УДК 621.181:681.5.01

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ПО КАНАЛУ «РАСХОД ТОПЛИВА – ДАВЛЕНИЕ ПАРА ЗА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНОЙ» ПО ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КРИВОЙ РАЗГОНА

ESTIMATION OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF A DIRECT-FLOW STEAM GENERATOR IN THE «FUEL CONSUMPTION – STEAM PRESSURE BEHIND THE TRANSITION ZONE» CHANNEL BY ITS EXPERIMENTAL ACCELERATION CURVE

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

Четвериков Даниил Валерьевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет
daniilchetver@yandex.ru

Аннотация. По числовым значениям коэффициентов дифференциального уравнения прямоточного парогенератора, описывающего связь между давлением пара за переходной зоной и расходом топлива, установлено, что он эквивалентен последовательно соединенным типовым динамическим звеньям: инерционному звену первого порядка и колебательному звену. Вследствие этого определены оценки его динамических свойств в виде двух постоянных времени и коэффициента затухания. Их значения найдены в результате решения системы уравнений, связывающих динамические параметры парогенератора с названными ранее коэффициентами. Получено уравнение, аппроксимирующее экспериментальную разгонную характеристику парогенератора. Установлено, что его структура и параметры, определенные в результате идентификации парогенератора методом площадей, не обеспечивают требуемой точности аппроксимации.

Ключевые слова: прямоточный парогенератор, математическая модель, передаточная функция, параметрическая идентификация, кривая разгона, 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

Chetverikov Daniil Valerievich
Student,
Kuban State University of Technology
daniilchetver@yandex.ru

Annotation. Based on the numerical values of the coefficients of the differential equation of the direct-flow steam generator, which describes the relationship between the steam pressure behind the transition zone and the fuel flow rate, it has been established that the steam generator is equivalent to a series of typical dynamic links: a first-order inertial link and a колебательное link. As a result, the dynamic properties of the steam generator have been evaluated in terms of two time constants and a damping coefficient. These values have been obtained by solving a system of equations that relate the dynamic parameters of the steam generator to the previously mentioned coefficients. An equation is obtained that approximates the experimental acceleration characteristic of the steam generator. It is established that its structure and parameters, determined as a result of the steam generator identification by the area method, do not provide the required accuracy of approximation.

Keywords: direct-flow steam generator, mathematical model, transfer function, parametric identification, acceleration curve, least squares method.

Динамические свойства прямоточного парогенератора по каналу «расход топлива – давление пара за переходной зоной» описываются обыкновенным дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$a_3 \frac{d^3 P(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 P(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = bB(t), \tag{1}$$

где $a_1 \div a_3$; b – коэффициенты, связанные с физическими параметрами парогенератора; P – давление пара за переходной зоной парогенератора; B – расход топлива.

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

$$\frac{P(s)}{B(s)} = \frac{b}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \tag{2}$$

(здесь s – оператор преобразования Лапласа), а также методом площадей определены коэффициенты $a_1 \div a_3$ по экспериментальной разгонной характеристике рассматриваемого динамического участка, изображенной на рисунке 1 в виде совокупности точек. Она имеет S образный вид и представляет собой кривую изменения во времени давления пара за переходной зоной парогенератора $P(t)$, полученную вследствие ступенчатого уменьшения расхода топлива на ΔB = 7000 м^3/ч. Там же традиционным методом определено значение коэффициента b.

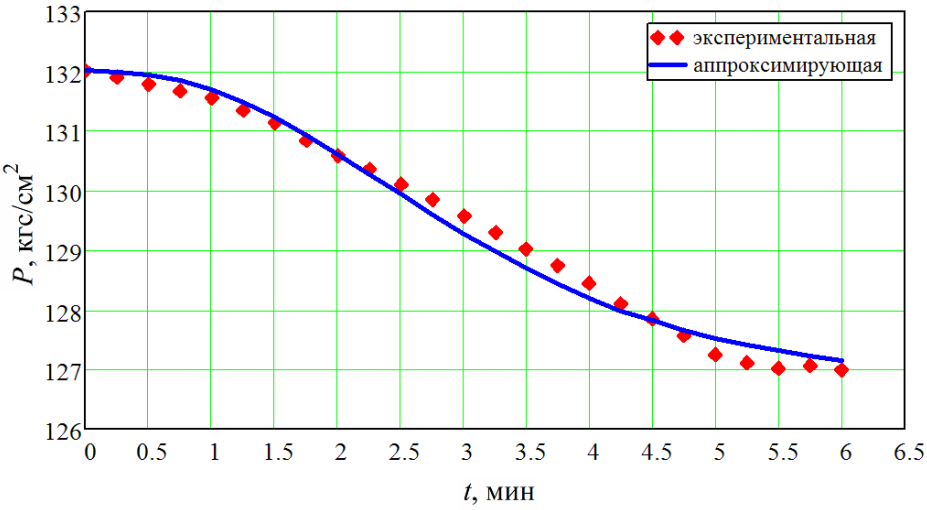

Рисунок 1 – Кривые разгона парогенератора:
экспериментальная $P_э(t)$ и аппроксимирующая $P_а(t)$

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

$$\frac{P(s)}{B(s)} = \frac{0{,}0007}{1{,}562 s^3 + 3{,}495 s^2 + 2{,}978 s + 1}. \tag{3}$$

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

При таких значениях коэффициентов $a_1 \div a_3$ знаменатель передаточной функции (3) – характеристическое уравнение

$$1{,}562 s^3 + 3{,}495 s^2 + 2{,}978 s + 1 = 0 \tag{4}$$

имеет один отрицательный действительный корень:

$$s_1 = -0{,}924$$

и два комплексных сопряженных корня:

$$s_{2,3} = -0{,}657 \pm j0{,}511.$$

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

$$\frac{P(s)}{B(s)} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1)}, \tag{5}$$

где k; T_1; T_2; ξ – соответственно коэффициент передачи, постоянные времени и коэффициент затухания рассматриваемого динамического участка парогенератора.

Из выражения (5) следует, что парогенератор по каналу «расход топлива – давление пара за переходной зоной» эквивалентен последовательно соединенным типовым динамическим звеньям: инерционному звену первого порядка с постоянной времени T_1 и колебательному звену с постоянной времени T_2 и коэффициентом затухания ξ.

Комплексные корни характеристического уравнения (4) обусловлены наличием в экспериментальной кривой разгона парогенератора $P_э(t)$ колебательной составляющей, которая, однако, заметным образом себе не проявляет. В связи с этим представляет интерес определение динамических параметров парогенератора T_1, T_2 и ξ, являющихся коэффициентами передаточной функции (5).

Поскольку передаточные функции (2) и (5) эквивалентны, их коэффициенты связаны соотношениями

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= T_1 + 2\xi T_2; \\ a_2 &= (T_2 + 2\xi T_1)T_2; \\ a_3 &= T_1 T_2^2. \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

$$b = k. \tag{7}$$

Это обстоятельство позволяет по известным значениям коэффициентов $a_1 \div a_3$, определенным методом площадей в работе [1], рассчитать значения физических параметров парогенератора T_1, T_2 и ξ. Они получены в результате решения системы уравнений (6):

$$T_1 = 1{,}082 \text{ мин}; \quad T_2 = 1{,}201 \text{ мин}; \quad \xi = 0{,}789.$$

Коэффициент передачи k рассматриваемого динамического участка парогенератора, являющийся оценкой его статических свойств, определяется в соответствии с выражением (7):

$$k = b = 0{,}0007 \ (\text{кгс}/\text{см}^2)/(\text{м}^3/\text{ч}).$$

Экспериментальная разгонная характеристика парогенератора $P_э(t)$ может быть аппроксимирована решением дифференциального уравнения (1), полученным при условии, что $B(t) = \Delta B 1(t)$ и соответствующим структуре его передаточной функции (5):

$$P_а(t) = P_0 - k\Delta B\left[1 - C_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - C_2 e^{-\xi\frac{t}{T_2}} \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_2} t - \varphi\right)\right], \tag{8}$$

где P_0 – значение давления пара за переходной зоной парогенератора в момент ступенчатого уменьшения расхода топлива на ΔB:

$$C_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 + T_2^2(1 - 2\xi T_1 T_2^{-1})}; \tag{9}$$

$$C_2 = \frac{T_2}{\sqrt{T_1^2[T_2^2(1 - 2\xi T_1 T_2^{-1})](1-\xi^2)}}; \tag{10}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{T_1\sqrt{1-\xi^2}}{T_2 - \xi T_1}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right). \tag{11}$$

При ранее определенных значениях динамических параметров парогенератора по уравнению (8) на рисунке 1 построена аппроксимирующая кривая разгона парогенератора $P_а(t)$.

Погрешность этой аппроксимации экспериментальной кривой разгона парогенератора $P_э(t)$ выражением (8) допустимо оценить по формуле [2]:

$$\delta = \max\frac{|P_э(t_i) - P_а(t_i)|}{P_0 - P_э(\infty)} \cdot 100 \ \%, \tag{12}$$

где $P_э(t_i)$; $P_а(t_i)$ – соответственно значения давления пара за переходной зоной парогенератора, определенные по его экспериментальной кривой разгона и рассчитанные по аппроксимирующему уравнению (8) в одни и те же моменты времени t_i; $P_э(\infty)$ – установившееся значение давления пара за переходной зоной парогенератора после нанесения внешнего воздействия по расходу топлива.

Считается, что, если δ < (3÷5) %, то погрешность аппроксимации удовлетворяет требованиям инженерных расчетов [2]. В данном случае δ = 6,7 %.

Таким образом, полученные в работе [1] методом площадей результаты идентификации парогенератора в виде передаточной функции (3) не обеспечивают требуемой точности аппроксимации выражением (8) его экспериментальной разгонной характеристики.

Список литературы:

1. Стефани К.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнерге тических процессов. – Изд 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972. – 376 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.

List of references:

1. Stephanie K.P. Fundamentals of calculating the settings of regulators of thermal power processes. – 2nd edition, revised. and add. – M. : Energy, 1972. – 376 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.