

Проверка адекватности математических моделей теплоэнергетических объектов

В.П. Шевчук, Е.Л. Еремина, Е.Ю. Силаева

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Работа посвящена разработке адекватной модели парового барабанного котлоагрегата, которая позволит разработать оптимальный алгоритм управления. Были рассмотрены причинно-следственные связи котлоагрегата и приведены их передаточные функции. Так же получены математические модели парового барабанного котлоагрегата экспериментальным, базирующимся на снятии кривых разгона, и комбинированным методами.

Ключевые слова: анализ алгоритмов управления, адекватные модели, математические модели.

В настоящее время для решения задачи построения оптимальных алгоритмов управления непрерывными технологическими процессами, а также оценки их эффективности существуют различные методы и подходы. Однако в основе практически каждого из них лежит знание поведения объекта, воплощенное в его математической модели, полученной аналитическими, экспериментальными или комбинированными методами.

Аналитические методы базируются на использовании уравнений описывающих физико-химические и энергетические процессы, протекающие в исследуемом объекте управления.

Экспериментальные методы предполагают проведение серии экспериментов на реальном объекте управления. Обработав результаты экспериментов, оценивают параметры динамической модели объекта, задавшись предварительно ее структурой. Наиболее эффективными оказываются комбинированные, построенные на результатах нормального функционирования объекта методы построения математической модели объекта. Последние особенно важны для управления высокотехнологичными нестационарными объектами, где проведение эксперимента затруднено, либо нецелесообразно ввиду дрейфа характеристик. Анализ существующих алгоритмов управления большинством теплоэнергетических объектов свидетельствует о слабой проработанности вопроса методов статистической идентификации объектов.

Целью работы являлось построение адекватных моделей парового барабанного котлоагрегата, позволяющих разработать алгоритмы управления.

Для достижения цели были поставлены задачи:

1. Построение математических моделей парового барабанного котлоагрегата экспериментальными методами;
2. Построение математических моделей парового барабанного котлоагрегата комбинированными методами;
3. Проверка адекватности математических моделей.

Анализ литературных источников [1, 2] показал, что рассматриваемые технологические объекты представляют собой многосвязные объекты

На рис. 1 приведена модель парового барабанного котлоагрегата, аналитическое представление передаточных функций которых имеет следующий вид:

$$W_j = \prod_j^N \frac{K_j}{T_j \cdot p + 1} * e^{-p \cdot \tau}, \quad (1)$$

где W_j – передаточная функция по каналу управления; K_j – коэффициент по каналу управления; T_j – постоянная времени; τ – постоянная времени запаздывания.

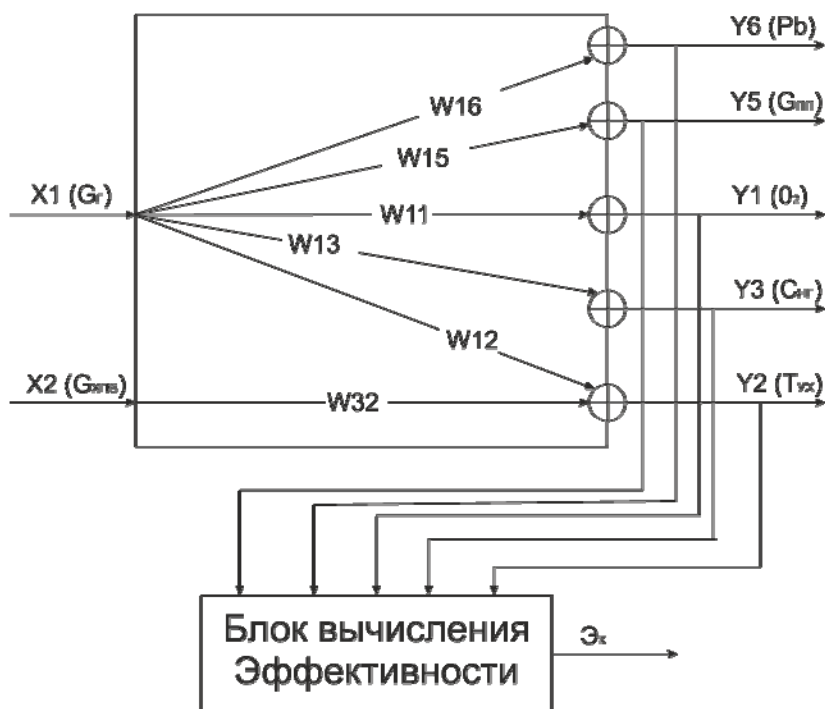


Рис. 1. – Причинно-следственные связи котлоагрегата
Получение математических моделей экспериментальным методом.

Для парового котла получены математические модели активным методом с помощью кривых разгона на основании аналитического представления вида передаточных функций.

Таблица № 1

Технологические параметры в паровом барабанном котлоагрегате

Параметры	Технологический параметр
X1	расход природного газа
X2	расход питательной воды
X3	расход конденсата на первый впрыск
X4	расход конденсата на второй впрыск
X5	расход конденсата на третий впрыск
X6	температура воздуха перед горелкой
X7	температура газа
X8	температура питательной воды
X9	расход воздуха
Y1	температура перегретого пара на выходе
Y2	уровень воды в барабане
Y3	температура пер. пара за первым впрыском
Y4	температура пер. пара за вторым впрыском
Y5	расход перегретого пара
Y6	давление перегретого пара
Y7	температура уходящих газов
Y8	содержание кислорода в уходящих газах
Y9	разрежение в топке

Часть моделей парового барабанного котлоагрегата представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Передаточные функции в паровом барабанном котлоагрегате

Передаточная функция по каналу	Вид передаточной функции
--------------------------------	--------------------------

W17	$W_{17}(p) = \frac{0.28}{197.11 * p + 1} * e^{57 * p}$
W18	$W_{18}(p) = \frac{-1.15}{9.73 * p + 1} * e^{-40 * p}$
W27	$W_{27}(p) = \frac{4.68}{223.5552 * p^2 + 47.62 * p + 1} * e^{-4.5 * p}$
W91	$W_{91}(p) = \frac{0.2}{24.1081 * p^2 + 9.82 * p + 1} * e^{-19 * p}$
W92	$W_{92}(p) = \frac{-0.75}{136.044 * p^2 + 114.57 * p + 1} * e^{-63 * p}$

Обработка экспериментальных данных на ЭВМ существенно упрощается и становится более точной, если данные изначально поступают в цифровой форме.

Предварительно задавшись порядком передаточных функций по внешнему виду кривых разгона получаем сглаженное аналитическое представление кривых.

Так в описываемых работах для каналов объекта, идентифицируемых звеньями второго порядка аналитическую зависимость для переходной характеристики можно получить обратным преобразованием Лапласа реакции системы на ступенчатое воздействие:

$$h(t) = z^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = z^{-1} \left\{ \frac{k}{p(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} \right\}, \quad (2)$$

Разложим выражение знаменателя на элементарные дроби, получим:

$$\frac{k}{p(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)} = \frac{k}{p} + \frac{k\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot \frac{1}{p - \alpha_1} - \frac{k\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot \frac{1}{p - \alpha_2}, \quad (3)$$

где α_1, α_2 - корни знаменателя (находятся по теореме Виетта);

Применив к правой части уравнения обратное преобразование Лапласа, получим искомую аналитическую зависимость:

$$h(t) = k \left[1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{\alpha_2 t} - \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{\alpha_1 t} \right], \quad (4)$$

Аппроксимация экспериментальных точек полученным выражением возможна также с применением метода наименьших квадратов, на котором и базируется большинство встроенных процедур аппроксимации в программных математических пакетах (например, Mathcad).

Коэффициенты, ранее выбранной передаточной функции (в частности, второго порядка) определяются как:

k – искомый коэффициент усиления объекта;

$$T_2 = \sqrt{\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2}}, \quad T_1 = -\left\{ \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \right\}, \quad - \text{ постоянные времени объекта};$$

Снятая с объекта кривая разгона по каналу W97 и ее сглаженное аналитическое представление изображены на рисунок 2 (кривые а, б).

Получение математических моделей комбинированным методом. В комбинированных методах определения динамических характеристик объекта управления предполагается, что входной и выходной сигналы объекта представляют собой реализацию случайных процессов. В этих случаях для определения динамических характеристик используются вероятностные характеристики сигналов на входе и выходе объекта в режиме его нормальной эксплуатации.

Задача при этом разбивается на два этапа:

1. Определение динамических характеристик сигналов.
2. Определение динамических характеристик исследуемых объектов.

Полученные в результате пассивного эксперимента данные представляют собой случайные процессы. При этом процессы должны обладать свойствами стационарности и эргодичности.

Вся необходимая для расчетов линейных систем информация содержится в их автокорреляционной и взаимокорреляционной функциях:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt \quad R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) \cdot dt, \quad (5)$$

Из теории автоматического управления известно, что реакция системы на произвольное воздействие представляет собой интеграл Дюамеля:

$$y(t) = \int_0^T x(\tau) \cdot w(t - \tau) \cdot d\tau, \quad (6)$$

Очевидно, что существует аналогичная связь между статическими характеристиками сигналов и импульсной характеристикой объекта:

$$R_{xy}(t) = \int_0^t R_{xx}(\tau) \cdot w(t - \tau) \cdot d\tau, \quad (7)$$

На рис. 2 изображены корреляционные функции, рассчитанные по данным пассивного эксперимента по одному из каналов изучаемого объекта.

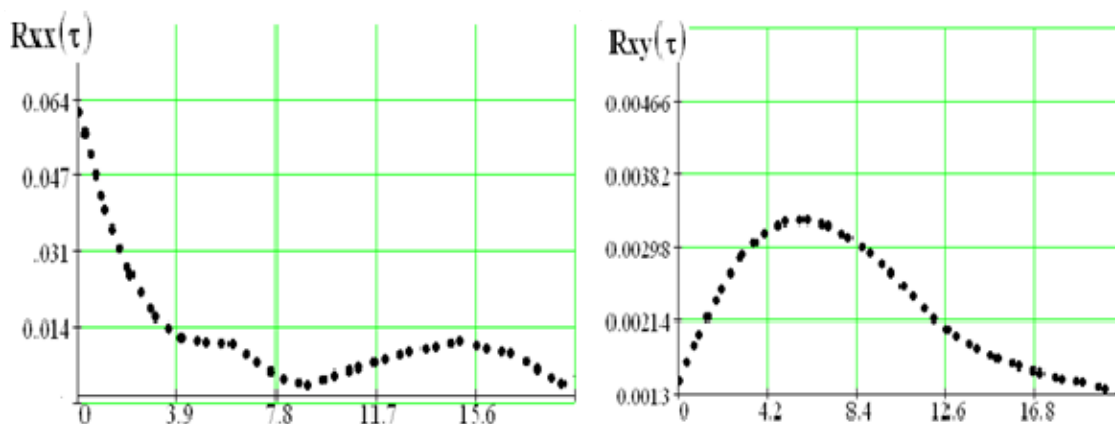


Рис. 2. – Автокорреляционная (а) и взаимокорреляционная (б) функции по каналу W97

Искомую весовую функцию объекта можно найти решая интегральное уравнение Винера-Хинчина, которое в матричном виде имеет вид:

$$\overline{w(j)} = R_{xx}(j)^{-1} \cdot \overline{R_{xy}(j)}, \quad (8)$$

Полученная в дискретных значения импульсная переходная характеристика (рисунок 5) может быть аппроксимирована непрерывной зависимостью $w(t)$ методом наименьших квадратов:

$$w(t) = a1 \cdot e^{a2 \cdot t} \cdot \sinh(a3 \cdot t), \quad (9)$$

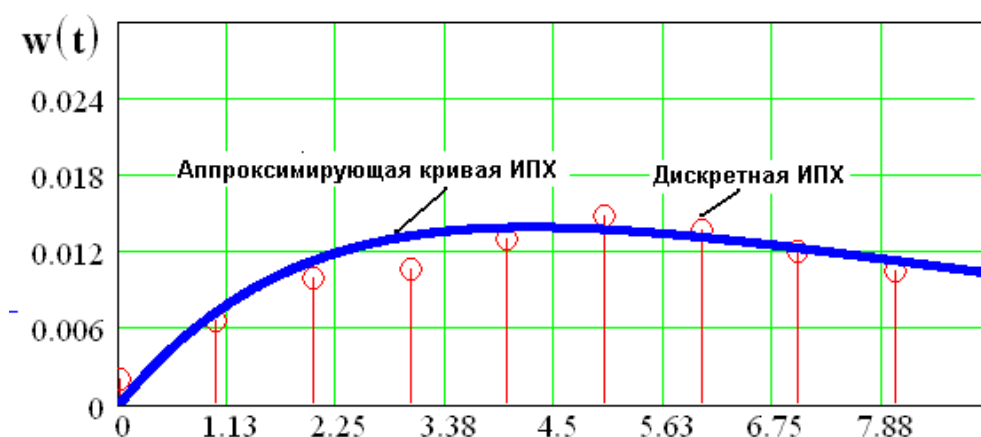


Рис. 3. – Аппроксимация импульсной переходной характеристики канала W97

Полученная в итоге, экспериментальная переходная характеристика должна быть сопоставлена с теоретической, путем оценки дисперсии разброса (рис. 4).

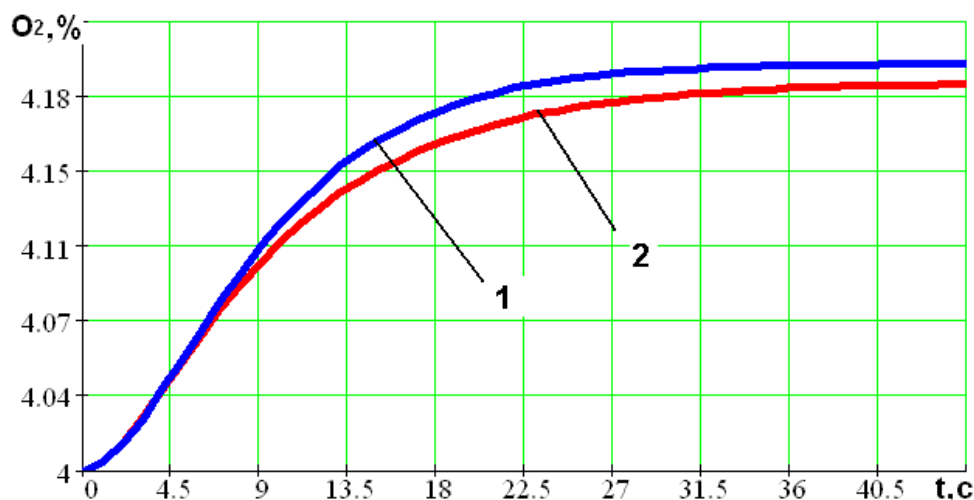


Рис. 4. – Оценка адекватности по результатам экспериментов

Где кривая 1 – экспериментальная кривая разгона по каналу W11, кривая 2 – кривая разгона, полученная комбинированным методом.

В работе изучалось влияние условий постановки и обработки статистического эксперимента на имитационной модели, реализованной с привлечением программных пакетов WisSim и Mathcad. При этом на вход модели подавался сформированный генератором случайного шума сигнал, предварительно обработанный цифровым RC-фильтром. Изучалось влияние выбора постоянной фильтра, а также длины реализации процессов на адекватность (сходимость) результатов пассивного эксперимента с заданной моделью.

Результаты свидетельствуют о существовании оптимального диапазона указанных параметров (Рис. 5).

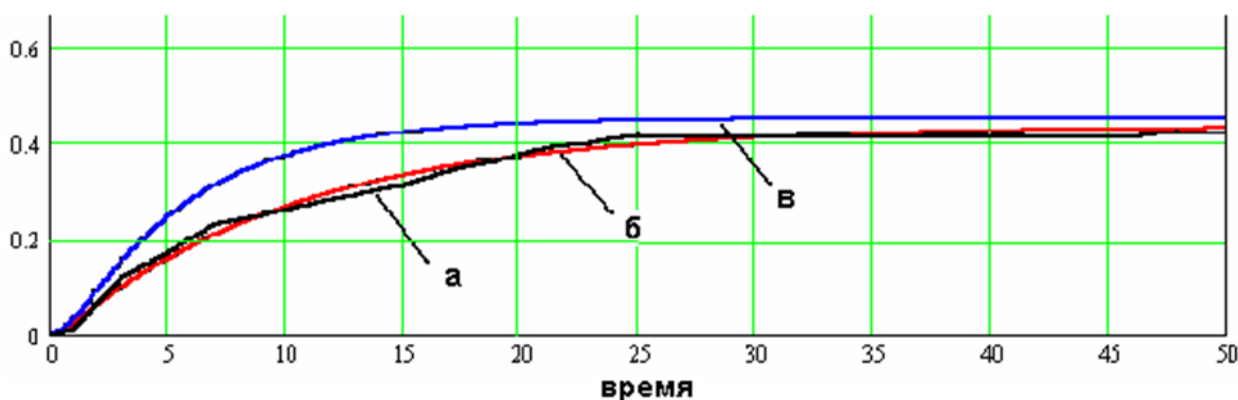


Рис. 5 - Виды дисперсии адекватности от постоянной времени фильтра (а), длины реализации (б) и сглаженная кривая разгона деаэратора (в)

Результаты работы. Анализ литературных источников позволил построить аналитические модели парового котла (Рис. 1).

Получено математическое описание изучаемых теплотехнических объектов экспериментальными методами, базирующимися на снятии кривых разгона (таблица 1).

Получено математическое описание комбинированными методами;

Выполнена проверка адекватности полученного математического описания парового барабанного котлоагрегата.

Литература

1. Ротач В.Я.. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
2. Ключев С.А., Лебедев А.Т., Семенов Н. П., Товарнов А. Г.: Под ред. С. А. Ключева. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
3. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзиньш Э.Я.. Производственные и отопительные котельные. 2 изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.
4. Зыков А.К.. Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 129 с.
5. Целигоров Н.А., Целигорова Е.Н., Мафура Г.В.. Математические модели неопределённости систем управления и методы, используемые для их исследования //



Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2). URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340.

6. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К.. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 7 – С. 59-66

7. АСКУЭ«АИСТ» // URL:aist-system.ru.

8. DCU 0920 Data Concentrator Unit. Ami Tech India Private Limited // URL:
indiamart.com/amitech-india-limited/services.html#dcu-0920-data-concentratorunit.

9. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. URL: bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf.

10. Шушкевич Т.В. Программный расчет неопределенности результатов измерений // Инженерный вестник Дона. 2016. №4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806

References

1. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploe`nergeticheskimi processami [Theory of automatic control of heat and power processes]. M.: E`nergoatomizdat, 1985. 296 p.

2. Klyuev S.A., Lebedev A.T., Semenov N.P., Tovarnov A.G.: Pod red. Klyueva S.A.. Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya barabanny`x parovy`x kotlov [Adjustment of automatic control systems of drum steam boilers]. M.: E`nergoatomizdat, 1985. 280 p.

3. Buznikov E.F., Roddatis K.F., Berzin`sh E`.Ya.. Proizvodstvenny`e i otopitel`ny`e kotel`ny`e [Production and heating boilers]. 2 izd. M.: E`nergoatomizdat, 1984. 248 p.

4. Zy`kov A.K.. Parovy`e i vodogrejnuy`e kotly` [Steam and hot water boilers]. M.: E`nergoatomizdat, 1987. 129 p.

5. Celigorov N.A., Celigorova E.N., Mafura G.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (chast` 2) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340.

6. Mar`yandy`shev P.A., Chernov A.A., Lyubov V.K.. Chislennoe modelirovanie topochnogo processa nizkoe`misionnogo vixrevogo kotla Mezhdunarodny`j zhurnal e`ksperimental`nogo obrazovaniya. 2015. № 7 p. 59-66

7. ASKUE`«AIST» URL:aist-system.ru.



8. DCU 0920 Data Concentrator Unit. Ami Tech India Private Limited URL: indiamart.com/amitech-india-limited/services.html#dcu-0920-data-concentratorunit.
9. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. URL: bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf.
10. Shushkevich T.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)., 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3806