УДК 681.5.015

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ГАЗОВОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЕЕ ВХОД-ВЫХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. А. Новосельцева

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE GAS FURNACE MODEL BASED ON MEASUREMENTS OF ITS INPUT AND OUTPUT PROCESSES

M. A. Novoseltseva

В работе описывается получение модели газовой печи на основе метода структурно-параметрической идентификации по дискретным измерениям случайных входных и выходных процессов. Метод основан на теории непрерывных дробей. Метод включает в себя проверку стационарности и однородности процессов печи, получение дискретной модели печи, которая в дальнейшем может использоваться для прогнозирования, мониторинга, контроля и диагностики процессов газовой печи.

The paper describes buildinga gas furnace model basedon the method of structural and parametric identification by discrete measurements of accidental input and output processes. The method is based on the theory of continued fractions. The method includes checkingthe stationarity and homogeneity of the furnaceprocesses, receiving the discrete model of the furnace, which can be further used for predicting, monitoring, control and diagnostics of the gas furnace processes.

Ключевые слова: газовая печь, структурно-параметрическая идентификация, непрерывная дробь, структурная функция, идентифицирующая матрица, дискретная передаточная функция.

Keywords: gas furnace, structural and parametric identification, continued fraction, structural function, identifying matrix, discrete gear function.

При изучении любых объектов, процессов, явлений основной задачей является построение их моделей. Как результат познания модель представляет собой отображение в той или иной форме свойств, закономерностей, физических и других характеристик, присущих исследуемому объекту. Любая научная или инженерная деятельность в разной степени использует формальное или содержательное описание процессов или явлений в той или иной области науки и техники. В различных научных направлениях разрабатываются свои подходы, способы и методы построения и использования модели.

Идентификация технологического процесса – это важнейший этап создания любой автоматизированной системы управления этим технологическим процессом. Для контроля и управления технологическим процессом необходимо знать, как влияет то или иное входное воздействие на выходную переменную, характеризующую его протекание. Поэтому актуальность проблем моделирования и идентификации остается одной из центральных задач кибернетики, так как эффективное управление и контроль любым технологическим процессом возможны лишь тогда, когда известно математическое описание этого процесса.

В работе рассматривается газовая печь, в которую подается воздух и метан, на выходе получается смесь газов, содержащая двуокись углерода CO_2. Скорость подачи воздуха постоянна, а скорость подачи метана произвольно изменяется. Результатом наблюдений являются $N = 296$ пар последовательных измерений случайных процессов $\{x(k\Delta t),\ y(k\Delta t);\ k = 1, ...296\}$, измеренных с шагом дискретизации $\Delta t = 9$ с [2], где $x(k\Delta t)$ – расход газа на входе (в кубических фунтах в минуту) (рис. 1), $y(k\Delta t)$ – процентное сдержание CO_2 в газе на выходе печи (рис. 2). Необходимо построить динамическую модель газовой печи на основе измерений входного процесса $x(k\Delta t)$ и соответствующего выходного процесса $y(k\Delta t)$ данной системы.

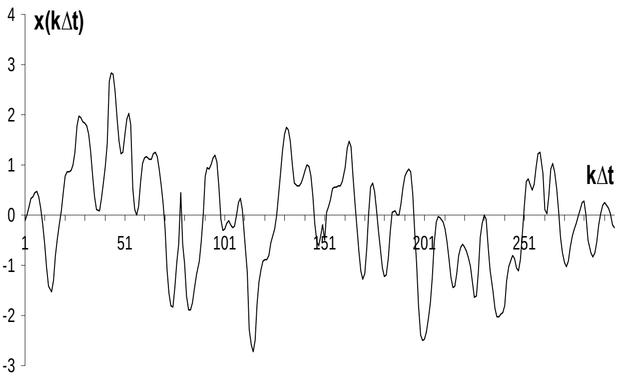

Рис. 1. ***Расход газа на входе печи***

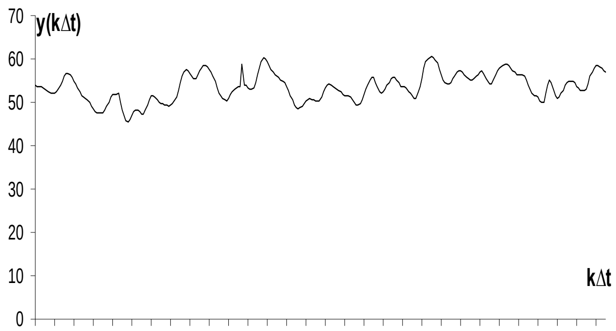

Рис. 2. ***Содержание CO_2 в газе на выходе печи***

Для решения задачи воспользуемся методикой структурно-параметрической идентификации стохастических объектов на основе теории непрерывных дробей [5; 6]. Методика позволяет получить модель стохастического объекта в условиях отсутствия априорной информации о нем и его вход-выходных переменных и может быть использована при создании информационных систем управления и контроля технологическими процессами. Методика включает в себя проверку стационарности и однородности вход-выходных процессов объекта, получение дискретной модели идентифицируемого объекта, проверку адекватности полученной модели с помощью принципа вариации шага дискретизации. Приведем последовательность этапов, необходимых для осуществления данной методики.

1 этап. *Проверка на стационарность вход-выходных процессов.* Для проверки стационарности рассчитываются значения структурной функции процесса [6]

$$C_x(k\Delta t)=\frac{1}{N-k}\sum_{i=1}^{N-k}\left(x(i\Delta t)-x((i+k)\Delta t)\right)^2. \quad (1)$$

Таким же образом производится получение структурной функции для выходного процесса, т. е. для $\{y(k\,\Delta t)\}_{k=1}^{N}$ выполняется аналогичная последовательность шагов, приводимая далее.

Для построения модели каждой из структурных функций используется идентифицирующая матрица В. Висковатова [6]:

$$\begin{array}{r} (-1)-\text{строка} \\ (0)-\text{строка} \\ 1-\text{строка} \\ \ldots \\ \ldots \\ m-\text{строка} \\ \ldots \end{array}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & \ldots \\ C_x(0) & C_x(\Delta t) & C_x(2\Delta t) & \ldots & C_x(n\Delta t) & \ldots \\ \alpha_1(0) & \alpha_1(\Delta t) & \alpha_1(2\Delta t) & \ldots & \alpha_1(n\Delta t) & \ldots \\ \alpha_2(0) & \alpha_2(\Delta t) & \alpha_2(2\Delta t) & \ldots & \alpha_2(n\Delta t) & \ldots. \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_m(0) & \alpha_m(\Delta t) & \alpha_m(2\Delta t) & \ldots & \alpha_m(n\Delta t) & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{pmatrix}, \quad (2)$$

в которой элементы $\alpha_m(n\Delta t)$ последовательно определяются с помощью соотношения:

$$\alpha_m(n\Delta t)=\frac{\alpha_{m-2}((n+1)\Delta t)}{\alpha_{m-2}(0)}-\frac{\alpha_{m-1}((n+1)\Delta t)}{\alpha_{m-1}(0)}, \quad (3)$$

где $\alpha_{-1}(n\Delta t)=1(n\Delta t)$, $\alpha_0(n\Delta t)=C_x(n\Delta t)$, m=1,2,3,..., n=0,1,2,… Вычисление элементов $\alpha_m(n\Delta t)$ продолжается до появления нулевой строки. Элементы первого столбца матрицы (2) позволяют получить непрерывную дробь:

$$G_{Cx}(z)=\cfrac{C_x(\Delta t)z^{-1}}{1+\cfrac{\alpha_1(0)z^{-1}}{1+\cfrac{\alpha_2(0)z^{-1}}{1+\ldots}}}, \quad (4)$$

которая после сворачивания представляет собой модель структурной функции сигнала в форме дискретной передаточной функции (ДПФ) виртуального объекта [6]. Модель (4) позволяет вынести решение, подтверждающее стационарность (устойчивость модели) или нестационарность (неустойчивость модели) процесса [6]. Если данные измерений вход-выходных случайных процессов нестационарны, то производится процедура стационаризации с помощью взятия разностей требуемого порядка [2; 6].

Графики структурных функций входного и выходного процессов приведены на рис. 3 и 4 соответственно. На основании значений $C_x(k\Delta t)$ была составлена идентифицирующая матрица (2) и аппроксимирована непрерывной дробью модель структурной функции входного процесса:

$$G_{Cx}(z)=\frac{0.756z^{-1}+0.643z^{-2}}{1-0.290z^{-1}}.$$

ДПФ имеет нуль $z^{н}$=- 0.850 и полюс $z^{п}$= 0.290, на основании значений которых можно сделать вывод об устойчивости модели и, следовательно, – о стационарности входного процесса.

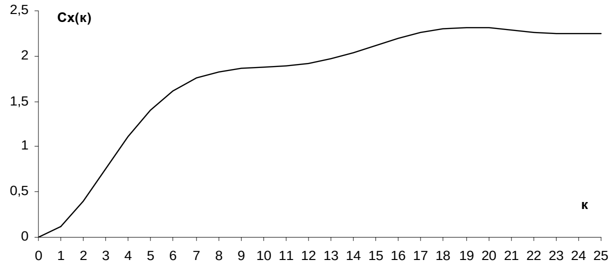

Рис. 3. ***Структурная функция*** $C_x(k\Delta t)$

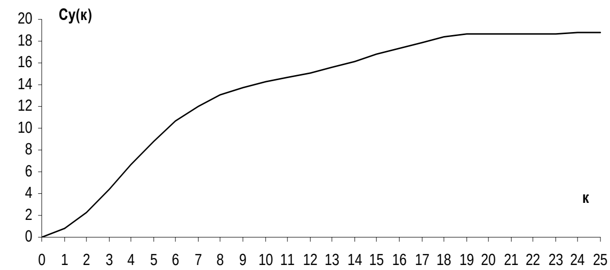

Рис. 4. ***Структурная функция*** $C_y(k\Delta t)$

Модель структурной функции $C_y(k\Delta t)$ имеет вид:

$$G_{Cy}(z)=\frac{4.362z^{-1}+4.110z^{-2}}{1-0.496z^{-1}}.$$

Все нули и полюса находятся внутри единичного круга, следовательно, выходной процесс стационарен.

Таким образом, в результате выполнения ***1 этапа*** методики идентификации установлено, что вход-выходные процессы являются стационарными.

2 этап. *Проверка на однородностьпо корреляционной функциивход-выходных случайных процессов.* Реализация стационарного входного процесса по принципу дихотомии разбивается на 2 интервала n^1 и n^2 с целью получения на каждом из них модели структурной функции с помощью модифицированного алгоритма В. Висковатова [6]. В случае совпадения моделей на интервалах n^1 и n^2 по структуре и параметрам с некоторой заданной вероятностью можно утверждать, что однородность входного случайного процесса не нарушается. В противном случае следует продолжить применение принципа дихотомии до совпадения моделей на интервалах. Так как в процессе решения задачи SP-идентификации стохастического объекта следует использовать причинно-следственный принцип системного анализа, это означает, что для проверки однородности достаточно исследовать только реализацию входного процесса. Если однородность входного процесса не нарушается, то выходной процесс также является однородным. В противном случае на интервалы неоднородности разбивается реализация и входного, и выходного процессов.

Для входного процесса на интервалах $n^1 = [1,148]$ и $n^2 = [149,296]$ были получены модели структурных функций (5) и (6) соответственно:

$$G_{Cx1}(z) = \frac{0.741z^{-1} + 0.648z^{-2}}{1 - 0.402z^{-1}}, \tag{5}$$

$$G_{Cx2}(z) = \frac{0.676z^{-1} + 0.656z^{-2}}{1 - 0.372z^{-1}}. \tag{6}$$

Модели (5) и (6) однозначно совпадают по структуре, однако несколько отличаются по параметрам. Для уточнения результата проводилась дополнительная проверка на независимость остатков моделей (5) и (6) с помощью критерия серий [1]. Для уровня значимости $\alpha = 0.05$ гипотеза о независимости остатков моделей принимается. Следовательно, с доверительной вероятностью 95 % можно утверждать, что входной процесс работы газовой печи однороден. Так как входной процесс является однородным, то и выходной процесс работы газовой печи тоже является однородным.

В результате применения ***2 этапа*** методики установлено, что вход-выходные процессы являются однородными.

3 этап. *Вычисление статистических характеристик вход-выходных стационарных случайных процессов.* Корреляционная функция $R_{xx}(k\Delta t)$ входного процесса представлена на рис. 5, а взаимная корреляционная функция вход-выходных сигналов $R_{xy}(k\Delta t)$ – на рис. 6. Интервал корреляции входного процесса $x(k\Delta t)$ согласно [1, 7] $\tau_{кор} > 15 \cdot \Delta t = 15 \cdot 9 = 135$ с.

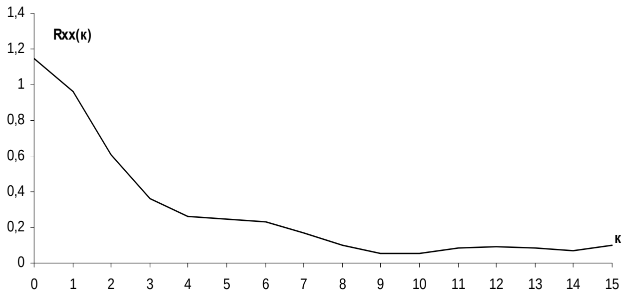

Рис. 5. ***Корреляционная функция $R_{xx}(k\Delta t)$***

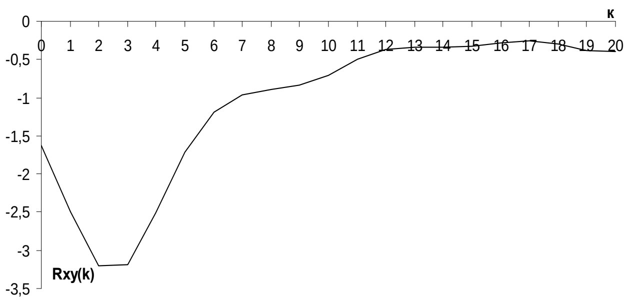

Рис. 6. ***Взаимная корреляционная функция $R_{xy}(k\Delta t)$***

4 этап. *Получение модели идентифицируемого объекта.* При помощи модифицированного алгоритма В. Висковатова [6] до появления нулевой строки заполняется идентифицирующая матрица:

$$\begin{array}{c} (-1)-\text{строка} \\ (0)-\text{сторока} \\ 1-\text{сторока} \\ \ldots \\ \ldots \\ m-\text{сторока} \\ \ldots \end{array} \begin{pmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(\Delta t) & R_{xx}(2\Delta t) & \ldots & R_{xx}(n\Delta t) & \ldots \\ R_{xy}(0) & R_{xy}(\Delta t) & R_{xy}(2\Delta t) & \ldots & R_{xy}(n\Delta t) & \ldots \\ \alpha_1(0) & \alpha_1(\Delta t) & \alpha_1(2\Delta t) & \ldots & \alpha_1(n\Delta t) & \ldots \\ \alpha_2(0) & \alpha_2(\Delta t) & \alpha_2(2\Delta t) & \ldots & \alpha_2(n\Delta t) & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \alpha_m(0) & \alpha_m(\Delta t) & \alpha_m(2\Delta t) & \ldots & \alpha_m(n\Delta t) & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{pmatrix}, \tag{7}$$

элементы которой последовательно рассчитываются с помощью соотношения (3), где $\alpha_{-1}(n\Delta t) = R_{xx}(n\Delta t)$, $\alpha_0(n\Delta t) = R_{xy}(n\Delta t)$, m=1,2,3,..., а n=0,1,2,... Тогда элементы первого столбца матрицы (7) позволяют получить непрерывную дробь

$$G(z) = \cfrac{R_{xy}(0)/R_{xx}(0)}{1 + \cfrac{\alpha_1(0)z^{-1}}{1 + \cfrac{\alpha_2(0)z^{-1}}{1 + \ldots}}}, \tag{8}$$

свернув которую можно получить ДПФ объекта. В случае ненулевых начальных условий выражение (8) будет представлять собой идентифицирующую функцию [4].

Непрерывную модель объекта получают на основе взаимно однозначного отображения s- и z-плоскостей [6]

$$s = \frac{1}{\Delta t}\ln|z| + i\frac{1}{\Delta t}\arg z. \qquad (9)$$

Поскольку $R_{xy}(0) = 1.148 \neq 0$, то идентифицирующая функция на основе (7) принимает вид:

$$G(z) = \frac{-1.422 + 2.274z^{-1} - 1.288z^{-2}}{1 - 1.895z^{-1} + 1.055z^{-2}}. \qquad (10)$$

Нули идентифицирующей функции равны $z^{н}_{1,2} = 0.800 \pm 0.516i$, а полюса – $z^{п}_{1,2} = 0.948 \pm 0.397i$. На основании (9) полюса в z-плоскости соответствуют полюсам в s-плоскости $s^{п}_{1,2} = -0.005 \pm 0.044i$. Нули идентифицирующей функции в s-плоскости соответствуют значениям $s^{н}_{1,2} = -0.011 \pm 0.064i$.

5 этап. *Реализация принципа вариации шага дискретизации.* Принцип вариации шага дискретизации является достаточным условием взаимно однозначного соответствия между непрерывным объектом и дискретными моделями [6]. Принцип вариации определяет качество идентификации и осуществляется в форме децимации значений $R_{xx}(k\Delta t)$ и $R_{xy}(k\Delta t)$ [6], после этого осуществляется возврат к ***этапу 4.*** Если нули и полюса непрерывных передаточных функций (НПФ), полученные до и после децимации, совпадают, то на основании условия SP-идентифицируемости [6] можно утверждать, что математическая модель объекта восстановлена достоверно. В противном случае необходимо уменьшить начальный шаг дискретизации технологических средств измерения и вернуться к ***этапу 1.*** Если же начальный шаг дискретизации не может быть уменьшен, то оценить истинные свойства непрерывного объекта не представляется возможным, и для оценки качества идентификации необходимо воспользоваться классическими критериями [1; 2].

После децимации модель стохастического объекта принимает вид:

$$G(z) = \frac{-1.422 + 0.472z^{-1} - 0.873z^{-2}}{1 - 1.022z^{-1} + 0.463z^{-2}}.$$

Идентифицирующая функция имеет нули, равные $z^{н}_{1,2} = 0.166 \pm 0.766i$, и полюса $-z^{п}_{1,2} = 0.511 \pm 0.449i$, которые соответствуют нулям и полюсам в s-плоскости: $s^{н}_{1,2} = -0.027 \pm 0.075i$, $s^{п}_{1,2} = -0.043 \pm 0.040i$.

На основании этих результатов можно сделать вывод, что полюса и нули в s-плоскости для $\Delta t = 9$ с и $\Delta t = 18$ с совпадают с некоторой погрешностью. Следовательно, полученная модель (10) адекватна идентифицируемому объекту и в дальнейшем может использоваться для прогнозирования, мониторинга, контроля и диагностики процессов газовой печи.

Литература

1. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 464 с.
2. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.
3. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
4. Идентифицирующая функция и ее свойства / В. Я. Карташов [и др.] // Сборник научных трудов VII Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве - AS2009». – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 399 – 405.
5. Карташов, В. Я. Непрерывные дроби (определения и свойства) / В. Я. Карташов. – Кемерово: Изд-во Кемеровского госуниверситета, 1999. – 88 с.
6. Карташов, В. Я. Идентификация стохастических объектов: учебное пособие / В. Я. Карташов, М. А. Новосельцева. – Кемерово, 2010. – 108 с.
7. Романенко, А. Ф. Вопросы прикладного анализа случайных процессов / А. Ф. Романенко, Г. А. Сергеев. – М.: Советское радио, 1968. – 247 с.

Информация об авторе:

Новосельцева Марина Александровна – кандидат технических наук, доцент математического факультета кафедры автоматизации исследований и технической кибернетики КемГУ, 8-906-926-70-00, aanov@pochta.ru.

Marina A. Novoseltseva – Candidate of Technical Science, Assistant Professor at the Department of Research Automation and Technical Cybernetics, Kemerovo State University

Статья поступила в редколлегию 30.01.2014 г.