УДК 621.181:681.5.01

ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА ПО ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

♦♦♦♦♦

EVALUATION OF THE INERTIAL PROPERTIES OF A FOURTH-ORDER THERMAL ENERGY CONTROL OBJECT BASED ON ITS EXPERIMENTAL PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTIC

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

Браницкий Егор Дмитриевич
аспирант,
Кубанский государственный технологический университет
egorbra@yandex.ru

Гостев Дмитрий Алексеевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет
dimon-vizitor@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика определения постоянных времени инерционного теплоэнергетического объекта регулирования по его экспериментальной фазочастотной характеристике методом наименьших квадратов. В качестве уравнения регрессии используется выражение фазочастотной характеристики инерционного звена четвертого порядка с двумя равными постоянными времени. Процедура определения коэффициентов регрессии (постоянных времени объекта) оформлена в виде вычислительного модуля в системе компьютерной математики Mathcad.

Ключевые слова: теплоэнергетическая установка, передаточная функция, постоянная времени, идентификация, фазочастотная 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

Branickij Egor Dmitrievich
Graduate Student,
Kuban State University of Technology
egorbra@yandex.ru

Gostev Dmitry Alekseevich
Student,
Kuban State University of Technology
yuraworkshop@gmail.com

Annotation. The paper presents a method for determining the time constants of an inertial thermal power control object based on its experimental phase-frequency characteristic using the least squares method. The regression equation is based on the phase-frequency characteristic of a fourth-order inertial link with two equal time constants. The procedure for determining the regression coefficients (time constants of the object) is implemented as a computational module in the Mathcad computer mathematics system.

Keywords: thermal power plant, transfer function, time constant, identification, phase-frequency characteristic, least squares method.

В статье рассматривается методика определения постоянных времени теплоэнергетического объекта регулирования (ТОР), связь между внешним воздействием и реакцией на него, которого описывается дифференциальным уравнением вида:

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

где $a_1 \div a_4$; b – коэффициенты; y – регулируемая (выходная) величина ТОР; x – регулирующее (внешнее) воздействие.

При этом полагается, что ТОР как динамический объект обладает свойствами инерционного звена четвертого порядка с двумя равными постоянными времени и передаточной функцией:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)^2}, \quad (2)$$

где k; $T_1 \div T_3$ – соответственно коэффициент передачи и постоянные времени ТОР по рассматриваемому каналу внешнего воздействия; s – оператор Лапласа.

Так как уравнение (1) и передаточная функция (2) эквивалентны, их коэффициенты связаны соотношениями:

$$\left.\begin{array}{c} a_1 = T_1 + T_2 + 2T_3; \\ a_2 = T_3^2 + 2(T_1 + T_2)T_3 + T_1T_2; \\ a_3 = (T_1 + T_2)T_3^2 + 2T_1T_2T_3; \\ a_4 = T_1T_2T_3^2. \end{array}\right\} \quad (3)$$

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

Постоянные времени ТОР $T_1 \div T_3$ являются количественными оценками его инерционных свойств. Их значения могут быть определены методом наименьших квадратов по фазочастотной характеристике (ФЧХ) ТОР, полученной экспериментально по каналу внешнего воздействия.

Для описания этой характеристики в качестве уравнения регрессии допустимо использовать выражение ФЧХ инерционного звена четвертого порядка, соответствующее передаточной функции (2):

$$\varphi_a(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{[2T_1T_2 + (T_1 + T_2)T_3]T_3\omega^3 - (T_1 + T_2 + 2T_3)\omega}{T_1T_2T_3^2\omega^4 - [T_1T_2 + 2(T_1 + T_2)T_3 + T_3^2]\omega^2 + 1}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота внешнего воздействия.

Процедура определения коэффициентов регрессионного уравнения (5) реализуется в системе компьютерной математики Mathcad в виде вычислительного модуля [1], представленного на рисунке 1.

$D :=$

0	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.018	0.021
0	-0.13	-0.25	-0.38	-0.5	-0.62	-0.74	-0.85

$n := 8 \qquad i := 1..n \qquad \omega_i := D_{1,i} \qquad \varphi_i := D_{2,i}$

$T_{10} := 28 \qquad T_{20} := 8 \qquad T_{30} := 6 \qquad B := \left(T_{10} \;\; T_{20} \;\; T_{30}\right)^T$

$$F(\omega, T_1, T_2, T_3) := \begin{bmatrix} \operatorname{atan}\left[\dfrac{\left[2\cdot T_1\cdot T_2 + (T_1 + T_2)\cdot T_3\right]\cdot T_3\cdot\omega^3 - (T_1 + T_2 + 2\cdot T_3)\cdot\omega}{T_1\cdot T_2\cdot {T_3}^2\cdot\omega^4 - \left[T_1\cdot T_2 + 2\cdot(T_1 + T_2)\cdot T_3 + {T_3}^2\right]\cdot\omega^2 + 1}\right] \\ -\dfrac{\omega}{{T_1}^2\cdot\omega^2 + 1} \\ -\dfrac{\omega}{{T_2}^2\cdot\omega^2 + 1} \\ -\dfrac{2\cdot\omega}{{T_3}^2\cdot\omega^2 + 1} \end{bmatrix}$$

$T := genfit(\omega, \varphi, B, F) \qquad T_1 = 24.02 \qquad T_2 = 7.25 \qquad T_3 = 5.57$

Рисунок 1 – Вычислительный модуль

Вычислительный модуль предназначен для расчета по координатам точек (ω_i, φ_i) экспериментальной ФЧХ ТОР $\varphi(\omega)$ методом наименьших квадратов значений коэффициентов уравнения (5) $T_1 \div T_3$.

В начале этого модуля элементам двухмерного массива (табл.) **D** присваиваются значения координат точек экспериментальной ФЧХ ТОР (ω_i, φ_i). Ниже задается их количество n = 8. Далее в этой же строке сформированы векторы-столбцы $\boldsymbol{\omega}$ и $\boldsymbol{\varphi}$, элементами которых являются соответственно абсциссы ωi и ординаты φi точек экспериментальной ФЧХ ТОР, содержащиеся в первой ($\mathbf{D}_{1,i}$) и второй ($\mathbf{D}_{2,i}$) строках массива **D**.

Ниже в вычислительном модуле переменным T_{10}, T_{20}, T_{30} присваиваются начальные приближения (значения) искомых коэффициентов регрессионной модели (5) – постоянных времени ТОР (T_{10} = 28 с; T_{20} = 8 с; T_{30} = 6 с). Они являются элементами вектора:

$$\boldsymbol{B} = \left| \begin{array}{ccc} T_{10} & T_{20} & T_{30} \end{array} \right|^T \tag{6}$$

и необходимы для итерационного решения системы уравнений:

$$\boldsymbol{F}(\omega, T_1, T_2, T_3) = \left| \begin{array}{cccc} \varphi_a(\omega) & \dfrac{\partial \varphi_a(\omega)}{\partial T_1} & \dfrac{\partial \varphi_a(\omega)}{\partial T_2} & \dfrac{\partial \varphi_a(\omega)}{\partial T_3} \end{array} \right|^T, \tag{7}$$

которая образованна регрессионным выражением (5) и его аналитически определенными частными производными первого порядка по постоянным времени $T_1 \div T_3$. В вычислительном модуле эта система уравнений представлена в виде вектора $\boldsymbol{F}(\omega, T_1, T_2, T_3)$.

Искомые значения коэффициентов регрессионной модели (5) определяются с помощью функции *genfit* ($\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{F}$), в которой экспериментальная АЧХ ТОР представлена *n* координатами своих точек (ω_i, φ_i) соответственно в векторах $\boldsymbol{\omega}$ и $\boldsymbol{\varphi}$, начальные приближения параметров ТОР T_{10}, T_{20}, T_{30} – вектором $\boldsymbol{B}$ (6), а правые части системы (7) – символьными элементами вектора $\boldsymbol{F}(\omega, T_1, T_2, T_3)$.

Функция *genfit* ($\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\varphi}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{F}$) возвращает неизвестные значения параметров регрессионной модели (5) ТОР в виде элементов вектора T. Они представлены в нижней строке вычислительного модуля:

$$T_1 = 24{,}02 \text{ с}; \; T_2 = 7{,}25 \text{ с}; \; T_3 = 5{,}57 \text{ с}.$$

По найденным значениям постоянных времени ТОР по выражениям (3) могут быть рассчитаны коэффициенты его математической модели (1).

Литература

1. Дьяконов В.П. MATHCAD 8/2000: Специальный справочник. – СПб. : Питер, 2000. – 592 с.

References

1. Dyakonov V.P. MATHCAD 8/2000: Special Reference Book. – SPb. : Peter, 2000. – 592 p.