УДК 004.021: 004.942

И. М. Карраскель, аспирант (БГУИР);
И. Ф. Кузьмицкий, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
И. В. Акиншева, ассистент (МГУП)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА КАРБАМИДА И ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

В данной статье рассмотрено построение самонастраивающихся моделей для существенно нелинейных объектов, которыми являются химические реакторы процесса поликонденсации полиэтилентерефталата и процесса производства карбамида. Согласно выделенным каналам управления, в ходе экспериментов при изменении управляющих параметров получены значения выходных параметров объектов. Для идентификации реакторов, как существенно нелинейных объектов, использованы функциональные ряды Вольтерра и Вольтерра – Лагерра. При аппроксимации функциональными рядами решена основная задача поиска структуры подынтегральных выражений функциональных рядов. Определены преимущества идентификации нелинейных многопараметрических объектов рядами такого рода. В качестве ядер предложены апериодические звенья второго порядка и линейно независимые многочлены Лагерра, определены коэффициенты самонастройки системы с учетом значений параметров процессов.

This paper considers the construction of self-adjusting models for essentially nonlinear objects, which are chemical reactors polycondensation process and manufacturing process urea. According dedicated control channels, during the experiments when the control parameters, the values of output parameters of objects. For the identification of reactor as essentially nonlinear objects used functional series Volterra and Volterra – Laguerre. At approximation function series solved the basic problem of finding the structure of the integrals series. Identify the benefits of identification of nonlinear multivariable objects such rows. As kernels proposed aperiodical units of the second order linearly, independent Laguerre polynomials are defined coefficients bootstrapping system based on the values of process parameters.

Введение. В работе представлено решение задачи идентификации, связанной с созданием математических моделей объектов химико-технологических процессов производства карбамида и полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

Построение математической модели объекта может производиться несколькими методами: аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим [1]. В данной работе используется экспериментальный метод.

В общем виде задача идентификации заключается в определении оператора объекта, преобразующего входные воздействия в выходные. В связи с этим выделяют задачи структурной и параметрической идентификации. После того как математическая модель объекта определена, проводят параметрическую идентификацию, заключающуюся в определении числовых параметров.

Целью работы является идентификация динамических характеристик химического реактора. Параметрическая оценка основывается на применении модели Вольтерра для идентификации характеристик реактора поликонденсации и Вольтерра – Лагерра для идентификации характеристик реактора производства карбамида.

При достижении цели были решены следующие задачи:

1) выделены основные переменные рассматриваемых объектов управления, влияющие на ход технологических процессов;

2) получены экспериментальные данные по каналам управления согласно разработанной методике проведения эксперимента;

3) выполнена идентификация выходных переменных функциональными рядами Вольтерра и Вольтерра – Лагерра, вычислены коэффициенты настройки модели;

4) произведено сравнение ошибок идентификации динамических характеристик для выявления структуры математической модели рассматриваемых объектов.

Основная часть. Основными параметрами, влияющими на качество получаемого карбамида, являются температура $T(t)$ и своевременный отгон вещества, при избытке которого протекают основные реакции внутри химических реакторов.

В реактор карбамида входят изнутри реактивы по следующим фазам: жидкая фаза, состоящая из аммиака (NH_3) и карбамата аммония (NH_2COONH_4) в растворе; газообразная фаза, состоящая из диоксида углерода (CO_2).

Для получения карбамида необходимо, чтобы карбамат обезвоживался. Процесс обезвоживания ведет к эндотермической реакции. Погло-

щенное тепло берется из тепла, образованного на стадии получения карбамата.

Входными параметрами для реактора предварительной поликонденсации (ППК) являются: количество поступающего дигликольтерефталата (ДГТ) $Q_0(t)$, вязкость поступающего ДГТ $\nu_0(t)$; выходными параметрами – количество полученного полимера $Q_1(t)$, вязкость полученного полимера $\nu_1(t)$; управляющими воздействиями – температура в реакторе $T_1(t)$ и давление в реакторе ППК $P_1(t)$.

Для проведения исследования рассмотрим реактор ППК в качестве объекта управления.

На рис. 1 представлен график изменения во времени вязкости ПЭТФ при изменении температуры и давления в реакторе ППК.

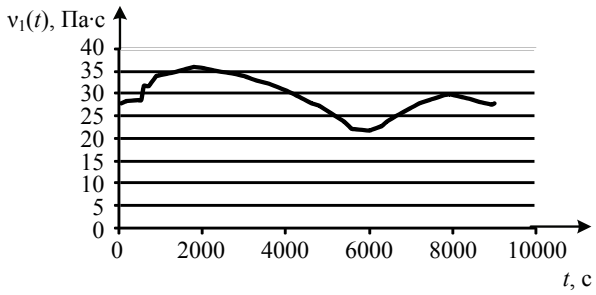

Рис. 1. График изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации

Для аппроксимации полученных зависимостей выбраны функциональные ряды Вольтерра. Модель рядов Вольтерра инвариантна и во времени принимает следующую форму [2]:

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^{N-1} h_1(\tau)u(t-\tau) + \sum_{\tau_1=0}^{N-1}\sum_{\tau_2=0}^{N-1} h_{1,2}(\tau_1,\tau_2)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2) + \ldots, \quad (1)$$

где $y(t)$ – выходной сигнал; τ – сдвиг по времени, с; $h_1(\tau)$, $h_{1,2}(t)$ – ядра интегралов; $u(t-\tau)$ – сигнал управления.

Так как значения выходных параметров и параметров управления получены в результате проведения эксперимента, то главной задачей является определение аналитического вида ядер, а также параметризация $\underline{y}(t)$ относительно $y(t)$.

Запишем выражение для интеграла первого порядка:

$$y_{\text{лин}}(t) = \int_0^t h_1(\tau)u(t-\tau)d\tau. \quad (2)$$

В качестве ядер интегралов использовались весовые функции основных динамических звеньев: интегрирующего, дифференцирующего, апериодического звена первого порядка, апериодического звена второго порядка, усилительного, интегро-дифференцирующего.

Оценку погрешности выбранного для аппроксимации выражения проводили, сравнивая экспериментальные значения с аппроксимированными выражением (2), исходя из условия:

$$(y(t) - \overline{\overline{y}}(t))^2 \to \min. \quad (3)$$

То есть квадрат разности между экспериментально полученными значениями и значениями, полученными аналитическим путем, должен стремиться к минимуму (обозначим значение выражения (3) через φ).

Наиболее точная аппроксимация (φ = 0,93) осуществляется, когда в качестве ядра интеграла Вольтерра принято апериодическое звено второго порядка [1].

При подаче на объект двух управляющих переменных: изменение температуры в реакторе $T_1(t)$ и давления в реакторе ППК $P_1(t)$ – вид линейного члена разложения (2) для вязкости будет следующим:

$$\nu_1(t) = \nu_0(t) + A_1\int_0^t (e^{p_1\tau_1} - e^{p_2\tau_1})T_1(t-\tau_1)d\tau_1 + A_2\int_0^t (e^{p_3\tau_2} - e^{p_4\tau_2})P_1(t-\tau_2)d\tau_2. \quad (4)$$

где $A_{1,2}$ – коэффициенты аппроксимации; $p_{1,2,3}$ – коэффициенты настройки модели, $с^{-1}$; $\tau_{1,2}$ – время запаздывания динамического элемента, реализующего физическое воздействие на объект исследования.

На рис. 2 представлена аппроксимация выходной переменной интегральным рядом Вольтерра первого порядка.

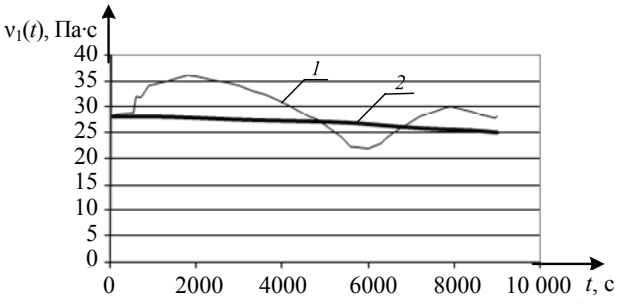

Рис. 2. Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации: *1* – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученного в результате проведения эксперимента; *2* – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученного на основе выражения аппроксимации (4)

В выражении (4) в качестве ядер интегралов использованы апериодические звенья второго порядка [2].

Исследуем также произведение интегралов Вольтерра первого рода и при этом учтем, что данное произведение является интегралом Вольтерра второго рода.

Квадратичная составляющая интегрального ряда Вольтерра имеет следующий вид:

$$y_{\text{квадр}}(t)=\int_0^t\int_0^t h_2(\tau_1,\tau_2)u_1(t-\tau_1)\times$$
$$\times\, u_2(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2. \qquad (5)$$

В (5) учитывается взаимное влияние управляющих параметров на выход объекта.

Таким образом, складывая выражения (2) и (5), с учетом управляющих параметров получим следующие выражения для аппроксимации рядами Вольтерра второго порядка [3] вязкости на выходе из реактора ППК:

$$\nu_1(t)=\nu_0(t)+A_1\int_0^t(e^{p_1\tau_1}-e^{p_2\tau_1})T_1(t-\tau_1)d\tau_1+$$
$$+A_2\int_0^t(e^{p_3\tau_2}-e^{p_4\tau_2})P_1(t-\tau_2)d\tau_2+$$
$$+A\int_0^t\int_0^t(e^{p_5\tau_1}-e^{p_6\tau_1})(e^{p_7\tau_2}-e^{p_8\tau_2})\times$$
$$\times T_1(t-\tau_1)P_1(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2. \qquad (6)$$

Реализация составленной модели (6) представлена на рис. 3.

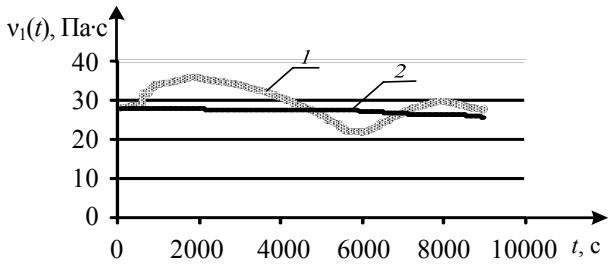

Рис. 3. Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации: *1* – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученного в результате проведения эксперимента, *2* – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученного на основе выражения аппроксимации (6)

В модели реактора производства карбамида, аппроксимированной рядами Вольтерра – Лагерра, уравнения Лагерра используются в качестве ядер Вольтерра. Нелинейная система (1) может быть представлена в виде фильтров с обобщенными линейно-независимыми многочленами Лагерра [4]:

$$y(k)=\sum_{i=1}^{L}C_1(i)l_1(k)+\sum_{i_1=1}^{L}\sum_{i_2=1}^{L}C_2(i,j)\times$$
$$\times\, l_i(k)l_j(k), \qquad (7)$$

где k = 0, 1, 2, ... N – количество экспериментальных значений; $C_1(i)$ и $C_2(i, j)$ – коэффициенты аппроксимации; $l_i(k)$, $l_j(k)$ – выходные параметры фильтров Лагерра.

Выходной параметр системы (7) можно записать в векторной форме [5]:

$$Y(k)=\left[C_1(i)\right]\left[L_1(k)\right]+\left[C_2(i,j)\right]\left[L_2(k)\right]. \qquad (8)$$

Выходные параметры фильтров Лагерра, применяя входной сигнал, получают в следующем виде:

$$l_i(k)=\sum_{\tau=1}^{N}\varphi_i(k)u(k-\tau). \qquad (9)$$

Векторы $\left[L_1(k)\right]$ и $\left[L_2(k)\right]$ в (8) включают выходные параметры фильтров Лагерра $l_1(k)$, $l_2(k)$, $l_3(k)$, которые описаны выражением (9).

В модели Лагерра функции ортогональных оснований φ_i могут быть определенны в плоскости z, следующей формулой:

$$\varphi_i=\sqrt{(1-a^2)T}\,\frac{(1-az)^i}{(z-a)^i}, \qquad (10)$$

где a – регулируемый параметр, который определяется как полюс Лагерра, T – время выборки; i – порядок многочленов функции ортогонального базиса.

Для уменьшения количества коэффициентов модели Вольтерра применяем принцип ортогональности. Как видно из графиков, представленных на рис. 4, коэффициенты модели зависят от параметра a и от параметра N.

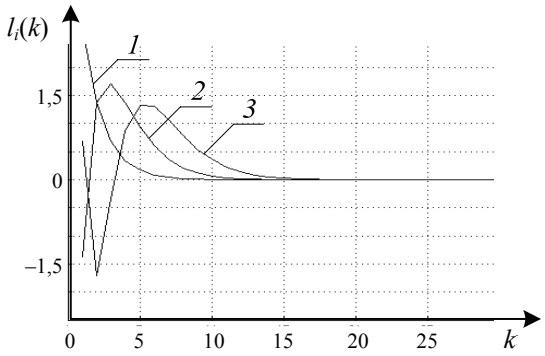

Рис. 4. Многочлены Лагерра второго порядка при a = 0,9, N = 150, T = 10: *1* – $l_1(k)$; *2* – $l_2(k)$; *3* – $l_3(k)$

При a = 0,5 видно, что функция Лагерра стремится к нулю, когда N = 150. При a = 0,9 очевидно, что функции Лагерра стремится к нулю намного медленнее (требуется N > 50). В результате наиболее оптимальными значениями параметров идентификации системы (8) являются:

$$C_i = \begin{pmatrix} 1{,}5233 \\ 0{,}7701 \\ -0{,}5774 \end{pmatrix};\ C_{i,j} = \begin{pmatrix} -0{,}6057 \\ 0{,}7374 \\ -0{,}4357 \end{pmatrix};$$

$$\alpha = 0{,}9;\ T = 150.$$

Температура карбамида на выходе из реактора зависит от давления CO_2 и на входе реактора выражается следующим соотношением:

$$T(k) = \begin{pmatrix} 1{,}5233 \\ 0{,}7701 \\ -0{,}5774 \end{pmatrix}\left[L_1(k)\right] + \begin{pmatrix} -0{,}6057 \\ 0{,}7374 \\ -0{,}4357 \end{pmatrix}\left[L_2(k)\right]. \quad (11)$$

На основе выражения (11) построен график изменения температуры на выходе из реактора получения карбамида, представленный на рис. 5.

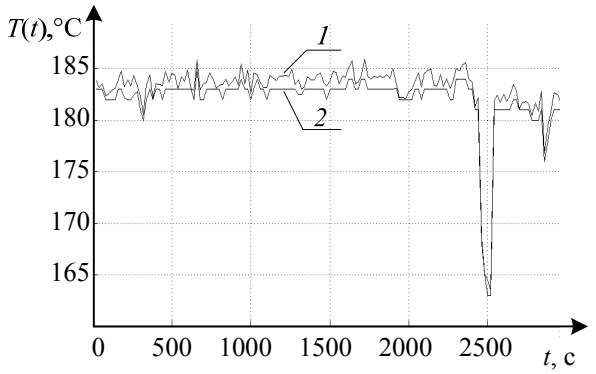

Рис. 5. Влияние температуры на выходе реактора на скорость реакции образования карбамида:
1 – температура на выходе реактора;
2 – температура на выходе реактора, аппроксимированная выражением (11)

Все полученные результаты соответствуют разработанной методике идентификации, из чего следует, что наиболее подходящим методом идентификации, учитывающим рассматриваемые особенности объектов управления, является идентификация с использованием модели Вольтерра и Вольтерра – Лагерра.

Заключение. Разработана методика идентификации параметров процесса производства карбамида методом ортогональных функций на основе фильтров Вольтерра – Лагерра и полиэтилентерефталата интегральными рядами Вольтерра. В результате реализации методики были получены коэффициенты аппроксимации параметров процесса.

При применении в качестве модели реактора поликонденсации интегрального ряда Вольтерра первого порядка величина ошибки составила 2,4%. Добавление квадратичной составляющей ряда снизило дисперсию ошибки до 2,27%.

Коэффициенты аппроксимации модели реактора получения карбамида выбирались из условия, чтобы величина среднеквадратичной ошибки составляла менее 5%.

Использование в качестве аппроксимирующих функций рядов нелинейной структуры приводит к построению математической модели процесса карбамида, обладающей переменными настройками. Достоинство методики заключается в пересчете коэффициентов аппроксимации в случае изменения значений параметров процесса. Разработанный математический аппарат дает предпосылки для синтеза адаптивной системы управления процессом.

Литература

1. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф – М.: Мир, 1975. – 684 с.

2. Doyle, F. J. Identification and control using Volterra models / F. J. Doyle, R. K. Pearson, B. A. Ogunnaike. – London: Springer, 2003. – 314 p.

3. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления: учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.

4. Abhishek, S. Control-relevant system identification using nonlinear Volterra and Volterra-Laguerre models / S. Abhishek. – Pittsburgh, 2006.

5. Dale, A. S. Identification of nolinear control models using Volterra-Laguerre series / A. S. Dale. – University of UTAH, 2010. – 119 p.

Поступила 02.03.2013