УДК 66.047

ОЦЕНКА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУШИЛЬНОЙ ПЕЧИ КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЯЩЕГО СЛОЯ СУЛЬФИТА МАГНИЯ

♦♦♦♦♦

ASSESSMENT OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF A DRYING OVEN AS AN OBJECT FOR REGULATING THE TEMPERATURE OF A FLUIDIZED BED OF MAGNESIUM SULFITE BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Нестеров Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры теплоэнергетики и теплотехники,
Кубанский государственный технологический университет
nesterov@kubstu.ru

Клименко Роман Максимович
студент,
Кубанский государственный технологический университет
roman.klimenko.02@bk.ru

Аннотация. По значениям коэффициентов передаточной функции сушильной печи, полученной экспериментально по каналу «расход топливного газа – температура кипящего слоя сульфита магния», установлено, что печь эквивалентна двум последовательно соединенным типовым колебательным звеньям. Вследствие этого определены оценки ее динамических свойств в виде постоянных времени и коэффициентов затухания. Их значения найдены в результате решения системы уравнений, связывающих динамические параметры сушильной печи с коэффициентами ее передаточной функции.

Ключевые слова: сушильная печь, передаточная функция, параметрическая идентификация, кривая разгона.

Nesterov Sergej Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Thermal Power Engineering
and Thermal Engineering,
Kuban State University of Technology
nesterov@kubstu.ru

Klimenko Roman Maksimovich
Student,
Kuban State University of Technology
roman.klimenko.02@bk.ru

Annotation. Based on the values of the coefficients of the transfer function of the drying furnace, obtained experimentally via the channel «fuel gas consumption – temperature of the fluidized bed of magnesium sulfite», it was established that the furnace is equivalent to two serially connected typical oscillatory units. As a result, estimates of its dynamic properties were determined in the form of time constants and damping coefficients. Their values were found by solving a system of equations linking the dynamic parameters of the drying furnace with the coefficients of its transfer function.

Keywords: drying oven, transfer function, parametric identification, response curve.

Динамические свойства сушильной печи (СП) по каналу «расход топливного газа – температура кипящего слоя сульфита магния» описываются обыкновенным дифференциальным уравнением четвертого порядка:

$$a_4 \frac{d^4\theta(t)}{dt^4} + a_3 \frac{d^3\theta(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = bB(t), \quad (1)$$

где θ – температура кипящего слоя сульфита магния в СП; *B* – расход топливного газа; $a_1 \div a_4$; *b* – коэффициенты, связанные с физическими параметрами СП.

В работе [1] динамические свойства данной установки представлены соответствующей дифференциальному уравнению (1) передаточной функцией:

$$\frac{\theta(s)}{B(s)} = \frac{b}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (2)$$

(здесь s – оператор преобразования Лапласа), а также методом площадей определены значения ее коэффициентов $a_1 \div a_4$ по экспериментальной разгонной характеристике СП, которая представляет собой кривую изменения во времени температуры сульфита

магния в кипящем слое $\theta(t)$, полученную вследствие ступенчатого изменения расхода топливного газа на ΔB. Там же традиционным методом определено значение коэффициента *b*.

В результате описанных действий передаточная функция (2) СП принимает вид [1]:

$$\frac{\theta(s)}{B(s)} = \frac{1{,}235}{2{,}47\cdot 10^{8}s^{4} + 4{,}17\cdot 10^{6}s^{2} + 5{,}41\cdot 10^{4}s^{2} + 3{,}62\cdot 10^{2}s + 1}. \quad (3)$$

Однако, она не позволяет в явном виде получить оценки динамических свойств (параметров) СП.

При таких значениях коэффициентов $a_1 \div a_4$ знаменатель передаточной функции (3) – характеристическое уравнение:

$$2{,}47\cdot 10^{8}s^{4} + 4{,}17\cdot 10^{6}s^{2} + 5{,}41\cdot 10^{4}s^{2} + 3{,}62\cdot 10^{2}s + 1 = 0 \quad (4)$$

имеет две пары комплексных сопряженных корней с отрицательными действительными частями:

$$s_{1;2} = -5{,}292\cdot 10^{-3} \pm j2{,}508\cdot 10^{-3}; \quad (5)$$

$$s_{3,4} = -3{,}150\cdot 10^{-3} \pm j0{,}010. \quad (6)$$

Очевидно, что в этом случае передаточная функция (2) СП может быть приведена к традиционному (типовому) виду:

$$\frac{\theta(s)}{B(s)} = \frac{k}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}, \quad (7)$$

где *k* – коэффициент передачи СП; $T_1; T_2$ – постоянные времени СП; $\xi_1; \xi_2$ – коэффициенты затухания СП.

Из выражения (7) следует, что СП по каналу «расход топливного газа – температура кипящего слоя сульфита магния» эквивалентна двум последовательно соединенным типовым колебательным звеньям с постоянными времени T_1 и T_2 и коэффициентами затухания ξ_1 и ξ_2.

Комплексные корни характеристического уравнения (4) обусловлены наличием в экспериментальной кривой разгона СП колебательных составляющих. В связи с этим представляет интерес определение динамических параметров СП T_1, T_2, ξ_1, ξ_2, являющихся коэффициентами ее передаточной функции (7).

Поскольку передаточные функции (2) и (7) эквивалентны, их коэффициенты связаны соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 2(\xi_1 T_1 + \xi_2 T_2); \\ a_2 &= T_1^2 + 4\xi_1\xi_2 T_1 T_2 + T_2^2; \\ a_3 &= 2T_1 T_2(\xi_1 T_2 + \xi_2 T_1); \\ a_4 &= T_1^2 T_2^2. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

$$b = k. \quad (9)$$

Это обстоятельство позволяет по известным значениям коэффициентов $a_1 \div a_4$, определенным методом площадей в работе [1] по экспериментальной кривой разгона

СП $\theta(t)$, рассчитать значения параметров установки T_1, T_2, ξ_1, ξ_2. Они получены в результате решения системы уравнений (8):

$$T_1 = 170{,}774 \text{ с}; \quad \xi_1 = 0{,}904; \tag{10}$$

$$T_2 = 92{,}029 \text{ с}; \quad \xi_2 = 0{,}290. \tag{11}$$

Коэффициент передачи k СП, являющийся оценкой ее статических свойств, определяется в соответствии с выражением (9):

$$k = b = 1{,}235 \text{ °C}/(\text{м}^3/\text{ч}). \tag{12}$$

Экспериментальная разгонная характеристика СП $\theta(t)$ может быть аппроксимирована решением дифференциального уравнения (1), полученным при условии, что $B(t) = \Delta B1(t)$ и соответствующим структуре его передаточной функции (7):

$$\theta_a(t) = \theta_0 + k\Delta B\left[1 - A_1 e^{-\frac{\xi_1}{T_1}t}\sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi_1^2}}{T_1}t + \varphi_1\right) + A_2 e^{-\frac{\xi_2}{T_2}t}\sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{T_2}t + \varphi_2\right)\right], \tag{13}$$

где θ_0 – значение температуры кипящего слоя сульфита магния в СП в момент ступенчатого изменения расхода топливного газа на ΔB;

$$A_1 = \frac{T_1^2}{\sqrt{(1-\xi_1^2)\left\{(T_1^2 - T_2^2)^2 + 4T_1T_2[T_1T_2(\xi_1^2 + \xi_2^2) - \xi_1\xi_2(T_1^2 + T_2^2)]\right\}}}; \tag{14}$$

$$A_2 = \frac{T_2^2}{\sqrt{(1-\xi_2^2)\left\{(T_1^2 - T_2^2)^2 + 4T_1T_2[T_1T_2(\xi_1^2 + \xi_2^2) - \xi_1\xi_2(T_1^2 + T_2^2)]\right\}}}; \tag{15}$$

$$\varphi_1 = \text{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_1^2}(T_2^2 - T_1^2)}{\xi_1(T_1^2 + T_2^2) - 2\xi_2T_1T_2}\right) + 2\text{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_1^2}}{\xi_1}\right); \tag{16}$$

$$\varphi_2 = \text{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_2^2}(T_1^2 - T_2^2)}{\xi_2(T_1^2 + T_2^2) - 2\xi_1T_1T_2}\right) + 2\text{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi_2^2}}{\xi_2}\right). \tag{17}$$

Литература

1. Петровский В.С. Автоматизация сушки сульфита магния в кипящем слое / В.С. Петровский, В.А. Живописцев // Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве: Сборник статей. – М. : Машгиз, 1963. – С. 67–74.

References

1. Petrovsky V.S. Automation of drying magnesium sulfite in a fluidized bed / V.S. Petrovsky, V.A. Zhivopishtsev // Automation of drying processes in industry and agriculture: Collection of articles. – M. : Mashgiz, 1963. – P. 67–74.