УДК 674.047.3:519.711.2

М. В. Сырец, аспирант (БГТУ)

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАМЕРЫ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В статье рассматривается один из способов получения математической модели камеры для конвективной сушки древесины – параметрическая идентификация поисковым методом. При этом математическая модель объекта по каждому из каналов ищется в виде конечного интегрального ряда Вольтерра. Идентификация заключается в поиске коэффициентов в выражениях ядер ряда. Для этого ряд записывается в дискретном виде. Задают его порядок и вид искомых ядер, выбирают критерий оптимальности – качества идентификации и метод его оценки. Также проводится определение градиента этого критерия. Полученные значения используются для пересчета величин искомых коэффициентов при помощи алгоритма адаптации. Для реализации алгоритма также решаются вопросы сходимости и завершения процесса идентификации. В статье приводится блок-схема рассмотренного алгоритма.

The article discusses one way of obtaining a mathematical model of the camera for the convective drying of wood – the parametric identification by search methods. The mathematical model of the object for each of the channels sought in the form of a finite number of integral Volterra. Identification is to identify factors in terms of nuclei number. For this series can be written in discrete form. Given by its order and type of the desired nuclei chosen optimality criterion – the quality of identification and method of its evaluation. Also being identified gradient of this criterion. The values obtained are used to recalculate the values of unknown coefficients using the adaptation algorithm. For the realization of the algorithm are also addressed issues of convergence and complete the identification process. The article gives a block diagram of the considered algorithm.

Введение. Получение динамической математической модели процесса сушки древесины представляет собой сложную задачу [1].

Детерминированный метод получения модели не подходит по причине наличия большого количества не поддающихся учету влияющих возмущений. Также отсутствует возможность определения модели объекта методом тестовых воздействий.

Поэтому для идентификации камеры остается воспользоваться методом пассивного эксперимента. Его сущность заключается в записи входных и выходных параметров объекта во время протекания реального процесса сушки древесины с последующей обработкой данных. При этом для поиска параметров модели воспользуемся поисковым методом.

Метод имеет ряд недостатков: отсутствие единой теории и неприменимость разных методов к различным классам систем, сложный математический аппарат, более низкая точность. Среди достоинств можно выделить отсутствие необходимости дополнительно влиять на объект, а значит, «хорошо проработанный» алгоритм идентификации можно «безболезненно» интегрировать в существующую систему управления и использовать для ее адаптации в случае изменения параметров объекта.

Основная часть. Одним из наиболее универсальных подходов к математическому моделированию нелинейных динамических систем типа «вход-выход» является представление отклика системы на внешнее воздействие в виде конечной суммы интегростепенного ряда Вольтерра.

$$y(t)=\int_0^t K_1(t,\ \tau_1)x(\tau_1)d\tau_1+$$
$$+\int_0^t\int_0^t K_2(t,\ \tau_1,\ \tau_2)x(\tau_1)x(\tau_2)d\tau_1 d\tau_2+\ldots+$$
$$+\int_0^t\ldots\int_0^t K_N(t,\ \tau_1,\ \ldots,\tau_N)\prod_{i=1}^{N}x(\tau_i)d\tau_i, \qquad (1)$$

где под $y(t)$ понимается отклонение отклика динамической системы от своего стационарного значения в результате подачи на вход возмущения $x(t)$. При этом предполагается непрерывная зависимость $y(t)$ от $x(t)$.

Функции K_1, K_2, ..., K_N называются ядрами Вольтерра, являются переходными характеристиками динамической системы и подлежат идентификации [2]. Порядок интеграла – N, его увеличение повышает точность модели, но усложняет работу с ней.

Выражение (1) является обобщением интеграла свертки и позволяет учитывать нелинейные свойства объектов (для интегралов второго и выше порядков). Физический смысл ряда Вольтерра заключается в том, что он является суммой линейной свертки – линейной реакции на импульсное воздействие и нелинейных реакций на i импульсов с задержкой τ_i. При этом модель объекта можно представить в виде параллельного соединения линейного и нелинейных импульсных переходных функций (рис. 1).

Ядра Вольтерра для физически реализуемых систем обладают следующими свойствами:

1) выходной сигнал зависит только от предыстории входного сигнала, при этом $K_i(\tau_1, \ldots, \tau_i) = 0$ для $\tau_k < 0$, $k = 1\ldots i$;

2) все устойчивые объекты имеют конечную память при увеличении τ_j, поэтому $\lim\{K_i(\tau_1, \ldots, \tau_i)\} = 0$ при $\tau_k \to \infty$, $k = 1\ldots i$;

3) $K_i(\tau_1, \ldots, \tau_i)$ является симметричной функцией или может быть симметризована [3].

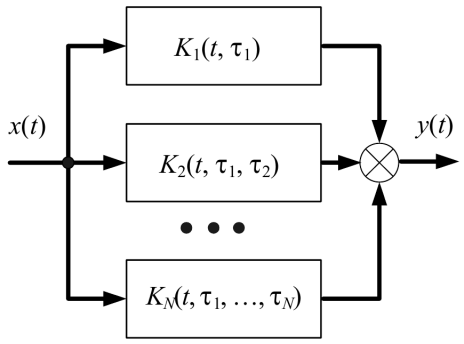

Рис. 1. Структурная схема модели объекта

В случае дискретной системы можно воспользоваться функциональным рядом Вольтерра [4]:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{\infty} K_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m_1=0}^{\infty}\sum_{m_2=0}^{\infty} K_2(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) + \ldots + \sum_{m_1=0}^{\infty}\ldots\sum_{m_N=0}^{\infty} K_N(m_1, \ldots, m_N)\prod_{i=1}^{N} x(n-m_i), \quad (2)$$

где n – номер шага дискретизации сигнала; m_1, m_2, …, m_N – количество тактов задержки между входным воздействием и реакцией выхода.

Поскольку отсутствует возможность подавать на входы объекта тестовые воздействия, можно использовать лишь запись состояний входов и выходов объекта во время протекания процесса сушки древесины. Значит, для идентификации ядер интегралов (или сумм) Вольтерра воспользуемся поисковым алгоритмом или методом стохастической аппроксимации, т. е. будем уточнять значения коэффициентов ядер при получении новых значений выхода и входа, пользуясь градиентным методом.

Выражение (2) можно записать более кратко:

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{m_1,\ldots,m_i=0}^{\infty} K_i(m_1, \ldots, m_i)\prod_{i=1}^{N} x(n-m_i). \quad (3)$$

В формуле (3) внутренний знак суммы означает многократное суммирование, чему соответствуют различные индексы суммирования. Будем теперь аппроксимировать ядра конечной суммой [4]:

$$\hat{K}_i(m_1, \ldots, m_i) = \sum_{j=1}^{M} c_{ij}\varphi_j(m_1, \ldots, m_i), \quad (4)$$

где c_{ij} – значения коэффициентов ядер Вольтерра, подлежащие определению, $\varphi_j(m_1, \ldots, m_i)$ – набор линейно независимых функций. Тогда оценка $y(n)$ получается в следующем виде [4]:

$$\hat{y}(n) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} c_{ij}Y_{ij}(x(n)). \quad (5)$$

В формуле (5) величины

$$Y_{ij}(x(n)) = \sum_{m_1,\ldots,m_i}^{\infty} \varphi_j(m_1, \ldots, m_i)\prod_{i=1}^{N} x(n-m_i) \quad (6)$$

можно рассматривать как стандартные реакции на входной сигнал $x(n)$. Индекс M – это количество слагаемых конечной суммы, которой заменяют интеграл. Увеличение этого числа повышает точность расчета, а уменьшение – его скорость. В векторной форме соотношение (5) будет выглядеть так [4]:

$$\hat{y} = c^T Y(x), \quad (7)$$

где c, Y – матрицы размерностью $N \times M$.

Теперь для определения оптимального вектора $c = c^*$, а значит, и ядер (4) составим функционал, являющийся критерием оптимальности идентификации:

$$J(c) = M\left\{F\left(y - \hat{y}\right)\right\}, \quad (8)$$

или, в силу (7),

$$J(c) = M\{F(y - c^T Y(x))\}. \quad (9)$$

Если функция $F(\cdot)$ дифференцируема, то можно найти ее градиент по c:

$$Grad_c\{F(y - c^T Y(x))\} = -F'(y - c^T Y(x))Y(x). \quad (10)$$

Тогда оптимальный вектор $c = c^*$ можно рассчитать с помощью алгоритма адаптации [4]:

$$c[n] = c[n-1] + \gamma[n] \times F'(y[n-1] - c^T[n-1]Y(x[n]))Y(x[n]). \quad (11)$$

Здесь $\gamma[n]$ – это некий скаляр, определяющий величину очередного шага, его значение в общем случае зависит от номера шага.

Реализация алгоритма (11) вызовет некоторые вопросы:

– необходимо обеспечение сходимости алгоритма, чего можно достигнуть, снижая значение γ с каждым новым шагом;

– в случае стохастического объекта точное достижение c^* будет невозможно. А значит, будет необходим механизм осреднения полученных

значений вектора параметров c на нескольких шагах, а завершать адаптацию нужно будет при достижении некоторой оптимальной области – окрестностей значений c^*.

При идентификации камеры для конвективной сушки древесины следует определить ядра рядов Вольтерра по шести каналам (рис. 2).

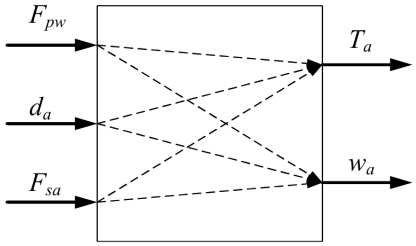

Рис. 2. Информационные каналы объекта

Здесь F_{pw}, d_a, F_{sa} (входные управляющие воздействия) – расход теплоносителя, степень открытия вентиляционных каналов и расход воды на орошение соответственно; T_a, w_a (выходные параметры) – температура и влажность воздуха в камере соответственно [1].

Рассмотрим один из основных каналов: расход теплоносителя – температура в камере. Более ранние разработки по сушке древесины [5] показывают, что передаточную функцию по этому каналу нужно искать в виде

$$W(p) = \frac{a(p+b)}{(p+\alpha)(p+\beta)}. \qquad (12)$$

Следовательно, ядро первого порядка будет иметь следующий вид:

$$K_1[n] = \frac{a}{\beta-\alpha} \times$$
$$\times \left[(b-\alpha)e^{-\alpha n} - (b-\beta)e^{-\beta n}\right], \qquad (13)$$

где a, b, α, β – параметры, подлежащие идентификации.

Составим из них вектор коэффициентов c.

Ядра более высоких порядков можно искать как произведения переходных функций различных элементарных звеньев, оставляя те, которые дают меньшую погрешность идентификации.

Оценка выходного сигнала определяется выражением (5). В качестве критерия оптимальности возьмем квадрат отклонения оценки выходной величины от ее измеренного значения:

$$F[n] = \left(y[n] - \hat{y}[n]\right)^2, \qquad (14)$$

где n – номер шага адаптации.

Оценку градиента критерия будем получать, пользуясь выражением

$$Grad_c\{F[n]\} = \frac{F[n]-F[n-1]}{c[n]-c[n-1]}. \qquad (15)$$

Сразу видно, что в начале адаптации необходимо будет задаваться значениями вектора c на нулевом и первом шаге.

Новые значения элементов c рассчитаем при помощи формулы

$$c[n] = c[n-1] + \gamma[n]Grad_c\{F[n]\}. \qquad (16)$$

Подставив (15) в (16), получим

$$c[n] = c[n-1] + \gamma[n]\frac{F[n]-F[n-1]}{c[n]-c[n-1]}. \qquad (17)$$

Для обеспечения сходимости алгоритма необходимо снижать величину γ с каждым новым шагом адаптации. Для этого воспользуемся следующим выражением:

$$\gamma[n] = \frac{\gamma[0]}{n^g}. \qquad (18)$$

Величина g будет задавать скорость снижения коэффициента.

При практической реализации алгоритма возникает проблема определения шага, на котором поиск c^* можно остановить. В случае стохастической системы зависимость c от номера шага может иметь значительную случайную составляющую. Поэтому необходимо сглаживать последовательность $c[n]$, например, методом скользящего среднего:

$$c_s[n] = \frac{1}{T}\sum_{\nu=1}^{T} c[n-\nu], \qquad (19)$$

где T – величина памяти фильтра.

После этого следует производить сравнение значения c на текущем шаге с его значением на шаге предыдущем и при выполнении условия [4]

$$\left\| c_s[n] - c_s[n-1] < \varepsilon \right\|, \qquad (20)$$

останавливать процесс поиска.

Если же условие не выполняется, начинается следующий шаг поиска и т. д.

Блок-схема поискового алгоритма параметрической идентификации камеры для конвективной сушки древесины представлена на рис. 3.

Приведенный алгоритм требует предварительного задания некоторых параметров:

1) N задает порядок ряда Вольтерра, которым аппроксимируется модель объекта (3);

2) M определяет количество шагов, которыми ограничивается влияние входного импульса на выход объекта;

3) $c[0]$, $c[1]$ задают вектор первоначальных значений искомых коэффициентов, а также направление и начальную скорость поиска;

4) $\gamma[0]$ и g определяют соответственно начальное значение и скорость убывания весового коэффициента при градиенте критерия качества в выражении (17);

5) T – размер памяти сглаживающего фильтра (19), его увеличение позволяет задерживать шумы более низкой частоты, уменьшая при этом скорость схождения алгоритма;

6) ε определяет зону допустимых значений в окрестности c^*, при достижении которой процесс идентификации останавливается.

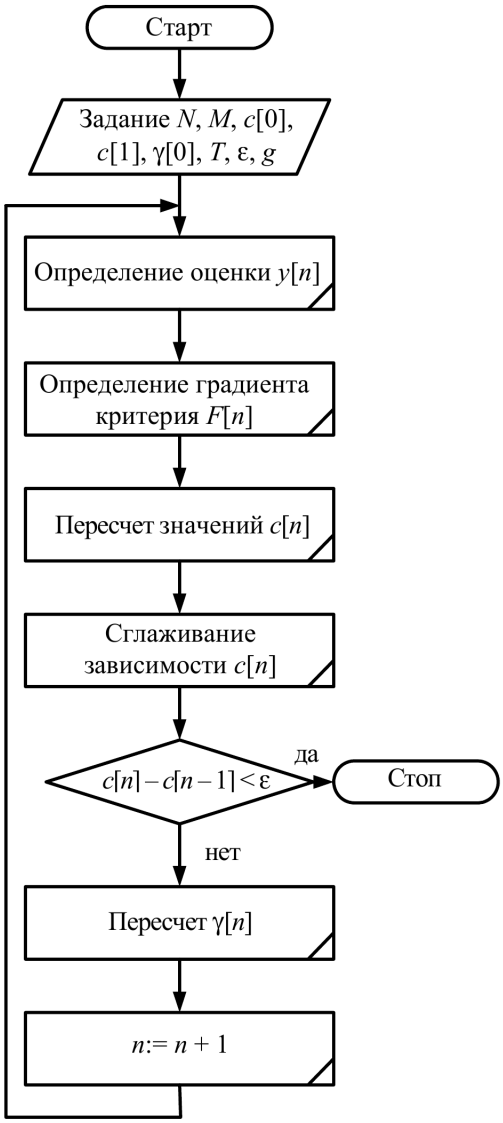

Рис. 3. Блок-схема алгоритма идентификации

Заключение. Параметрическая идентификация камеры для конвективной сушки древесины представляет собой сложную задачу. Математическая модель объекта по каждому из каналов ищется в виде конечного интегрального ряда Вольтерра. Идентификация заключается в поиске коэффициентов в выражениях ядер ряда. Для этого ряд записывают в дискретном виде, задают его порядок и вид искомых ядер, выбирают критерий оптимальности – качества идентификации и метод его оценки. Также проводится определение градиента этого критерия. Полученные значения используются для пересчета величин искомых коэффициентов при помощи алгоритма адаптации.

Для реализации алгоритма также решают вопросы сходимости и завершения процесса идентификации. При этом возникает необходимость задания некоторых начальных параметров. Применение рассмотренного алгоритма позволит синтезировать адаптивные системы управления процессом конвективной сушки древесины.

Литература

1. Сырец, М. В. Динамическая математическая модель камеры для конвективной сушки пиломатериалов с учетом размытых параметров / М. В. Сырец // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 113–116.

2. Сидоров, Д. Н. Моделирование нелинейных нестационарных динамических систем рядами Вольтерра: идентификация и приложения / Д. Н. Сидоров // Сибирский журнал индустриальной математики – 2000. – Т. III, № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mi.mathnet.ru/sjim96. – Дата доступа: 12.02.2011

3. Теория управления: учебник для вузов / А. А. Алексеев [и др.]. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 434 с.

4. Цыпкин, Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

5. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов [и др.]; под общ. ред. Е. С. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 304 с.

Поступила 26.02.2011