УДК 621.181:681.5.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕТЕВОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE NETWORK HEATER MATHEMATICAL MODEL BY EXPERIMENTAL DATA

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

Деневич Александр Алексеевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет
denevich007@mail.ru

Аннотация. Описана методика определения параметров математической модели теплофикационного подогревателя в виде обыкновенного дифференциального уравнения четвертого порядка с четырьмя кратными корнями характеристического уравнения, описывающего связь между расходом греющего пара на входе установки и температурой сетевой воды на ее выходе. Установлена связь между этими параметрами и коэффициентами передаточной функции подогревателя. Последние определяются методом наименьших квадратов по переходной характеристике подогревателя, полученной экспериментально по указанному каналу регулирования в виде кривой изменения во времени температуры сетевой воды на выходе установки, вызванного скачкообразным изменением расхода греющего пара на ее входе. Процедура расчета названных коэффициентов оформлена в виде вычислительного блока в системе компьютерной математики Mathcad.

Ключевые слова: теплофикационный подогреватель, математическая модель, передаточная функция, параметрическая идентификация, переходная характеристика, метод наименьших квадратов.

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

Denevich Alexander Alekseevich
Student,
Kuban State University of Technology
denevich007@mail.ru

Annotation. The technique of determining the parameters of the mathematical model of a heat-supplying heater in the form of an ordinary differential equation of the fourth order with four multiple roots of the characteristic equation describing the relationship between the flow rate of the heating steam at the inlet of the installation and the temperature of the network water at its outlet is described. The relationship between these parameters and the coefficients of the transfer function of the heater is established. The latter are determined by the least squares method based on the transient characteristic of the heater, obtained experimentally through the specified control channel in the form of a curve of time variation in the temperature of the mains water at the outlet of the installation, caused by an abrupt change in the flow rate of heating steam at its inlet. The procedure for calculating these coefficients is designed as a computational block in the Mathcad computer mathematics system.

Keywords: heating heater, mathematical model, transfer function, parametric identification, transient response, least squares method.

Подогреватели сетевой воды применяются для ее подогрева до требуемого значения температуры, которое устанавливается в зависимости от температуры наружного воздуха. Они представляют собой многомерные объекты регулирования, технологическое состояние которых характеризуется температурой прямой сетевой воды, уровнем конденсата в корпусе подогревателя и давлением обратной сетевой воды.

Основной регулируемой величиной подогревателя являются температура прямой сетевой воды, заданное значение которой необходимо поддерживать с высокой точностью, обеспечивающей экономичную работу теплофикационных турбин с отопительными отборами.

Один из применяемых способов регулирования температуры прямой сетевой воды предполагает формирование регулятором температуры регулирующего воздействия в виде изменения расхода греющего пара на входе подогревателя посредством изменения положения регулирующего органа, установленного на паропроводе, в зависимости от фактического значения температуры прямой сетевой воды. Источником этого значения является сигнал отрицательной обратной связи по температуре этой воды, формируемый соответствующим датчиком, установленным на выходе подогревателя.

Для выбора закона регулирования и расчета оптимальной настройки регулятора температуры прямой сетевой воды необходимо иметь представление о динамических свойствах сетевого подогревателя, которые по каналу регулирующего воздействия могут быть описаны обыкновенным дифференциальным уравнением четвертого порядка с четырьмя кратными корнями характеристического уравнения:

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

где θ – температура прямой сетевой воды; G – расход греющего пара; $a_1 \div a_4$; b – коэффициенты, связанные с физическими параметрами сетевого подогревателя.

Количественными же оценками свойств сетевого подогревателя как объекта регулирования температуры прямой сетевой волы являются его параметры, входящие в виде коэффициентов в его передаточную функцию:

$$W(s)=\frac{\theta(s)}{G(s)}=\frac{k}{(Ts+1)^4}, \quad (2)$$

где k; T – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени сетевого подогревателя; s – оператор Лапласа.

Поскольку уравнение (1) и передаточная функция (2) эквивалентны, их коэффициентами связаны соотношениями:

$$a_1=4T; \quad a_2=6T^2; \quad a_3=4T^3; \quad a_4=T^4; \quad (3)$$

$$b=k. \quad (4)$$

Коэффициент передачи k сетевого подогревателя, характеризующий его статические свойства, определяется по экспериментальной переходной характеристике установки в соответствии с рекомендациями, представленными в [2].

Постоянные времени теплоэнергетических установок, как правило, определяются по эмпирическим данным, источником которых, в большинстве случаев, является кривая разгона или переходная характеристика объекта идентификации.

Экспериментальная переходная характеристика сетевого подогревателя по каналу «расход греющего пара – температура прямой сетевой воды» имеет S-образный вид и представляет собой кривую изменения во времени температуры прямой сетевой воды, полученную вследствие ступенчатого изменения расхода греющего пара.

Координаты точек этой кривой (t, $h_э$), приведенной к единичному установившемуся отклонению, представлены в таблице 1 в соответствии с [1]. Сама же экспериментальная переходная характеристика сетевого подогревателя $h_э(t)$ в виде совокупности названных точек изображена в нормированном виде на рисунке 1.

Таблица 1 – Экспериментальная переходная характеристика сетевого подогревателя

t, с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$h_э$	0	0,03	0,09	0,27	0,47	0,63	0,76	0,86	0,92	0,96	0,98	1,0

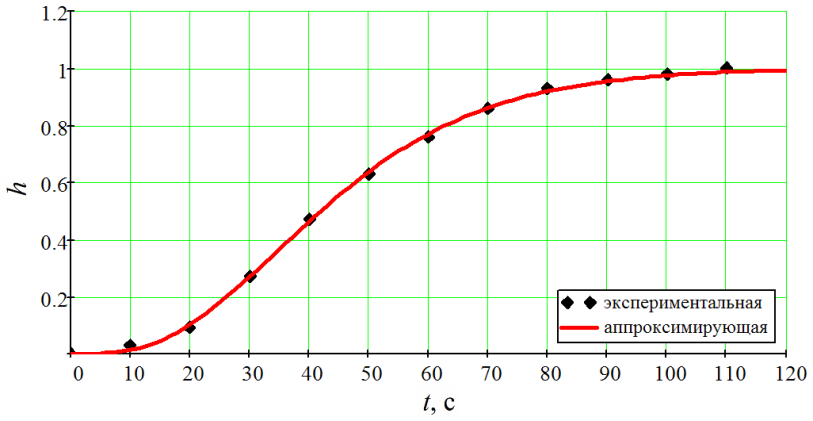

Рисунок 1 – Переходные характеристики сетевого подогревателя: экспериментальная $h_э(t)$ и аппроксимирующая $h_а(t)$

Эта характеристика может быть аппроксимирована решением дифференциального уравнения (1), полученным при нулевых начальных условиях, $G(t)$ = 1(t) и соответствующим структуре передаточной функции сетевого подогревателя (2). Данное решение представляет собой переходную функцию исследуемой установки, приведенную к единичному установившемуся отклонению, и имеет вид:

$$h_{\text{а}}(t) = 1 - \left(1 + \frac{t}{T} + \frac{t^2}{2T^2} + \frac{t^3}{6T^3}\right)e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (5)$$

В рассматриваемом случае постоянную времени сетевого подогревателя предлагается определять на основе регрессионной модели в виде выражения (5), построенной методом наименьших квадратов по его экспериментальной переходной характеристике $h_{\text{э}}(t)$.

Очевидно, что значение постоянной времени T сетевого подогревателя определяется из условия минимизации функционала:

$$S(T) = \sum_{i=1}^{n}\left[h_i - 1 + \left(1 + \frac{t_i}{T} + \frac{t_i^2}{2T^2} + \frac{t_i^3}{6T^3}\right)e^{-\frac{t_i}{T}}\right], \qquad (6)$$

где n – количество точек экспериментальной переходной характеристики сетевого подогревателя.

Процедура минимизации функционала $S(T)$ реализуется в системе компьютерной математики Mathcad в виде вычислительного блока, представленного на рискнке 2.

$n := 12 \qquad i := 1..n$

$t_i :=$ $h_i :=$ $T_0 := 20$

t_i	h_i
0	0
10	0.03
20	0.09
30	0.27
40	0.47
50	0.63
60	0.76
70	0.86
80	0.93
90	0.96
100	0.98
110	1.00

$$S(T) := \sum_{i=1}^{n}\left[h_i - 1 + \left[1 + \frac{t_i}{T} + \frac{(t_i)^2}{2\cdot(T)^2} + \frac{(t_i)^3}{6\cdot(T)^3}\right]\cdot e^{-\frac{t_i}{T}}\right]^2$$

$T := \text{Minimize}(S, T_0) \qquad T = 11.4$

Рисунок 2 – Вычислительный блок

В первой строке этого блока задается количество n точек экспериментальной переходной характеристики сетевого подогревателя $h_{\text{э}}(t)$, координаты которых (t_i, $h_{\text{э}i}$) представлены ниже соответственно в векторах t и h. Правее в этой же строке блока задается начальное приближение постоянной времени подогревателя T_0 = 20 с. Следующая строка блока содержит минимизируемый функционал (6). Завершается модуль предназначенной для решения оптимизационных задач функцией Minimize (S, T_0) с неизвестной переменной T в качестве параметра. Она возвращает в виде элемента вектора T ее значение, которое представлено в этой же строке вычислительного блока T = 11,4 с.

При полученном в результате вычислений значении постоянной времени подогревателя T по регрессионному равнению (5) на рисунке 1 построена аппроксимирующая переходная характеристика $h_{\text{а}}(t)$.

Погрешность такой аппроксимации может быть оценена по формуле [2]:

$$\delta = \max \frac{\left| h_{\text{э}}(t_i) - h_{\text{а}}(t_i) \right|}{h_{\text{э}}(\infty)} \cdot 100\ \%, \qquad (7)$$

где $h_{\text{э}}(t_i)$; $h_{\text{а}}(t_i)$ – соответственно ординаты экспериментальной переходной характеристики подогревателя и рассчитанные по аппроксимирующему уравнению (5) в одни и те же моменты времени t_i; $h_{\text{э}}(\propto)$ – ордината экспериментальной переходной характеристики подогревателя, соответствующая установившемуся значению температуры прямой сетевой воды на его выходе после нанесения ступенчатого воздействия по расходу греющего пара.

Считается, что погрешность аппроксимации удовлетворяет требованиям инженерных расчетов, если δ < (3÷5) % [2]. В данном случае δ = 1,8 %, что является положительным результатом.

Значения параметров $a_1 \div a_4$ математической модели сетевого подогревателя (1) рассчитываются по формулам (3).

Список литературы:

1. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике : учебник для студентов вузов. – Изд 4-е, стереот. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
2. Макаров И.М. Линейные автоматические системы. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Макаров, Б.М. Менский. – М. : Машиностроение, 1982. – 504 с.
3. Стефани К.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнерге тических процессов. – Изд 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.

List of references:

1. PletnevG.P. Automation of technological processes and productions in heat power engineering : textbook for university students. – Ed. 4th, stereot. – M. : Publishing house of MEI, 2007. – 352 p.
2. Makarov I.M. Linear automatic systems. – 2nd ed., revised and add. / I.M. Makarov, B.M. Mensky. – M. : Mechanical Engineering, 1982. – 504 p.
3. Stephanie K.P. Fundamentals of calculating the settings of regulators of thermal power processes. – 2nd edition, revised. and add. – M. : Energy, 1972. – 376 p.