

Раздел 8. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 66.011:681.5

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО РОБАСТНОГО АЛГОРИТМА

Невиницын Владимир Юрьевич (nevinitsyn@gmail.com)

Лабутин Александр Николаевич

Волкова Галина Витальевна

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

В работе решается задача синтеза нелинейного астатического алгоритма стабилизации температурного режима в жидкофазном химическом реакторе, обеспечивающего инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями, асимптотическую устойчивость и робастность при действии неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений.

Ключевые слова: робастное управление, аналитический синтез, химический реактор, синергетическая теория управления, компьютерное моделирование.

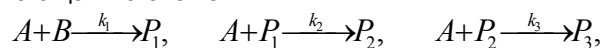
Одним из основных требований к системе управления является требование робастности, т.е. способность сохранять работоспособность при изменении параметров математической модели объекта. Проблема робастного управления является одной из важнейших в теории и практике автоматического управления [1]. Анализ публикаций показывает, что в классе линейных систем для обеспечения робастности используют адаптивные системы автоматического управления с подстройкой параметров, безынерционные регуляторы состояния, робастные системы на основе типовых ПИД-регуляторов, нечеткие системы управления [2]. Однако указанные подходы неэффективны при синтезе систем управления существенно нелинейными объектами. Перспективным в этом плане представляется метод АКАР, разработанный в рамках синергетической теории управления [3].

Использование идей синергетики в задачах управления требует перехода от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению к целевому аттрактору (желаемому инвариантному многообразию) и дальнейшему движению вдоль многообразия в конечное состояние. Данный способ самоорганизации называется направленным или целевым [3]. Эффективность алгоритмов, синтезированных с применением синергетической теории управления, показана в ряде работ [4-9].

В предлагаемой работе решается задача аналитического синтеза алгоритма управления температурой в химическом реакторе методом АКАР, который обладает свойством робастности.

Реактор представляет собой жидкофазный аппарат емкостного типа непрерывного действия, снабженный механической мешалкой для перемешивания реакционной смеси и теплообменной рубашкой (рис. 1). В аппарате реализуется трехстадийная последовательно-

параллельная экзотермическая реакция, протекающая по схеме



где A и B – исходные реагенты;

P_1, P_2, P_3 – продукты реакции;

k_1, k_2, k_3 – константы скоростей стадий.

Аппарат функционирует в политропическом режиме.

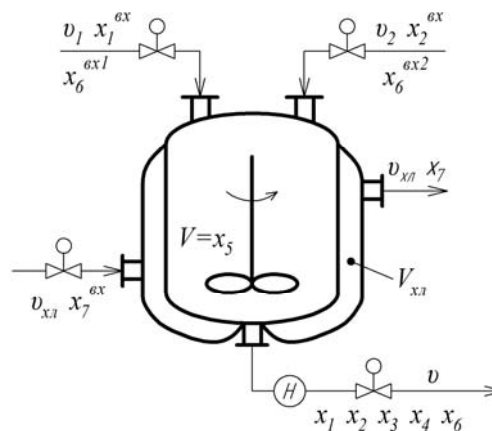


Рисунок 1. Принципиальная схема химического реактора

На рисунке 1 введены обозначения:

x_1^{ex}, x_2^{ex} – концентрации исходных реагентов;

x_6^{ex1}, x_6^{ex2} – температуры потоков исходных реагентов;

U_1, U_2 – расходы исходных реагентов;

U_{xl} – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;

x_7^{ex}, x_7 – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата;

V – расход смеси на выходе из аппарата;

x_1, x_2, x_3, x_4 – концентрации компонентов A, B, P_1, P_2 в реакторе;

x_6 – температура реакционной смеси в аппарате;

$V = x_5$ – объем аппарата;

V_{xl} – объем хладагента в рубашке.

В промышленности нередко ситуация, когда реакторный процесс ведут по температуре смеси в аппарате. В данном случае задача управления реактором заключается в стабилизации температуры смеси в аппарате на заданном уровне \bar{x}_6 в условиях действия возмущений. Регулирующим входным воздействием является расход хладагента, подаваемый в рубашку. При этом, как правило, стабилизируются расходы входных потоков, их соотношение и уровень смеси в реакторе.

Из классической теории управления известно, что пропорциональный регулятор не обеспечивает отслеживания изменения уставок или возмущающих воздействий по нагрузке. В связи с этим, представляется целесообразным синтезировать астатический закон управления температурой, обладающий свойством грубости (робастности). Это возможно, если в алгоритм управления температурой ввести интегральную составляющую [3].

Расширенная математическая модель реактора при условии постоянства уровня реакционной смеси в аппарате ($V = x_5 = const$) с учетом (1) запишется

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{d\tau} &= x_6 - \bar{x}_6, & \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2x_1 - b_3x_1, & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + M_B - b_2x_2 - b_3x_2, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2x_3 - b_3x_3, & \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2x_4 - b_3x_4, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} + \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{ex2} - x_6)b_3, \\ \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{ex} - x_7)u, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_A = \nu_1 x_1^{ex} / V$;

$M_B = \nu_2 x_2^{ex} / V$;

$b_1 = 1 / V_{xl}$;

$b_2 = \nu_1 / V$;

$b_3 = \nu_2 / V$;

$\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$, $i = 1, \dots, 3$;

$\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$;

$\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$;

R_i , $i = 1, \dots, 4$ – скорость реакции по соответствующему веществу;

В соответствии с методом АКАР, для введения интегральной составляющей в закон управления необходимо расширить пространство состояния путем введения в рассмотрение нескольких дополнительных переменных состояния, число которых не может быть больше числа регулируемых переменных [3]. В нашем случае необходимо ввести одну дополнительную переменную z_1 , подчиняющуюся уравнению

$$\frac{dz_1}{d\tau} = x_6 - \bar{x}_6, \quad (1)$$

где x_6 , \bar{x}_6 – текущее и заданное значения температуры смеси в реакторе. Из (1) следует,

что $z_1 = \int_0^\tau (x_6 - \bar{x}_6) d\tau$ и закон управления не-

обходимо синтезировать таким образом, чтобы переменная z_1 входила в выражение для управляющего воздействия.

ΔH_i , $i = 1, \dots, 3$ – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;

K_T , F_T – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата;

ρ , C – плотность и теплоемкость реакционной смеси;

ρ_{xl} , C_{xl} – плотность и теплоемкость хладагента;

$u = \nu_{xl}$ – регулирующее воздействие.

Этапы процедуры синергетического синтеза закона управления изложены в [3]. Поскольку расход хладагента воздействует на переменную x_6 через переменную x_7 , то канал управления температурой смеси в аппарате в раз-

вернутом виде запишется: $u \rightarrow x_7 \rightarrow x_6$. На первом шаге вводится в рассмотрение макропеременная:

$$\psi_1 = x_7 + v_1(x_6, z_1), \quad (3)$$

где $v_1(x_6, z_1)$ – некоторая функция, подлежащая определению в ходе дальнейшей процедуры синтеза.

После подстановки макропеременной ψ_1 в функциональное уравнение (4) получим выражение

$$T_1 \left[\frac{dx_7}{d\tau} + \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{dx_6}{d\tau} + \frac{\partial v_1}{\partial z_1} \cdot \frac{dz_1}{d\tau} \right] + x_7 + v_1 = 0,$$

которое в силу уравнений объекта (2) примет вид:

$$T_1 \left[\beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{\text{ex}} - x_7)u + \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot (f_6 + \beta_1 x_7) + \frac{\partial v_1}{\partial z_1} \cdot (x_6 - \bar{x}_6) \right] + x_7 + v_1 = 0, \quad (5)$$

где $f_6 = \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{\text{ex}1} - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{\text{ex}2} - x_6)b_3$.

Из (5) получаем выражение для закона управления:

$$u = - \frac{(x_7 + v_1)}{T_1 b_1 (x_7^{\text{ex}} - x_7)} - \frac{\beta_2 (x_6 - x_7)}{b_1 (x_7^{\text{ex}} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{(f_6 + \beta_1 x_7)}{b_1 (x_7^{\text{ex}} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial z_1} \cdot \frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{b_1 (x_7^{\text{ex}} - x_7)}. \quad (6)$$

Управление u переводит изображающую точку системы на фазовой плоскости из произвольного начального состояния в окрестность многообразия $\psi_1 = 0$, на котором реализуется связь $x_7 = -v_1$ и наблюдается эффект «сжатия фазового пространства», т.е. снижение размерности системы уравнений (2). Уравнения декомпозированной системы с учетом соотношения $x_7 = -v_1$ примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{d\tau} &= x_6 - \bar{x}_6, & \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1, & \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + M_B - b_2 x_2 - b_3 x_2, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3, & \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4, & \frac{dx_6}{d\tau} &= f_6 - \beta_1 v_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Для нахождения функции $v_1(x_6, z_1)$ введем в рассмотрение цель движения системы (7) на втором этапе в форме инвариантного многообразия

$$\psi_2 = (x_6 - \bar{x}_6) + \gamma_1 z_1 = 0, \quad (8)$$

где γ_1 – настроечный параметр интегральной составляющей закона управления.

Макропеременная ψ_2 удовлетворяет решению функционального уравнения $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$, которое в развернутом виде с учетом выражения (8) в силу модели декомпозированной системы (7) примет вид:

$$T_2 [f_6 - \beta_1 v_1 + \gamma_1 (x_6 - \bar{x}_6)] + (x_6 - \bar{x}_6) + \gamma_1 z_1 = 0. \quad (9)$$

«Внутреннее» управление в соответствии с выражением (9) запишется:

$$v_1 = \frac{(x_6 - \bar{x}_6) + \gamma_1 z_1}{T_2 \beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1} + \frac{\gamma_1 (x_6 - \bar{x}_6)}{\beta_1}. \quad (10)$$

Окончательное выражение для закона управления $u(x)$ получается путем подстановки в (6) функции v_1 (10) и ее частных производных $\partial v_1 / \partial x_6$, $\partial v_1 / \partial z_1$. Параметрами настройки закона управления, влияющими на качество динамики процессов в замкнутой системе «объект – управляющее устройство», являются

Макропеременная (3) должна удовлетворять решению основного функционального уравнения метода АКАР:

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0. \quad (4)$$

постоянные времени T_1 , T_2 , а также параметр γ_1 , отвечающий за вклад интегральной составляющей. Условия асимптотической устойчивости системы в целом относительно введенных в фазовое пространство многообразий $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ имеют вид: $T_1 > 0$, $T_2 > 0$, $\gamma_1 > 0$.

Покажем, что под воздействием управления v_1 (10) характер изменения переменной состояния x_6 является асимптотически устойчивым. Для этого подставим v_1 из (10) в уравнение для x_6 декомпозированной системы (7):

$$\frac{dx_6}{d\tau} = f_6 - \beta_1 \left[\frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{T_2 \beta_1} + \frac{\gamma_1 z_1}{T_2 \beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1} + \frac{\gamma_1 (x_6 - \bar{x}_6)}{\beta_1} \right].$$

Данное уравнение перепишем следующим образом

$$\dot{x}_6 + \frac{x_6 - \bar{x}_6}{T_2} + \frac{\gamma_1}{T_2} z_1 + \gamma_1 (x_6 - \bar{x}_6) = 0.$$

Взяв производную от каждого слагаемого с учетом $\dot{z}_1 = x_6 - \bar{x}_6$ получим

$$\ddot{x}_6 + \left(\gamma_1 + \frac{1}{T_2} \right) \dot{x}_6 + \frac{\gamma_1}{T_2} x_6 = \frac{\gamma_1}{T_2} \bar{x}_6$$

или

$$\frac{T_2}{\gamma_1} \ddot{x}_6 + \frac{1 + \gamma_1}{\gamma_1} \dot{x}_6 + x_6 = \bar{x}_6.$$

Легко показать, что $x_6|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow \bar{x}_6$ при $T_2 > 0$ и $\gamma_1 > 0$. Характер изменения $x_6(\tau)$ при этом определяется корнями характеристического уравнения.

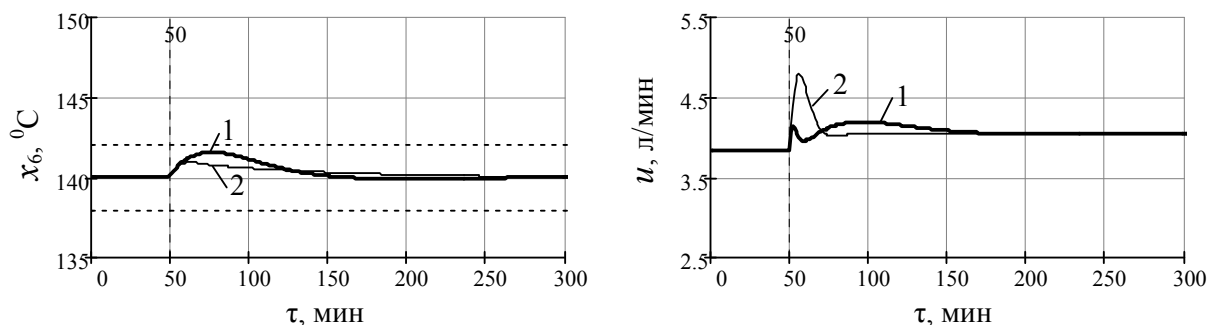
Анализ структуры закона управления (6), (10) показывает, что в его выражение входят все переменные состояния объекта – величины x_i , $i = \overline{1, 7}$, $i \neq 5$. Кроме того, в алгоритм управления входят технологические, конструк-

тивные, физико-химические и кинетические параметры процесса. Предполагается, что данные параметры не изменяются и входят в выражение для закона управления как константы (параметры). Исходя из выше изложенного, техническая реализация алгоритма управления возможна двумя способами:

1) осуществляется измерение всех переменных состояния объекта, текущие значения которых используются для расчета управляющего воздействия u (или строится наблюдатель при измерении части переменных состояния);

2) измеряются только регулируемая переменная – x_6 и температура хладагента в рубашке – x_7 . Остальные переменные состояния, входящие в закон управления, считаются не наблюдаемыми. Их значения при расчете управляющего воздействия принимаются постоянными и равными значениям этих переменных в статике.

Имитационное моделирование замкнутой системы управления с применением алгоритма (6), (10) показало инвариантность системы к параметрическим возмущениям и ковариантность с задающим воздействием. На рисунке 2 приведены примеры переходных процессов регулирования в замкнутой системе при кусочно-постоянном возмущении по параметру K_T .



**Рисунок 2. Переходные процессы выходной переменной и управления при ступенчатом возмущении по K_T равном $\Delta K_T = -0.1 K_T$;
1 – первый вариант реализации алгоритма управления,
2 – второй вариант**

Таким образом, предложенный робастный нелинейный закон управления температурой не имеет статической ошибки регулирования при действии на объект неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений, изменении задания и отклонении начальных условий от статических значений при реализации варианта закона управления, использующего

только часть переменных состояния объекта. Замкнутая система «реактор – управляющее устройство» устойчива в целом, характеризуется высокой точностью в установившемся режиме и малым значением перерегулирования. Варьируя параметры T_1 , T_2 , γ_1 астатического закона (6), (10) можно добиться требуемого качества управления.

Литература

1. Гайдук А.Р. Синтез робастных систем управления с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. – 1997. – №1. – С. 90-99.
2. Кузьменко А.А., Сеницын А.С., Сеницына А.А. Адаптивное управление энергоустановкой «асинхронизированный генератор – ветротурбина» с нелинейным наблюдателем возмущения // Информатика и системы управления. – 2016. – №4. – С. 103-114.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // Theor. Found. Chem. Eng. – 2014. – vol. 48. – no. 3. – p. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105
5. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синтез нелинейного алгоритма управления химическим реактором с использованием синергетического подхода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 38-44.
6. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // International Journal of Advanced Studies. – 2016. – vol. 6. – no. 1. – p. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37
7. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В. синтез эффективного комплекса "реактор - управляющая система" с использованием синергетического подхода // Химическая промышленность. – 2014. – Т. ХСІ. – № 2. – С. 63-67.
8. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез регулятора концентрации целевого компонента в каскаде химических реакторов // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. – 2011. – № 3. – С. 86-92.
9. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В. Управление реакторным узлом с распределенной подачей исходного реагента // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. – 2014. – № 2 (20). – С. 165-172.