

УДК 004.021:004.942

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

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ НА ОСНОВЕ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА

В данной статье рассмотрены химические реакторы процессов поликонденсации и производства карбамида как объекты управления. Выделены основные переменные, влияющие на качество получаемой продукции. Проведена параметрическая идентификация реакторов на основе интегральных рядов Вольтерра первого, второго и третьего порядка по результатам активных экспериментов по снятию динамических характеристик. Аналитически установлена структура подынтегральных выражений функциональных рядов. Определены преимущества идентификации нелинейных многопараметрических объектов функциональными рядами Вольтерра. По величине ошибки идентификации выделены наилучшие из рассматриваемых вариантов структуры математической модели химических реакторов. Приведены результаты моделирования в виде графиков выходных переменных.

This article describes the process of chemical reactors and the polycondensation process of production of urea as objects of control. The basic variables that affect the quality of the products. Conducted parametric identification of reactors on the basis of integral Volterra series of the first, second and third order for the results of active experiments on removal of the dynamic characteristics. Analytically established the structure of the integrands of functional series. Identified the benefits of identification of nonlinear multivariable function objects Volterra series. The magnitude of the error identified identify the best of the considered variants of Comrade structure of the mathematical model of chemical reactors. The results of simulation in the form of graphs of output variables.

Введение. В теории управления задача идентификации заключается в определении оператора объекта, преобразующего входные воздействия в выходные. При этом выделены понятия структурной и параметрической идентификации. Задача структурной идентификации состоит в определении структуры и вида оператора объекта, или, другими словами, вида математической модели объекта. После того как математическая модель объекта определена, проводится параметрическая идентификация, заключающаяся в поиске числовых параметров математической модели. Задачей структурной идентификации является представление реального объекта управления в виде математической модели. Конкретный выбор математической модели зависит от типа объекта управления [1].

При исследовании химических реакторов процессов производства карбамида и поликонденсации полиэтилентерефталата были сделаны выводы о нелинейном характере динамики рассматриваемых объектов. Для структурной идентификации была выбрана модель, основанная на теории функциональных рядов Вольтерра [2].

Поэтому целью исследования является идентификация динамических характеристик химических реакторов функциональными рядами Вольтерра.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

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

– разработана методика проведения активного эксперимента по снятию динамических характеристик химических реакторов;

– проведена идентификация выходных переменных интегральными рядами Вольтерра первого, второго и третьего порядка;

– выполнено сравнение ошибок идентификации динамических характеристик для выявления структуры математической модели рассматриваемых объектов.

Основными переменными, влияющими на качество получаемого полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и карбамида, являются давление, температура и своевременный расход вещества, при избытке которого протекают основные реакции внутри химических реакторов.

Основная часть. Для проведения исследования рассмотрим реактор предварительной поликонденсации (ППК) в качестве объекта управления.

Входными переменными для реактора ППК являются: количество поступающего дигликольтерефталата (ДГТ) $Q_0(t)$, количество катализатора $Q_{кат0}(t)$, вязкость поступающего ДГТ $\nu_0(t)$; выходными переменными – расход паров этиленгликоля $Q_{ЭГ1}(t)$, 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 $P_1(t)$.

Ввиду недостаточной изученности процесса поликонденсации, необходимо провести дополнительные исследования динамических характеристик рассматриваемого объекта. Знание

динамических характеристик дает возможность решить задачу синтеза системы управления процессом поликонденсации. При этом система изменяет свои управляющие сигналы, приспосабливаясь к изменению входных сигналов, внешних воздействий и т. п. Построение систем такого рода требует определения динамических характеристик объекта как в режиме нормального функционирования, так и в режиме внесения незначительных (не ведущих к принципиальным изменениям в процессе) возмущений.

При снятии переходных характеристик испытательный сигнал с амплитудой $0,5A$, $-A$, $1,5A$ наносился с помощью исполнительного механизма резким изменением положения регулирующего органа.

Испытательные сигналы по каждому из выбранных каналов наносились отдельно, а эксперимент проводился в следующей последовательности:

1) изменение положения регулирующего органа на линии подачи динила в реактор предварительной поликонденсации, при этом амплитудное значение расхода изменялось по схеме $0,5A$, $-A$, $1,5A$;

2) по аналогичной схеме производилось изменение положения регулирующего органа на линии подачи азота на орошение этиленгликоля, испаряющегося из реактора предварительной поликонденсации;

3) при внесении возмущений в процесс, протекающий в реакторе предварительной поликонденсации, одновременно наблюдалось изменение динамики в реакторе основной поликонденсации;

4) пункты 1 и 2 были повторены для реактора основной поликонденсации.

В результате проведенных экспериментов было выяснено, что модель исследуемого объекта управления является существенно нелинейной. Оптимальным представляется описание нелинейного объекта с помощью линейных по параметрам моделей, так как линейным объектам присущи следующие свойства:

- возможность явно записать связь между входом и выходом;
- простота описания соединений системы;
- возможность рассмотрения случайных сигналов.

Вышеуказанные свойства необходимо применить и для исследуемого процесса поликонденсации.

Для идентификации существенно нелинейных процессов наиболее полно развиты методы, основанные на линеаризации объектов. Простота и достаточная в ряде случаев точность обеспечили их преимущественное развитие. Однако очень часто рассмотрение объектов в линейном приближении является недостаточным. Данное

положение касается и поликонденсационных процессов, поэтому наиболее подходящим методом идентификации, учитывающим рассматриваемые особенности объекта управления, является идентификация с использованием функциональных рядов Вольтерра.

При использовании в качестве аппроксимирующих функций рядов Вольтерра строится модель с переменными настройками, которая дает предпосылки для синтеза системы управления процессом.

После проведения эксперимента по разработанной методике [3] были построены кривые, отражающие зависимость выходных переменных (вязкости и расхода полиэтилентерефталата) от входных и управляющих переменных.

Всего было сделано десять повторений эксперимента, запись результатов которых велась с использованием регистрирующих устройств. Величина амплитуды A выбиралась для каждого канала в соответствии с допустимыми в рамках регламента отклонениями параметров.

Обработка экспериментальных кривых, которые были сняты при различных испытательных сигналах с амплитудами A_β , выполнена путем их усреднения:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{z} \sum_{\beta=1}^z y_\beta(t), \quad (1)$$

где $y_\beta(t)$ – выходная величина; z – количество повторений эксперимента.

Выражение (1) представляет собой статистическую обработку результатов, полученных в ходе проведения эксперимента.

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения во времени вязкости и расхода полиэтилентерефталата в реакторе ППК.

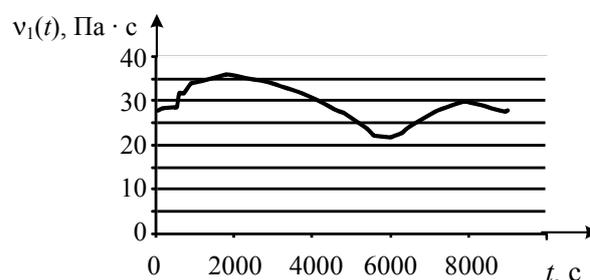


Рис. 1. График изменения вязкости в реакторе предварительной поликонденсации

Для каждого из рабочих режимов установки поликонденсации расход является величиной постоянной, поэтому показания на рис. 2 колеблются относительно среднего значения.

Рассмотрим аппроксимацию рядами Вольтерра первого, второго и третьего порядка динамических характеристик реактора ППК.

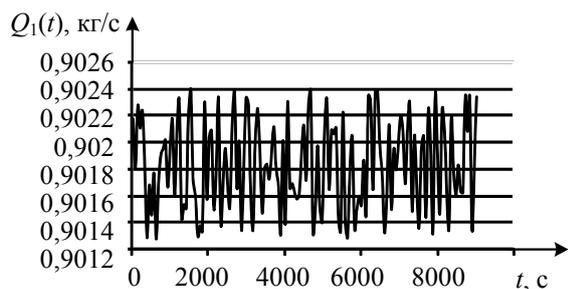


Рис. 2. График изменения расхода полимера на выходе из реактора предварительной поликонденсации

Запишем выражение для интеграла первого порядка:

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

где τ – сдвиг по времени; $h_1(\tau)$ – ядро интеграла; $x(t-\tau)$ – управляющая переменная.

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) будет следующим:

$$v_1(t) = v_0(t) + A_1 \int_0^t (e^{p_1\tau_1} - e^{p_2\tau_1})T_1(t-\tau_1)d\tau_1 + A_2 \int_0^t (e^{p_3\tau_2} - e^{p_4\tau_2})P_1(t-\tau_2)d\tau_2, \quad (3)$$

где $v_0(t)$ – значение вязкости на входе в реактор ППК; A_i – коэффициенты аппроксимации.

В выражении (3) в качестве ядер интегралов использованы апериодические звенья второго порядка [3]. На рис. 3 и 4 представлена аппроксимация выходных переменных интегральным рядом Вольтерра первого порядка.

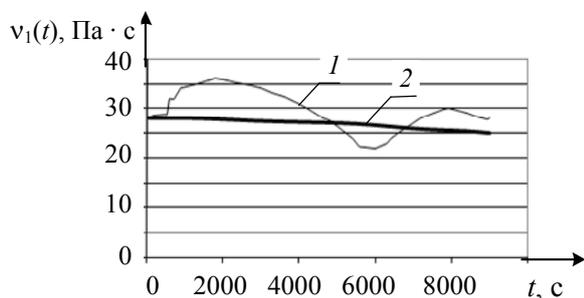


Рис. 3. Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации: 1 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной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

Квадратичная составляющая интегрального ряда Вольтерра имеет следующий вид:

$$y_{\text{квдр}}(t) = \int_0^t \int_0^t h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2. \quad (4)$$

Таким образом, складывая выражения (3) и (4) с учетом управляющих переменных, получим уравнения для аппроксимации рядами Вольтерра второго порядка вязкости и расхода на выходе из реактора ППК.

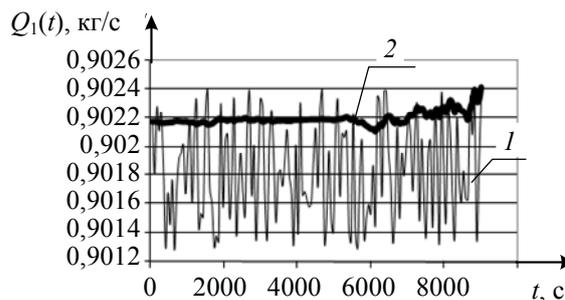


Рис. 4. Графики изменения расхода на выходе из реактора предварительной поликонденсации: 1 – график изменения во времени расхода на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени расхода на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации рядом Вольтерра первого порядка

Необходимо отметить, что, как и в случае интеграла первого порядка, время интегрирования равно времени пребывания расплава на стадии поликонденсации до получения полимера с необходимой молекулярной массой, определяющей его физические характеристики:

$$v_1(t) = v_0(t) + A_1 \int_0^t (e^{p_1\tau_1} - e^{p_2\tau_1})T_1(t-\tau_1)d\tau_1 + A_2 \int_0^t (e^{p_3\tau_2} - e^{p_4\tau_2})P_1(t-\tau_2)d\tau_2 + A_3 \int_0^t \int_0^t (e^{p_5\tau_1} - e^{p_6\tau_1})(e^{p_7\tau_2} - e^{p_8\tau_2}) \times T_1(t-\tau_1)P_1(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2, \quad (5)$$

$$Q_1(t) = Q_0(t) + A_4 \int_0^t (e^{p_9\tau_1} - e^{p_{10}\tau_1})T_1(t-\tau_1)d\tau_1 + A_5 \int_0^t (e^{p_{11}\tau_2} - e^{p_{12}\tau_2})P_1(t-\tau_2)d\tau_2 + A_6 \int_0^t (e^{p_{13}\tau_3} - e^{p_{14}\tau_3})v_1(t-\tau_3)d\tau_3 +$$

$$\begin{aligned}
& + A_7 \int_0^t \int_0^t (e^{p_{15}\tau_1} - e^{p_{16}\tau_1}) T_1(t-\tau_1) (e^{p_{17}\tau_2} - e^{p_{18}\tau_2}) \times \\
& \quad \times P_1(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + A_8 \int_0^t \int_0^t (e^{p_{19}\tau_3} - e^{p_{20}\tau_3}) \times \\
& \quad \times v_1(t-\tau_3) (e^{p_{21}\tau_1} - e^{p_{22}\tau_1}) T_1(t-\tau_1) d\tau_3 d\tau_1 + \\
& \quad + A_9 \int_0^t \int_0^t (e^{p_{23}\tau_3} - e^{p_{24}\tau_3}) v_1(t-\tau_3) \times \\
& \quad \times (e^{p_{25}\tau_2} - e^{p_{26}\tau_2}) P_1(t-\tau_2) d\tau_3 d\tau_2. \quad (6)
\end{aligned}$$

В (5) и (6) задача параметрической идентификации решается путем определения значений коэффициентов аппроксимации A_i и коэффициентов в показателях степени экспоненты p_j .

Время запаздывания τ_k установлено в результате проведения активного эксперимента и зависит от инерционности технических средств, применяемых в эксперименте.

При использовании ряда Вольтерра второго порядка ядра интегралов представляют собой поверхность, изображенную на рис. 5.

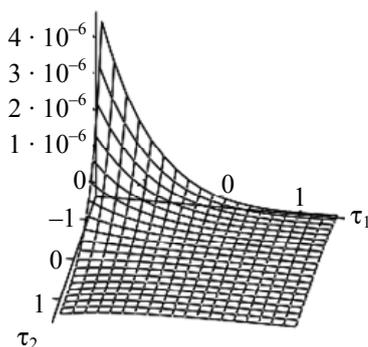


Рис. 5. График оценки ядра второго порядка интегрального ряда Вольтерра

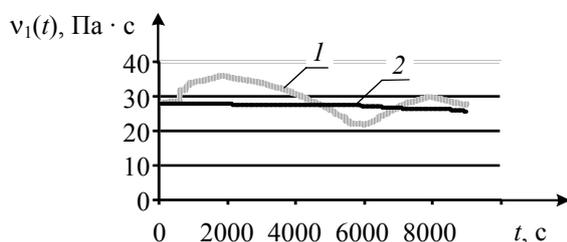


Рис. 6. Графики изменения вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации: 1 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации (5)

Кривые, принадлежащие поверхности, стремятся к нулю, что подтверждает устойчивый характер выбранных в качестве ядер аperiodических звеньев второго порядка [4]. На рис. 6 и 7 представлена аппроксимация выходных переменных интегральным рядом Вольтерра второго порядка.

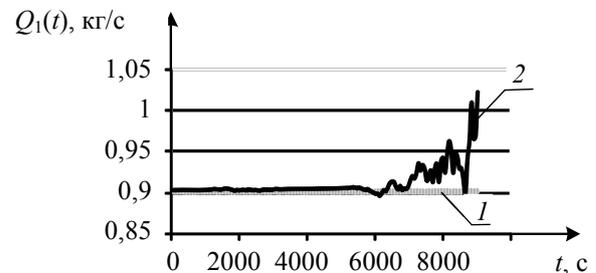


Рис. 7. Графики изменения расхода ПЭТФ на выходе из реактора предварительной поликонденсации:

1 – график изменения во времени расхода на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента; 2 – график изменения во времени расхода на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации (6)

Запишем выражение для вязкости ПЭТФ на выходе из реактора ППК в виде интеграла Вольтерра третьего порядка:

$$\begin{aligned}
v_1(t) = & v_0(t) + A_1 \int_0^t (e^{p_{1}\tau_1} - e^{p_{2}\tau_1}) T_1(t-\tau_1) d\tau_1 + \\
& + A_2 \int_0^t (e^{p_{3}\tau_2} - e^{p_{4}\tau_2}) P_1(t-\tau_2) d\tau_2 + \\
& + A_3 \int_0^t \int_0^t (e^{p_{5}\tau_1} - e^{p_{6}\tau_1}) (e^{p_{7}\tau_2} - e^{p_{8}\tau_2}) \times \\
& \quad \times T_1(t-\tau_1) P_1(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + A_4 \times \\
& \quad \times \int_0^t \int_0^t \int_0^t (e^{p_{9}\tau_1} - e^{p_{10}\tau_1}) (e^{p_{11}\tau_2} - e^{p_{12}\tau_2}) \times \\
& \quad \times (e^{p_{13}\tau_3} - e^{p_{14}\tau_3}) T_1(t-\tau_1) P_1(t-\tau_2) T_1(t-\tau_3) \times \\
& \quad \times P_1(t-\tau_3) d\tau_2 d\tau_3 d\tau_2. \quad (7)
\end{aligned}$$

В (7) подынтегральное выражение последнего слагаемого содержит произведение управляющих переменных с одинаковым временем запаздывания, что является неприемлемым для величин разной инерционности.

На рис. 8 кривые являются рассогласованными вследствие действия дополнительной интегральной составляющей в интеграле третьего порядка.

При идентификации динамических характеристик химических реакторов рядами Вольтерра второго порядка необходимо применять регуляризацию параметров модели для улучшения качества аппроксимации.

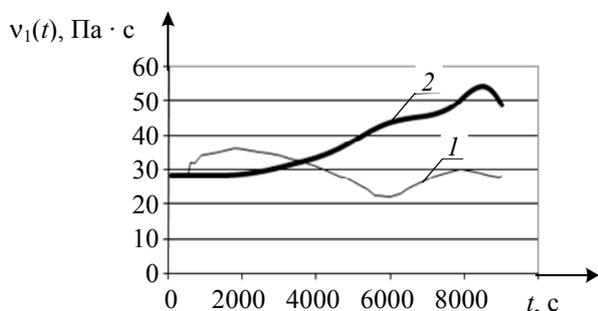


Рис. 8. Графики изменения вязкости ПЭТФ на выходе из реактора предварительной поликонденсации:
1 — график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный в результате проведения эксперимента;
2 — график изменения во времени вязкости на выходе из реактора предварительной поликонденсации, полученный на основе выражения аппроксимации интегральным рядом Вольтерра третьего порядка

Поскольку при регуляризации решения используется математическое ожидание входных, выходных и управляющих переменных, то при идентификации динамических характеристик химических процессов можно пренебречь влиянием на переменные случайных воздействий, поэтому в алгоритме идентификации необходимо добавить процедуру регуляризации [5].

Заключение. Для оценки качества аппроксимации была использована относительная дисперсия ошибки, которая задается соотношением

$$\delta = \frac{\int_0^T (y_i(t) - y_i^m(t))^2 dt}{\int_0^T y_i(t)^2 dt},$$

где y_i — выходные переменные реактора ППК; T — время протекания реакции поликонденсации в реакторе ППК.

Для повышения точности идентификации необходимо было принимать специальные меры для настройки решения (регуляризацию).

При применении в качестве модели реактора интегрального ряда Вольтерра первого порядка величина дисперсии ошибки составила 2,4%. Добавление квадратичной составляющей ряда снизило дисперсию ошибки до 2,27%, а кубической — повысило дисперсию ошибки в 10 раз (22,55%). Такое увеличение в случае использования интегрального ряда Вольтерра третьего порядка связано с возрастанием статистической ошибки при проведении конечного числа испытаний. В случае использования ряда Вольтерра первого порядка не наблюдается «сглаживания» значений выходных переменных, поэтому наилучшим вариантом является применение для аппроксимации динамических характеристик химических реакторов интегрального ряда Вольтерра второго порядка.

Необходимо отметить, что важным в решении задач такого рода является задание границ поиска решения, а также шага, с которым выполняется поиск решения относительно заданных начальных условий.

Литература

1. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю. С. Попков [и др.]. — М.: Энергия, 1976. — 440 с.
2. 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.
3. Алданова (Акиншева), И. В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации / И. В. Алданова (Акиншева), И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. — 2009. — Вып. XVII. — С. 86–89.
4. Сидоров, Д. Н. Моделирование нелинейных нестационарных динамических систем рядами Вольтерра: идентификация и приложения / Д. Н. Сидоров // Сибирский журнал промышленной математики. — 2000. — № 1. — С. 182–194.
5. Акиншева, И. В. Синтез адаптивной системы управления процессом поликонденсации / И. В. Акиншева, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. — 2010. — Вып. XVIII. — С. 104–108.

Поступила 01.03.2012