{s^2} Q_2 - \frac{a}{s^2} Q_3 \end{cases} \quad (2.6)$$

Từ hệ vi phân thường ta chuyển sang không gian trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A \underline{x} + B \underline{x} \\ \underline{y} = C \underline{x} \end{cases} \quad (2.7)$$

Đặt  $X_1 = T_1, X_2 = T_2, X_3 = T_3$

Ta có ma trận A, B, C như sau:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2 + 3\beta}{2 + \beta} \frac{a}{s^2} & \frac{a}{s^2} & 0 \\ \frac{a}{s^2} & -2 \frac{a}{s^2} & \frac{a}{s^2} \\ 0 & \frac{a}{s^2} & -\frac{a}{s^2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{a}{s^2} \frac{2 + 3\beta}{2 + \beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

**Xây dựng bộ quan sát trạng thái Kalman Filter**  
**Bộ lọc Kalman**

Lọc Kalman là một thuật toán ước lượng trạng thái tối ưu, nó có thể tính toán nhiều từ việc liên kết giữa thiết bị đo và mô hình. Bộ

lọc Kalman được giới thiệu năm 1958 bởi Rudolf E. Kalman ứng dụng tốt bởi sự phát triển nhanh của các thiết bị tính toán

Một đặc điểm của bộ lọc Kalman là không phải hiện tại mà là dự đoán trước, nên nó có khả năng điều chỉnh thông số của chính nó một cách tự động theo việc thống kê các giá trị đo và theo sự chính xác của các thông số trạng thái hiện tại.

Mục đích của bộ lọc Kalman là ước lượng trạng thái chính xác bằng cách tối thiểu hoá

$$\text{hàm mục tiêu: } \lim_{t \rightarrow \infty} \{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\} = \sum_{i=1}^n M \quad (2.11)$$

Trong đó  $M\{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\}$  là hàm tương quan của sai lệch ước lượng.

Như vậy bộ lọc Kalman hoạt động như một bộ điều chỉnh phản hồi trạng thái tối ưu, ở đó hệ số phản hồi được điều chỉnh sau mỗi vòng lặp để đảm bảo sai lệch trạng thái là nhỏ nhất theo một tiêu chuẩn tối ưu định trước. Bộ ước lượng trạng thái Kalman có tính đến nhiễu trắng vì vậy rất chính xác và bền vững.

Điều khiển phản hồi trạng thái cho chất lượng điều chỉnh tốt, nhưng các trạng thái không phải lúc nào cũng đo được hoặc phải tốn rất nhiều sensor. Do đó hiện nay có phương pháp ước lượng trạng thái của hệ thống bằng cách dùng các bộ quan sát trạng thái.

Mô hình của bộ quan sát Kalman:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (2.12)$$

Tìm ma trận L để sao cho phiếm hàm Q sau đạt cực tiểu. Thuật toán xác định ma trận hệ số bộ lọc L hoàn toàn giống như việc thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái (bài toán LQR), trong đó vai trò của đối tượng này được thay bằng:

$$\frac{dx}{dt} = A^T x + C^T u \quad (2.13)$$

tức là hệ đối ngẫu với nó nhưng không có nhiễu, và hàm mục tiêu thì được thay bởi:

$$Q_k = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T N_x x + u^T N_y u) dt \quad (2.14)$$

Từ đây có thuật toán thiết kế bộ quan sát Kalman gồm các bước:

-Xác định ma trận  $N_x$  và  $N_y$  là ma trận hàm tương quan của  $n_x(t)$  và  $n_y(t)$ .

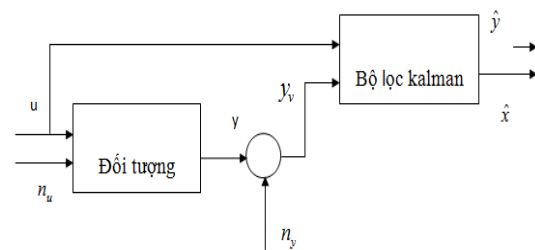
-Thiết kế bộ điều khiển phản hồi âm L cho bộ quan sát

-Thay L tìm được vào để có bộ quan sát.

Trong đó bộ quan sát được xây dựng như một mô hình của hệ thống. Tín hiệu ra của mô hình được so sánh với tín hiệu đo về từ thiết bị đo, qua hệ số quan sát phản hồi lại làm cho tín hiệu quan sát chính xác hơn với tín hiệu thực.

### Thuật toán bộ quan sát trạng thái dùng bộ lọc Kalman

Mô hình bộ lọc tín hiệu Kalman để ước lượng trạng thái có tác động của nhiễu trắng như sau:



Hình 2. Mô hình tổng quát bộ quan sát trạng thái kalman

### Thông số bộ lọc và tinh chỉnh:

Trong thực tế thực hiện bộ lọc, hệ số nhiễu đo lường  $N_y$  thường được biết trước. Việc đo sai lệch đo lường  $N_y$  là có thể làm được bởi vì tiện thể có đo tín hiệu ra trong quá trình bộ lọc hoạt động. Nếu có thể dùng sensor đo tín hiệu đo này để đo thử nghiệm vài lần và tính ra được  $N_y$ .

Việc xác định hệ số nhiễu quá trình  $N_u$  là rất khó khăn, do đó thông thường trong hệ thống đơn giản không yêu cầu cao có thể chọn giá trị này.

Như vậy, nếu tính toán được phương sai của nhiễu  $N_u, N_y$  trong quá trình hoạt động thì bộ lọc Kalman có khả năng tự chỉnh định hệ số bộ lọc. Khi đó bộ lọc gọi là bộ lọc Kalman thích nghi.

Phương trình trạng thái cho bộ quan sát:

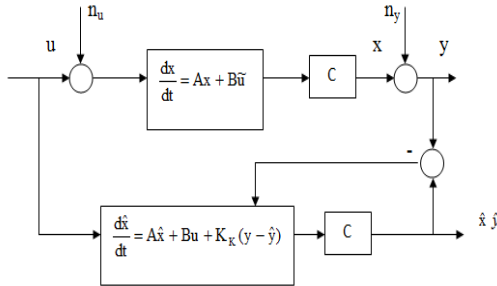
$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_K (y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$K_K = PC^T N_y^{-1s}$$

Ở đây: P là ma trận nghiệm của phương trình Riccati

$$PC^T N_y^{-1} CP - PA^T - AP = N_u \quad (2.16)$$

$N_u, N_y$  là phương sai tín hiệu nhiễu quá trình và nhiễu đo lường.

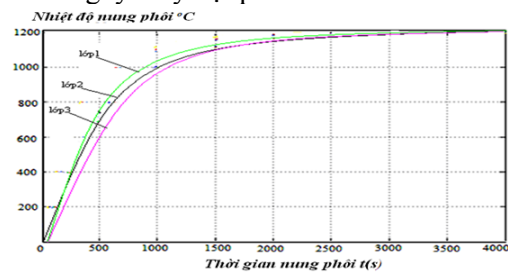


**Hình 3.** Hệ thống điều khiển có sự tham gia của bộ quan sát trạng thái kalman

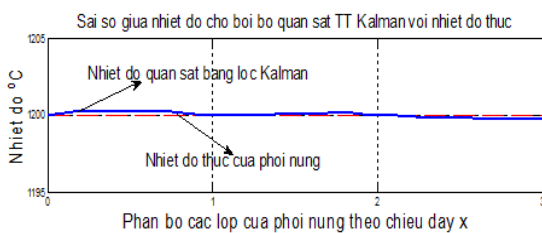
**Mô phỏng quan sát nhiệt độ vật nung**

**Đặc tính đường nhiệt:**

Sơ đồ nguyên lý bộ quan sát như sau:



**Hình 4.** Nhiệt độ các lớp phôi Đường thể hiện sai số giữa nhiệt độ của vật và qua bộ quan sát:



**Hình 5.** Độ chênh lệch nhiệt độ giữa khâu quan sát và nhiệt độ thực các lớp

**KẾT LUẬN**

Bài báo này đưa ra ứng dụng bộ ước lượng trạng thái KF vào mô hình lò thực tế với các nhiễu tác động. Ta thấy sự chênh lệch nhiệt độ giữa nhiệt độ thực của vật và qua bộ quan sát có sai số nhiệt độ không vượt qua giới hạn cho phép là 0,5°C, vậy bộ quan sát thiết kế đạt yêu cầu bài toán đặt ra. Nên có thể sử dụng bộ quan sát này trong thực tế dự báo cho nhiệt độ của các lớp trong phôi thép và nhiệt độ lò.

Bài báo là sản phẩm của đề tài có mã số T2016-07-25 được tài trợ bởi kinh phí của trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – Đại học Thái Nguyên.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước, (2006) *Lý thuyết điều khiển mờ*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật.
2. Nguyễn Như Hiền, Lại Khắc Lãi, *Hệ mờ và noron trong kỹ thuật điều khiển*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và công nghệ – 2007.
3. Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật – 2004.
4. Đặng Văn Đào, Lê Văn Doanh, *Các phương pháp hiện đại trong nghiên cứu, tính toán thiết kế kỹ thuật điện*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật – 2001
5. Nguyễn Văn Hoà, *Cơ sở lý thuyết điều khiển tự động*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật – 2005.
6. Phạm Công Ngô, *Lý thuyết điều khiển tự động*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật – 1999.
7. Identification and Model Predictive control of a Slab Reheating Furnace; processdings of the 2002 IEEE international conference on control applications. Setember 18–20, 2002, Glasgow, Scotland, UK.

## SUMMARY

**APPLICATION OF THE KF OBSERVERS AT THE FURNACE TEMPERATURE CONTROL****Pham Thi Hong Anh, Le Thi Thu Phuong\*, Bui Thu Thuy***College of Information & Communication Technology - TNU*

Steel roasting process influence the quality of the growing demands of the rolling process, so modern control theory is applied to design a state observer Kalman (KF) to estimate the temperature of billet and oven temperature, to serve process improve quality control firing. With some state steel mill was built 80 years in our country where automation technology and modern control theory boom achieve brilliant achievements. Challenging task in the furnace control is needed to improve the quality of the temperature control system for efficient use of energy resources in the factories. Building and improve the control system for thermal object aims to optimize the firing process control metal

**Key words:** *energy audits, lighting, buildings, smc Vietnam, Kalman*

---

\* Tel: 0987 229580, Email: [ltphuong@ictu.edu.vn](mailto:ltphuong@ictu.edu.vn)

