МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.021:004.942

И. В. Акиншева, аспирант (БГТУ); И. Ф. Кузьмицкий, доцент (БГТУ)

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ

В данной статье представлен способ построения адаптивной системы управления реакторами поликонденсации. Способ основывается на использовании составленной математической модели процесса получения полимера, а также на нахождении оптимальных значений управляющих воздействий. За оценку оптимальности системы принят интегральный критерий качества, включающий в себя сумму отклонений входных, выходных, управляющих переменных и производных от управляющих переменных модели и переменных реального объекта. Также описан метод выбора весовых коэффициентов, входящих в интегральный критерий. Главной задачей такой системы является быстрое реагирование на изменение установленных значений параметров регулирования. В результате происходит перенастройка параметров математической модели и, соответственно, изменяются оптимальные значения управляющих переменных. Разработан алгоритм адаптации, основывающийся на минимизации интегрального критерия качества. Данный алгоритм является физически реализуемым.

In this paper a method for constructing an adaptive control system polycondensation reactors is presented. The method is based on the use of the set mathematical model of the obtaining polymer process, as well as finding the optimal values of control actions. For assessing the optimality of the system adopted the integral criterion of quality, which includes the amount of deviations of the input, output, control variables and derived control model variables of the model derived from the variables of real object. Also the method of selection of the weight coefficients in the integral criterion is described. The main objective of such a system is a rapid response to modify set values of the control parameters. As a result, reconfigure the mathematical model is and, consequently, the optimal values of the control variables are changed. An adaptation algorithm based on the minimization of an integral quality criterion is developed. This algorithm is a physically realizable.

Введение. В настоящее время весьма актуальным является создание и внедрение адаптивных систем управления различного рода технологическими процессами. Это связано, прежде всего, с тем, что в создавшихся экономических условиях предприятия вынуждены постоянно совершать переходы на различные объемы производительности промышленных установок. Такое изменение влечет за собой смену одних значений режимных параметров на диктуемые новым объемом производительности. Необходимо отметить, что недостаточно синтезировать только адаптивную систему, важно также, чтобы эта система была еще и оптимальной. Это взаимная связь появляется вследствие слабой чувствительности оптимальных в смысле экстремума некоторого функционала качества систем к малым изменениям параметров и характеристик систем, что приближает их к адаптивным.

Последним этапом в процессе получения полиэтилентерефталата (ПЭТФ) является стадия поликонденсации полимера. Данная стадия протекает в двух промышленных реакторах предварительной (ППК) и окончательной (ОПК) поликонденсации, которые далее будут рассматриваться в качестве единого нелинейного, многосвязного объекта управления (ОУ).

Целью синтеза адаптивной системы процесса поликонденсации является непосредственная адаптация параметров составленной математической модели ОУ в случае изменения режимов и условий эксплуатации установки.

Для решения задач синтеза адаптивных систем управления нелинейными объектами существуют подходы, которые основываются на минимизации критерия качества, который включает в себя основные влияющие на процесс параметры. Математический аппарат, используемый для нахождения оптимальных сигналов, включает в себя множество методов. В результате оптимизации классическими методами вариационного исчисления оптимальный сигнал определяется непосредственно в виде функции времени. Базируясь на математической модели процесса поликонденсации, составляется интегральный критерий качества, который минимизируется путем использования уравнения Эйлера – Лагранжа. Оптимальные управляющие переменные, полученные в результате интегрирования вышеуказанного дифференциального уравнения, являются также функциями, определение границ устойчивости которых необходимо для решения задачи синтеза.

Основная часть. При рассмотрении реакторов поликонденсации в качестве единой системы, что уже указывалось выше, как объекта управления были выделены следующие переменные, характеризующие процесс.

Входными переменными реактора ППК являются расход дигликольтерефталата g_0 и начальная вязкость продукта y_0. Выходными переменными – расход расплава g_1, вязкость расплава y_1, которые в свою очередь являются входными переменными реактора ОПК. Функцию управляющих переменных выполняют температура u_1 и давление u_2 внутри реактора ППК.

Для реактора ОПК выходными переменными будут расход полиэтилентерефталата g_2 и вязкость полиэтилентерефталата y_2. Управляющие переменные – температура u_3 и давление u_4 внутри реактора ОПК.

Структурная схема, наглядно поясняющая вышесказанное, представлена на рис. 1.

Многосвязные объекты, как правило, имеют сложные по своей аналитической форме математические модели. Поэтому оптимальным вариантом является линеаризация нелинейного объекта. Целесообразно искать модель в виде ряда Вольтерра, ограничившись из-за инерционности исследуемого объекта двучленным его отрезком.

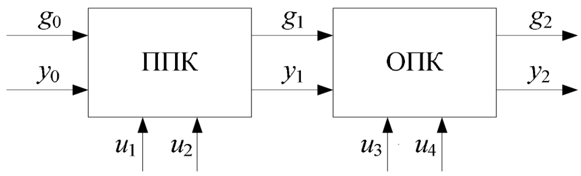

Рис. 1. Схема распределения переменных процесса поликонденсации

Эффективным методом решения задачи идентификации является способ, который состоит в предварительной аппроксимации весовой функции объекта $h(t)$ и последующем определении коэффициентов и показателей степеней по результатам наблюдений за входными и выходными сигналами:

$$h(t) = \int_0^t A_i \varphi_i(t), \tag{1}$$

где $\varphi_i(t)$ – некоторая функция, отражающая динамические свойства объекта и абсолютно интегрируемая на исследуемом интервале времени; A_i – коэффициенты аппроксимации.

Для достижения требуемой степени точности идентификации необходимо принимать специальные меры для регуляризации решения. За оценку точности идентификации примем относительную дисперсию ошибки, задаваемую соотношением

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

где y_i – выходные переменные реакторов ППК и ОПК.

Аналитически функцию $\varphi(t)$ будем выбирать из условия, что переходные процессы в системе включают апериодические звенья.

Учитывая вышеизложенное условие, функцию $\varphi(t)$ представим в виде весовой функции апериодического звена второго порядка.

Модель объекта представлена в виде выражений (3)–(6) [1].

$$y1(t) = y0(t) + A_1\int_0^t (e^{p1t} - e^{p2t})u1(t)dt + A_2\int_0^t (e^{p3t} - e^{p4t})u2(t)dt + A_3\int_0^t\int_0^t (e^{p5t} - e^{p6t})u1(t)(e^{p7t} - e^{p8t})u2(t)dtdt, \tag{3}$$

$$\begin{aligned} g1(t) = g0(t) &+ A_4\int_0^t (e^{p9t} - e^{p10t})u1(t)dt + A_5\int_0^t (e^{p11t} - e^{p12t})u2(t)dt + A_6\int_0^t (e^{p13t} - e^{p14t})y1(t)dt + \\ &+ A_7\int_0^t\int_0^t (e^{p15t} - e^{p16t})u1(t)(e^{p17t} - e^{p18t})u2(t)dtdt + A_8\int_0^t\int_0^t (e^{p19t} - e^{p20t})y1(t)(e^{p21t} - e^{p22t})u1(t)dtdt + \\ &+ A_9\int_0^t\int_0^t (e^{p23t} - e^{p24t})y1(t)(e^{p25t} - e^{p26t})u2(t)dtdt, \end{aligned} \tag{4}$$

$$y2(t) = y1(t) + A_{10}\int_0^t (e^{p27t} - e^{p28t})u3(t)dt + A_{11}\int_0^t (e^{p29t} - e^{p30t})u4(t)dt +$$
$$+ A_{12}\int_0^t\int_0^t (e^{p31t} - e^{p32t})u3(t)(e^{p33t} - e^{p34t})u4(t)dtdt, \quad (5)$$

$$g2(t) = g1(t) + A_{13}\int_0^t (e^{p35t} - e^{p36t})u3(t)dt + A_{14}\int_0^t (e^{p37t} - e^{p38t})u4(t)dt + A_{15}\int_0^t (e^{p39t} - e^{p40t})y2(t)dt +$$
$$+ A_{16}\int_0^t\int_0^t (e^{p41t} - e^{p42t})u3(t)(e^{p43t} - e^{p44t})u4(t)dtdt + A_{17}\int_0^t\int_0^t (e^{p45t} - e^{p46t})y2(t)(e^{p47t} - e^{p48t})u3(t)dtdt +$$
$$+ A_{18}\int_0^t\int_0^t (e^{p49t} - e^{p50t})y2(t)(e^{p51t} - e^{p52t})u4(t)dtdt. \quad (6)$$

Из условия минимума квадрата отклонения значений параметров, полученных в результате моделирования, от значений параметров реального процесса, коэффициенты A_i находятся как решение системы уравнений

$$R_{ym}(0) = \sum_{i=1}^{N} A_i R_{im}(0)\,,\ m = 1, \ldots, N, \quad (7)$$

где

$$R_{ym}(0) = M\{y(t), z^n(t)\},$$
$$R_{im}(0) = M\{z^n(t), z^{n+1}(t)\},$$
$$z^n(t) = \int_0^t \varphi_n(t)u_i(t)dt,$$

где $M\{*\}$ – математическое ожидание параметров процесса; $z^n(t)$ – реакция динамического элемента, реализующего n-ю аппроксимирующую функцию на рабочий входной сигнал.

Решая (7), получим систему линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов A_i. Систему составим для выражения (3) – вязкость ПЭТФ в реакторе ППК. При этом учтем, что параметры ядер Вольтерра первого и второго порядков вычисляются независимо, поэтому можно записать выражения для определения A_i:

$$\begin{cases} A_1 = \dfrac{1}{2}M\{y_1(t), z^1(t)\} - M\{y_1(t)\}, \\ A_2 = \dfrac{1}{2}M\{y_1(t), z^2(t)\} - M\{y_1(t)\}, \\ A_3 = M\{y_1(t), z^3(t), z^4(t)\}. \end{cases} \quad (8)$$

На основании вышеизложенного проведем идентификацию выходной характеристики (вязкости) для реактора предварительной поликонденсации [2].

Задача оптимального управления для процесса поликонденсации, задаваемого уравнениями (3)–(6), может быть сформулирована как задача минимизации функционала качества. В качестве критерия настройки модели примем средний квадрат рассогласования выходных координат объекта и модели.

За критерий оптимизации примем функционал, представляющий собой функцию ошибок:

$$\begin{aligned} I = \int_0^T \Psi(t)(&\alpha(y_1(t) - y_1^{\text{м}}(t))^2 + \beta(y(t)_2 - y(t)_2^{\text{м}})^2 + \\ &+ \chi(g(t)_1 - g(t)_1^{\text{м}})^2 + \gamma(g(t)_2 - g(t)_2^{\text{м}})^2 + \\ &+ \eta(u_1(t) - u_1^{\text{м}}(t))^2 + \lambda(u_2(t) - u_2^{\text{м}}(t))^2 + \\ &+ \mu(u_3(t) - u_3^{\text{м}}(t))^2 + \pi(u_4(t) - u_4^{\text{м}}(t))^2 + \\ &+ \theta(u_1^{/}(t) - u_1^{/\text{м}}(t))^2 + \rho(u_2^{/}(t) - u_2^{/\text{м}}(t))^2 + \\ &+ \sigma(u_3^{/}(t) - u_3^{/\text{м}}(t))^2 + \xi(u_4^{/}(t) - u_4^{/\text{м}}(t))^2)dt, \end{aligned} \quad (9)$$

где α, β, χ, γ, η, λ, μ, π, θ, ρ, σ, ξ – весовые коэффициенты; $y_i^{\text{м}}(t)$, $g_i^{\text{м}}(t)$, $u_i^{\text{м}}(t)$ – входные, выходные и управляющие переменные модели объекта управления; $u_i^{/}(t)$ – производная управляющей переменной по времени.

При применении в качестве критерия оптимизации функции ошибок остается открытым вопрос о выборе значений весовых коэффициентов, входящих в функцию ошибок, для конкретной задачи синтеза. Воспользуемся одним из приближенных методов выбора весовых коэффициентов. Если функция ошибки в любой момент времени имеет вид выражения (9), то весовые коэффициенты для каждого момента времени можно найти, исходя из допустимой величины ошибки. Можно заключить, что максимальные допустимые значения ошибок составляющих сигнала в любой момент времени должны вносить в функцию ошибки равный вклад, так как система управления обеспечивает минимум интегральной суммы ошибок. Принимая условие равенства членов в формуле (9), можно записать

$$\alpha\left(\frac{\varepsilon_{y1}^{1}}{\varepsilon_{y1}^{n}}\right)=\beta\left(\frac{\varepsilon_{y2}^{1}}{\varepsilon_{y2}^{n}}\right)=\chi\left(\frac{\varepsilon_{g1}^{1}}{\varepsilon_{g1}^{n}}\right)=\ldots \qquad (10)$$

где ε – ошибка, определяемая в знаменателе дроби как

$$\varepsilon_{yi}^{n}=\left[y_i(t)-y_i^{\text{м}}(t)\right]_{\text{макс. доп}}, \qquad (11)$$

$$\varepsilon_{gi}^{n}=\left[g_i(t)-g_i^{\text{м}}(t)\right]_{\text{макс. доп}}. \qquad (12)$$

В числителе дроби выражения (10) представлено текущее значение ошибки.

Аналогичные рассуждения распространим на величины управляющих воздействий и их производные [3].

Предполагается, что величины максимально допустимых ошибок могут быть определены по заданным требованиям к системе, после чего можно найти числовые соотношения между различными коэффициентами α, β, χ и т. д.

Из описания процедуры нормализации следует, что выражение оптимального управления зависит от отношения весовых коэффициентов. Поэтому без потери общности можно положить равенство единице одного из коэффициентов. При таком допущении для определения числовых значений остальных весовых коэффициентов достаточно уравнений (10)–(12).

Как правило, данные коэффициенты изменяются во времени, так как меняется и текущее значение ошибки, однако примем допущение о стационарности оценок. Для этого вместо текущего значения ошибки будем рассматривать минимальное значение ошибки, что является достаточным для выполнения предварительного анализа совместно с процедурой нормализации.

Для нахождения оптимальных значений управляющих переменных воспользуемся теорией вариационного исчисления.

Подынтегральное выражение критерия (9) обозначим через $F(t)$. Функция, которая минимизирует функционал (9), должна удовлетворять дифференциальному уравнению второго порядка Эйлера – Лагранжа:

$$\frac{\partial F(t)}{\partial u_i(t)}-\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial F(t)}{\partial u_i^{/}(t)}\right)=0. \qquad (13)$$

Структура данного подынтегрального выражения представляет собой сумму входных, выходных параметров, управляющих воздействий и квадратов производных управляющих воздействий. Это продиктовано необходимостью соблюдения условий теоремы Эйлера – Лагранжа, согласно которой функции управлений должны быть непрерывно дифференцируемы на рассматриваемом отрезке.

Учитывая выражения (9) и (13), запишем систему уравнений для определения минимизирующих функций (14).

Решение системы сводится к решению системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, что является особенностью задач вариационного исчисления.

Для решения данной системы воспользуемся методом Рунге – Кутта четвертого порядка. Однако при всей простоте программного исполнения данного метода следует помнить, что важным этапом в решении является выбор шага интегрирования дифференциального уравнения. Поскольку именно его величина влияет не только на точность метода, но и на достоверность получаемого решения:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\Delta(y1,y2,g1,g2,t)}{\partial u1(t)}+2\alpha-2\xi\dfrac{du_1^{/}(t)}{dt}=0,\\[2mm] \dfrac{\partial\Delta(y1,y2,g1,g2,t)}{\partial u2(t)}+2\beta-2\chi\dfrac{du_2^{/}(t)}{dt}=0,\\[2mm] \dfrac{\partial\Delta(y1,y2,g1,g2,t)}{\partial u3(t)}+2\gamma-2\mu\dfrac{du_3^{/}(t)}{dt}=0,\\[2mm] \dfrac{\partial\Delta(y1,y2,g1,g2,t)}{\partial u4(t)}+2\delta-2\omega\dfrac{du_4^{/}(t)}{dt}=0,\end{cases} \qquad (14)$$

где $\Delta(y1, y2, g1, g2, t)$ – функция, представляющая собой сумму квадратов ошибок входных и выходных переменных.

Частные производные по $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$ будем находить, руководствуясь правилом Лейбница [4]. Для выполнения данного правила к функциям предъявляются следующие требования:

– равномерная непрерывность на рассматриваемом отрезке;

– функция должна быть дифференцируемой на отрезке.

При этом интеграл с переменным верхним пределом будем вычислять последовательно и в зависимости от значений, принимаемых переменной t. Необходимо также отметить, что при $t \to \infty$ требуется проводить анализ устойчивости системы, т. е. определять границы допустимых значений управляющих переменных.

Для реализации указанных алгоритмов наиболее приемлемым является построение адаптивной системы управления. Такой выбор, прежде всего, диктуется тем, что алгоритм решения является «приспосабливаемым», что характерно для систем управления такого рода.

Разрабатываемая система имеет переменные настройки. Процесс изменения настроек происходит с помощью алгоритмов идентификации и оптимизации.

С помощью идентификации последовательно во времени определяют неизвестные параметры модели объекта и затем отыскивают оптимальное управление исходя из предположения, что найденные оценки параметров совпадают с истинными значениями. Структурная схема адаптивной системы управления процессом поликонденсации имеет вид, представленный на рис. 2. При этом алгоритм управления состоит из следующих этапов: сбор и обработка информации об объекте; корректировка параметров модели с учетом вновь поступивших данных о процессе; определение оптимальных значений управляющих координат по скорректированной модели; реализация управления объектом.

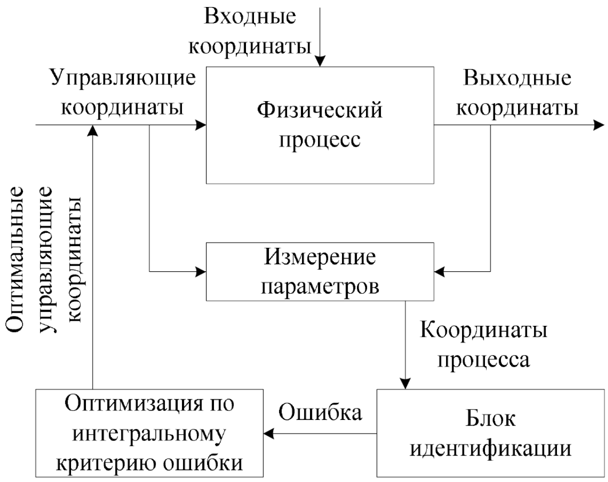

Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления процессом поликонденсации

В блоке идентификации, представленном на рис. 3, происходит корректировка параметров математической модели процесса. Минимизация ошибки рассогласования параметров реального процесса и модели осуществляется путем регуляризации коэффициентов аппроксимации модели.

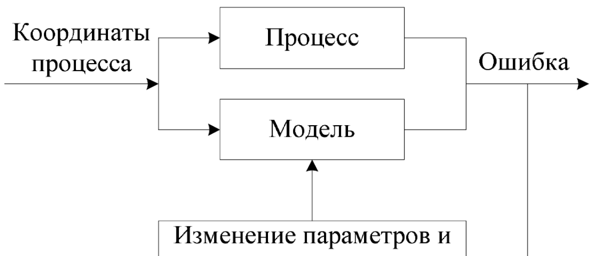

Рис. 3. Структурная схема блока идентификации

Составленная структурная схема адаптивной системы управления процессом поликонденсации представляет собой систему адаптивного управления с идентификацией по оптимальному критерию.

Таким образом, структурные схемы на рис. 2 и 3 являются построенной адаптивной замкнутой моделью процесса, которая по существу представляет собою следящую систему.

Заключение. Для синтеза адаптивной системы управления процессом поликонденсации была разработана математическая модель объекта, которая отображает происходящие в нем динамические процессы. Критерием соответствия математической модели реальному объекту является минимизация ошибки рассогласования между параметрами модели и объекта.

Наряду с идентификацией по указанному критерию, осуществляется и регуляризация коэффициентов аппроксимации, что в большей степени приближает разработанную модель к характеристикам реального объекта.

Для решения задачи синтеза необходимо также определить оптимальные значения управляющих переменных. В качестве критерия оптимизации модели принят функционал, подынтегральное выражение которого представляет собой функцию ошибок параметров процесса и ошибок производных управляющих переменных.

Алгоритм нахождения оптимальных значений управляющих переменных основывается на элементах теории вариационного исчисления. Применение данной теории подразумевает дополнительное исследование системы на устойчивость.

Литература

1. Алданова, И. В. Идентификация динамических характеристик процесса поликонденсации / И. В. Алданова, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2009. – Вып. XVII. – С. 95–98.

2. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

3. Мэрриэм, К. У. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью / К. У. Мэрриэм. – М.: Мир, 1967. – 550 с.

4. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г. М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1969. – 800 с.

Поступила в редакцию 31.03.2010