УДК 519.9

В.П. Кобринец, доц., канд. техн. наук;
О.Г. Барашко, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

СТАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В БАРАБАННОЙ СУШИЛКЕ

Процесс сушки концентрата KCl в барабанной сушилке по группам действующих на него параметров можно представить следующей схемой (рисунок 1)

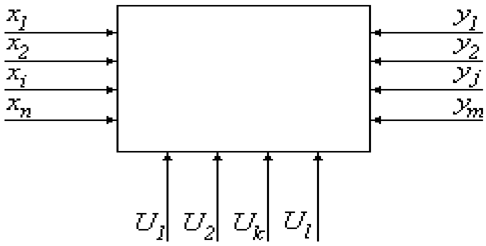

Рисунок 1 – Структурная схема ХТП

где $x_1, ..., x_n$ – входные контролируемые параметры, $U_1, ..., U_n$ – управляемые параметры, $y_1, ..., y_m$ – выходные параметры, которые являются суммарным действием входных и управляемых параметров.

Статическая оптимизация заключается в определении нового наилучшего состояния объекта, если это вызывается необходимостью при изменении вектора входных параметров.

Сформируем критерий оптимизации для данного процесса:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x, U_1, U_2) \to \max \\ y_2 = f_2(x, U_1, U_2) \to y_{2\text{зад}} \\ U_{1\min} \le U_1 \le U_{1\max} \\ U_{2\min} \le U_2 \le U_{2\max} \\ X_{\mathrm{i}\min} \le X \le X_{i\max} \end{cases} \quad (1)$$

где y_1 – температура высушенного материала, y_2 – температура отходящих газов, U_1 – расход газа, U_2 – температура в камере смешения, x – расход материала

Решение задачи оптимизации будем искать в виде:

$$U_{1\text{опт}} = U_1^*(x) \quad (2)$$

$$U_{2\text{опт}} = U_2^*(x) \quad (3)$$

Для реализации алгоритма оптимизации необходима разработка статической модели процесса.

В условиях действующего промышленного процесса сушки целесообразно получение модели статики (уравнение регрессии) при пассивном эксперименте с применением метода регрессионного анализа в матричной форме.

Представим исходный статистический материал в матричной форме. Будем называть матрицу

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{012} & \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & \dots & x_{kN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

матрицей независимых переменных, а матрицу-столбец

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

вектором наблюдений, Введем матрицу-столбец коэффициентов

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

Вектор-столбец коэффициентов *B* (6) определяется следующим образом:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

Для оценки адекватности уравнения регрессии используется неравенство:

$$F_p = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} \geq F_T(g, f_1, f_2) \quad (8)$$

где F_P и F_T – расчетное и табличное значения критерия Фишера.

Для определения модели статики барабанной сушилки принимаем следующее нелинейное уравнение регрессии

$$y_{j,x} = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i {}_1 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i^2 {}_1 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i x_j \quad (9)$$

где: y_1 – температура материала на выходе; y_2 – температура отходящих газов; x_1 – расход газа; x_2 – расход материала; x_3 – температура в камере смешивания.

Данные, полученные в ходе эксперимента составили 120 опытов. С учетом динамических свойств объекта и независимости величин y_i в опытах время между опытами принято 30 мин.

Для нахождения коэффициентов уравнения статики по формуле (9) использовался математический пакет Matlab.

Уравнение регрессии относительно y_1 имеет вид:

$$y_1 = 76.04 + 0.0895x_1 + 0.219x_2 + 0.227x_3 - 3.113 \cdot 10^{-5} x_1^2 - 0.000635x_2^2 - 0.00037x_3^2 - 0.0008885x_1x_2 + 8.242 \cdot 10^{-5} x_1x_3 + 0.00116x_2x_3 \quad (10)$$

Проверку уравнения на адекватность проведем с использованием соотношения (1).

Табличное значение критерия Фишера $F_т = 1.2238$.

Вычисленное значение $Fр = 5.41$

Сравнивая два этих значения на основании (1) приходим к выводу, что уравнение регрессии (10) является адекватным.

Уравнение регрессии относительно y_2 примет вид

$$y_2 = -46.3458 - 0.05x_1 + 3.726x_2 + 0.567x_3 - 2.059 \cdot 10^{-5}x_1^2 + 0.0086x_2^2 - 0.0005x_3^2 - 0.00316x_1x_2 + 0.00023x_1x_3 - 0.003x_2x_3 \quad (11)$$

Проверку уравнения на адекватность проведем также с использованием соотношения (8).

Табличное значение критерия Фишера $F_т = 1.2238$.

Вычисленное значение равняется $F_р = 5.857$.

На основании (8) приходим к выводу, что уравнение регрессии является адекватным.

Для реализации алгоритма оптимального управления воспользуемся пакетом Optimization Toolbox, входящим в состав математического пакета MatLab.

Optimization Toolbox позволяет решать ряд оптимизационных задач, в которых минимизируемая функция нелинейна, и к линейным ограничениям добавляются нелинейные.

$$\min f(x) \text{ или } \max -f(x) \quad (12)$$

Наличие ограничений задаются в виде

$$Ax \le b \quad (13)$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (14)$$

$$lb \le x \le ub \quad (15)$$

Общая постановка задачи нелинейного программирования такова: требуется разыскать (10) среди всех векторов x, удовлетворяющих системе линейных ограничений (13-15) и дополнительных неравенств и равенств

$$c(x) \le 0;\ c_{eq}(x) = 0 \quad (16)$$

Решение поставленной задачи производится при помощи функции fmincon.

В данном случае она имеет вид:

$$x = fmincon\,(fun, x0, \mathrm{A}, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (17)$$

Составлена и реализована программа статической оптимизации процесса сушки. В результате, на основании критерия оптимизации (1) и математической модели (10, 11) получены следующие оптимальные значения управляющих параметров $U_{1опт}$ и $U_{2опт}$, значения которых приведены в таблице.

Таблица

x, т	$U_{1опт}, \frac{м^3}{ч}$	$U_{2опт}$, °C
50	874.74	519.4
60	895.8	521.7
70	922.23	524.5