

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Во многих отраслях промышленности, химической, деревообрабатывающей и других используется энергоемкое сушильное оборудование, в котором затраты на тепло и электроэнергию становятся сопоставимыми с затратами на сырье. Основными особенностями этого оборудования как объектов оптимального управления являются большая потребляемая мощность, использование нескольких управляющих воздействий, поддержание температуры и влажности на заданном уровне за счет регулирования подачи сухого, влажного пара и приточно-вытяжной вентиляцией, жесткие требования к выполнению технологического регламента, многостадийность процесса [1].

Весь процесс сушки состоит из пяти фаз (стадий): подготовка, прогрев, сушка, выдержка, охлаждение. Самой энергоемкой, продолжительной и наиболее сложной с точки зрения оптимального управления является третья стадия сушки.

Для оптимального управления процессом требуется идентифицировать модель динамики. Основными требованиями к модели динамики являются ее адекватность реальным процессам в сушильной камере и возможность использования для оперативного решения задач анализа и синтеза оптимального управления. Для обеспечения требуемой точности в модели должны учитываться:

- взаимное влияние температурно-влажностных режимов при каждом управляющем воздействии;
- зависимость параметров модели от температуры, влажности и равновесной влажности;
- оперативный переход на новые режимы сушки при смене типа древесины;
- влияние влажностных и температурных режимов на качество продукции и продолжительность технологического процесса.

Третья стадия сушки состоит из трех повторяющихся режимов, характеризующихся использованием определенных управляющих воздействий:

$$R_1 = (u_1, u_3), \quad R_2 = (u_2), \quad R_3 = (u_3), \quad (1)$$

где  $u_1, u_2, u_3$  – управления соответственно сухим паром, влажным паром и приточно-вытяжной вентиляцией.

Компонентами вектора фазовых координат:

$$z = (T \ W \ W_p)^T \quad (2)$$

являются температура ( $T$ ), влажность ( $W$ ) и равновесная влажность ( $W_p$ ).

В общем случае для разных режимов  $R_i, i = 1, 2, 3$ , модель динамики сушки может быть представлена системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [2]

$$\dot{z} = \begin{cases} Az(t) + B_1 u_1(t) + B_3 u_3(t), & \text{если } R = R_1, \\ \bar{A}z(t) + \bar{B}_2 u_2(t), & \text{если } R = R_2, \\ \tilde{A}z(t) + \tilde{B}_3 u_3(t), & \text{если } R = R_3, \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\begin{cases} \dot{T} = a_{11}T(t) + a_{12}W(t) + a_{13}W_p(t) + b_{11}u_1(t) + b_{13}u_3(t) \\ \dot{W} = a_{21}T(t) + a_{22}W(t) + a_{23}W_p(t) + b_{21}u_1(t) + b_{23}u_3(t) \\ \dot{W}_p = a_{31}T(t) + a_{32}W(t) + a_{33}W_p(t) + b_{31}u_1(t) + b_{33}u_3(t) \end{cases}, \text{ при } R = R_1, \quad (3a)$$

$$\begin{cases} \dot{T} = \bar{a}_{11}T(t) + \bar{a}_{12}W(t) + \bar{a}_{13}W_p(t) + \bar{b}_{12}u_2(t) \\ \dot{W} = \bar{a}_{21}T(t) + \bar{a}_{22}W(t) + \bar{a}_{23}W_p(t) + \bar{b}_{22}u_2(t) \\ \dot{W}_p = \bar{a}_{31}T(t) + \bar{a}_{32}W(t) + \bar{a}_{33}W_p(t) + \bar{b}_{32}u_2(t) \end{cases}, \text{ при } R = R_2, \quad (3б)$$

$$\begin{cases} \dot{T} = \tilde{a}_{11}T(t) + \tilde{a}_{12}W(t) + \tilde{a}_{13}W_p(t) + \tilde{b}_{13}u_3(t) \\ \dot{W} = \tilde{a}_{21}T(t) + \tilde{a}_{22}W(t) + \tilde{a}_{23}W_p(t) + \tilde{b}_{23}u_3(t) \\ \dot{W}_p = \tilde{a}_{31}T(t) + \tilde{a}_{32}W(t) + \tilde{a}_{33}W_p(t) + \tilde{b}_{33}u_3(t) \end{cases}, \text{ при } R = R_3, \quad (3в)$$

где  $a_{ij}, b_{ik}, \bar{a}_{ij}, \bar{b}_{ik}, \tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_{ik}$  – параметры модели для  $i$ -го уравнения при  $j$ -ой фазовой координате и  $k$ -м управляющем воздействии,  $i, j, k \in \{1, 2, 3\}$ .

Задача идентификации модели динамики сушильной камеры является одним из наиболее сложных этапов при проектировании систем автоматического управления динамическими энергоемкими системами. Наибольшую сложность при идентификации представляет оценка параметров для модели с несколькими управляющими воздействиями и фазовыми координатами. Решение такого рода задач рассмотрим применительно к конкретной сушильной камере. В роли объекта изучения рассмотрена сушильная установка «Hudromat», применяющаяся в технологическом процессе в Тамбовском ОАО

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Ю.Л. Муромцева.

«Тамак». В результате проведенных исследований были получены термограммы для всех режимов. В качестве примера рассмотрим дифференциальное уравнение для режима R<sub>1</sub>, которое учитывает влияние управляющих воздействий на скорость изменения температуры:

$$\dot{T} = a_{11}T(t) + a_{12}W(t) + a_{13}W_p(t) + b_{11}u_1(t) + b_{13}u_3(t). \quad (5)$$

От непрерывной модели объекта (5) перейдем к дискретной:

$$\tilde{T}(j+1) = \alpha_1 T(j) + \alpha_2 W(j) + \alpha_3 W_p(j) + \beta_1 U_1(j) + \beta_3 U_3(j). \quad (6)$$

Найдем параметры модели, применяя метод наименьших квадратов:

$$Q = \sum (\tilde{T}(j+1) - T(j+1))^2 = \sum (\alpha_1 T_j + \alpha_2 W_j + \alpha_3 W_{pj} + \beta_1 U_{1j} + \beta_3 U_{3j})^2, \quad \frac{\partial Q}{\partial \alpha_1} = 0, \quad (7)$$

или

$$\left( \begin{array}{l} \alpha_1 \sum T_j^2 + \alpha_2 \sum TW + \alpha_3 \sum TW_p + \beta_1 \sum TU_1 + \beta_3 \sum TU_3 = \sum T_j T_{j+1} \\ \alpha_1 \sum WT + \alpha_2 \sum W^2 + \alpha_3 \sum WW_p + \beta_1 \sum WU_1 + \beta_3 \sum WU_3 = \sum W_j T_{j+1} \\ \alpha_1 \sum W_p T + \alpha_2 \sum W_p W + \alpha_3 \sum W_p^2 + \beta_1 \sum W_p U_1 + \beta_3 \sum W_p U_3 = \sum W_{pj} T_{j+1} \\ \alpha_1 \sum U_1 T + \alpha_2 \sum U_1 W + \alpha_3 \sum U_1 W_p + \beta_1 \sum U_1^2 + \beta_3 \sum U_1 U_3 = \sum U_{1j} T_{j+1} \\ \alpha_1 \sum U_3 T + \alpha_2 \sum U_3 W + \alpha_3 \sum U_3 W_p + \beta_1 \sum U_3 U_1 + \beta_3 \sum U_3^2 = \sum U_{3j} T_{j+1} \end{array} \right),$$

где, к примеру,  $\sum TW = \sum_{j=1}^{N-1} T(j)W(j)$ ,  $\sum T_j T_{j+1} = \sum_{j=1}^{N-1} T(j)T(j+1)$ ,

$N$  – число значений.

Полученные параметры модели приведены в таблице.

| $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\beta_1$ | $\beta_3$ |
|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| 0,739      | -0,244     | 2,378      | -1,583    | 3,745     |

С учетом рассчитанных параметров запишем (5) в следующем виде:

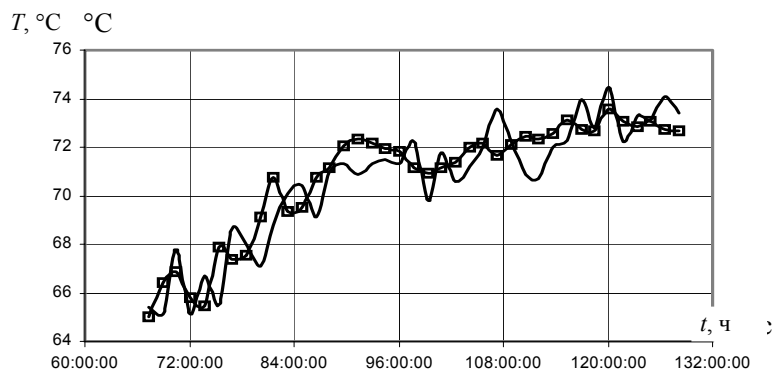
$$\dot{T} = 0,739T(t) - 0,244W(t) + 2,378W_p(t) - 1,583u_1(t) + 3,745u_3(t). \quad (8)$$

Максимальная погрешность температуры, определяемая из условия

$$\max\{|\tilde{T}(j+1) - T(j+1)|\} \leq \Delta T, \quad j = 1 \dots N-1, \quad (9)$$

где  $\Delta T$  – допустимая абсолютная погрешность, составила 1,82 °С, что не превышает допустимую.

Полученные термограммы приведены на рис. 1.



**Рис. 1** Расчетная и экспериментальная кривые термограмм на переходной фазе сушки (65...75 °C):

—

—■—

### Выводы

Разработана модель динамики сушильной камеры в виде системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, отличающаяся тем, что в ней используются три вида управляющих воздействий: расход сухого пара, расход влажного пара и приточно-вытяжная вентиляция.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кречетов И.В. Сушка древесины. М.: Госэнергоиздат, 1987. 466 с.
- 2 Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П., Муромцев Д.Ю. Информационные технологии энергосберегающего управления динамическими режимами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 7. С. 13 – 16.

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»*