

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 681.5.015.23:658.264

А.А. Стопакевич, Е.О. Улицкая

ПРЕЦИЗИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ключевые слова: прецизионная система автоматического управления, реактор, витамин В₆, нелинейная математическая модель.

Введение

Одним из способов повышения качества фармацевтической продукции является внедрение в системы автоматизации основных химико-технологических процессов фармацевтической промышленности прецизионных систем автоматического управления (ПСАУ). Такие системы, как правило, реализуют сложный нелинейный закон управления, который рассчитывается на основе как можно более точной нелинейной модели динамики технологического объекта управления (ТОУ). При этом предполагается, что высокопроизводительный микропроцессор реализует закон управления и обеспечивает взаимодействие с прецизионными датчиками и исполнительными устройствами, объединенными в локальную компьютерную сеть.

Отметим, что, в отличие от ПСАУ, классические системы управления на базе линейных регуляторов и системы управления с модельно-прогнозирующим управлением используют при настройке грубые математические модели — в основном, линейные, полученные аппроксимацией экспериментальных разгонных характеристик. Эти системы сравнительно легко реализуются с использованием современных математических пакетов и упрощенных инженерных методов настройки, однако принципиально не могут обеспечить высоких требований к качеству управления, требуют наблюдения и периодической подстройки сменными инженерами.

Прецизионному управлению уделяется внимание, например, при разработке вооружений [1], электропривода [2], робототехники [3], точной механики [4], однако работ, посвященных прецизионному управлению химико-технологическими процессами, почти нет. Основная причина — традиция упрощенного моделирования объекта управления и пренебрежение свойствами аппаратуры управления.

Рассматривая процессы химико-технологического типа, при разработке ПСАУ следует учитывать следующие факторы.

1. Взаимосвязанность параметров ТОУ. Игнорирование того, что каждое управление может влиять на множество выходов, часто существенно ухудшает качество управления ТОУ в целом.

2. Нелинейность динамики ТОУ. Только с помощью нелинейного закона управления можно достичь в рамках одного регулятора одинакового качества управления в различных технологических режимах работы установки.

© А.А. СТОПАКЕВИЧ, Е.О. УЛИЦКАЯ, 2019

3. Технические особенности и динамика исполнительных механизмов ТОО. Учет таких параметров, как выбег, скорость хода вала, мертвая зона, неточность позиционирования и т.п., позволяет более точно реализовать управление ТОО.

4. Погрешность и инерционность датчиков ТОО. Учет особенностей измерительных устройств при моделировании системы управления повышает реалистичность переходных процессов и оценки качества системы.

5. Учет характерных возмущений и возможных отклонений параметров ТОО от модели позволяет обеспечить робастность САУ в условиях параметрической неопределенности [5–7].

В литературе освещены отдельные вопросы моделирования динамики средств измерительной техники регулирующих органов (РО), рассмотрены вопросы геометрии клапанов [8], корреляции между трением и ходом регулирующего органа [9]. В то же время практически не рассматривается комплексная задача разработки ПСАУ для процессов химико-технологического типа, которая учитывает все указанные выше требования.

Авторами предложена прецизионная система автоматического управления химическим реактором непрерывного действия для синтеза витамина В₆. Ядром системы является оптимальный нелинейный многомерный регулятор. Комплексное моделирование ПСАУ в целях получения переходных процессов показало, что предложенная система удовлетворяет требованиям качества и безопасности ведения процесса. Система управления позволяет обеспечить высокоточное поддержание температуры экзотермической реакции за счет учета свойств аппаратуры и более качественную, в сравнении с типовой системой управления, компенсацию возмущений за счет применения подхода управления с разделением входящих потоков.

Постановка задачи

Цель статьи — разработка и исследование предложенной авторами ПСАУ химическим реактором непрерывного действия для синтеза витамина В₆, ядром которой является нелинейный оптимальный многомерный регулятор. Комплексное моделирование ПСАУ проводится с использованием модели процесса, представленного нелинейной системой с сосредоточенными параметрами, а также моделей датчиков и исполнительных механизмов.

Управляемыми параметрами предложенной ПСАУ являются концентрация конечного продукта, температура в реакторе и уровень продукта. Управления — расходы концентрированной азотной кислоты, суспензии пиридона с уксусным ангидридом, охлаждающей воды в рубашке реактора. Для увеличения точности регулирования расходов исходных потоков в узком диапазоне нагрузок регулирующего органа используется управление с разделением потока. Идея такого управления заключается в возможности разделения расхода среды к объекту управления на два потока с дальнейшей установкой двух регулирующих органов для реализации малых и больших управляющих воздействий.

Предлагаемая прецизионная система автоматического управления и ее математические модели

Структурно-функциональная схема процесса моделирования предложенной прецизионной САУ представлена на рис. 1 (ИП — измерительный преобразователь).

Химический реактор синтеза витамина В₆ с точки зрения моделирования является реактором идеального перемешивания, в который поступают потоки концентрированной азотной кислоты и суспензии пиридона с уксусным ангидридом. Реакция взаимодействия пиридона с кислотой является экзотермической, поэтому в реакторе предусмотрена рубашка для охлаждения смеси. Реакция нитрования —

реакция первого порядка [10]. Математическая модель реактора составлена на основе стандартных уравнений химической кинетики и термодинамики химических реакций [10, 11]. Приведя аналитическую нелинейную математическую модель динамики объекта управления к стандартному виду, получаем систему уравнений (1).

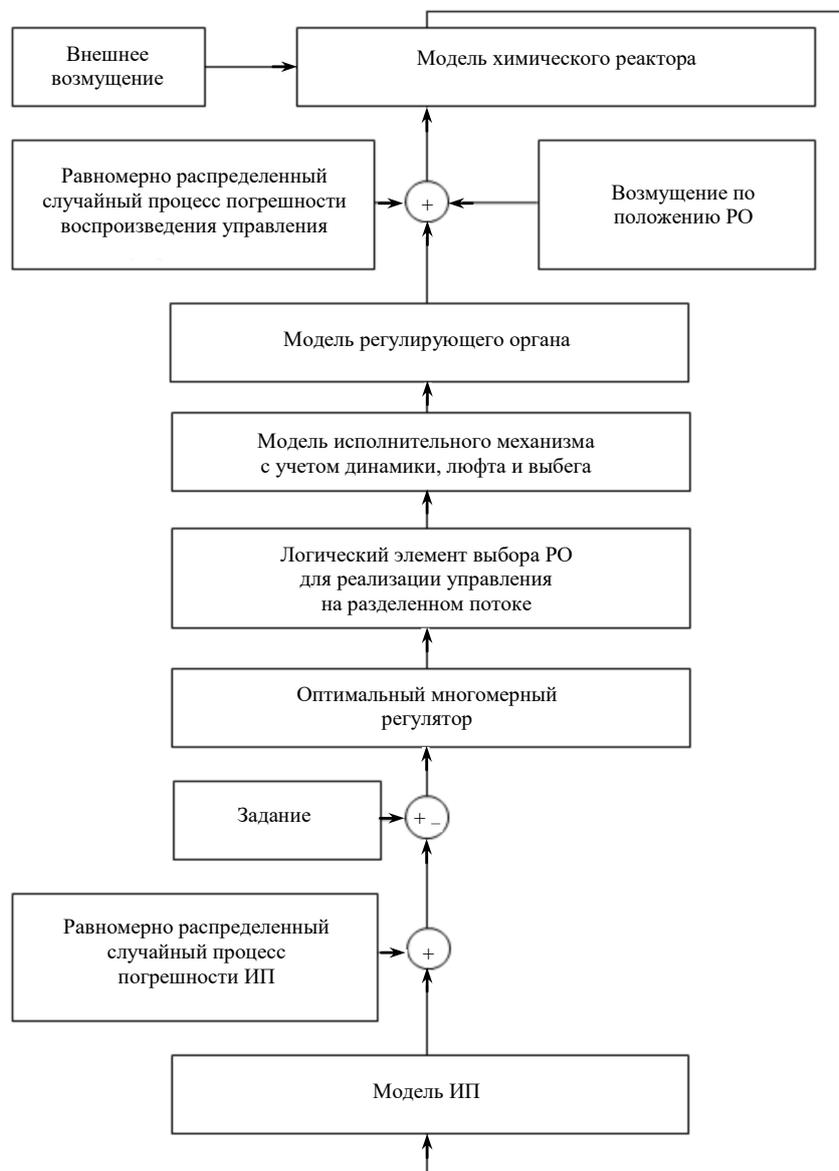


Рис. 1

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \\ \frac{dx_4}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{x_2}{x_1} & \frac{1}{x_1} & 0 & 0 \\ -\frac{x_3}{x_1} & 0 & \frac{1}{x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \left[\frac{(u_1 \cdot \rho_1 + u_2 \cdot \rho_2 - k_0 \cdot \sqrt{\frac{x_1}{S}} \cdot \rho)}{\rho} \right. \\ \left. \frac{u_1 \cdot C_1 + u_2 \cdot C_2 - k_0 \cdot \sqrt{\frac{x_1}{S}} \cdot x_2 - x_1 \cdot k \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot (273+x_3)}} \cdot x_2^n}{c \cdot \rho} \right. \\ \left. \frac{\left(\sum_{i=1}^2 u_i \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot T_i - k_0 \cdot \sqrt{\frac{x_1}{S}} \cdot \rho \cdot c \cdot x_3 + x_1 \cdot k \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot (273+x_3)}} \cdot x_2^n \cdot H \right) - c_6 \cdot \rho_6 \cdot u_3 \cdot (x_3 - x_4)}{c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_6} \right] \quad (1)$$

Обозначения параметров модели и их номинальные значения приведены в таблице.

Таблица

Параметр	Описание	Номинал	Единица измерения
u_1	Расход азотной кислоты	0,0028	м ³ /с
u_2	Расход суспензии пиридона	0,0106	м ³ /с
u_3	Расход охлаждающей воды	0,012	м ³ /с
x_1	Объем смеси в реакторе	4,8	м ³
x_2	Концентрация В ₆ на выходе реактора	0,132	кмоль/ м ³
x_3	Температура В ₆ в реакторе	41	°С
x_4	Температура воды в рубашке	15	°С
F	Расход раствора В ₆ на выходе реактора	0,0152	м ³ /с
C_1	Концентрация подаваемой HNO ₃	0,61	кмоль/ м ³
C_2	Концентрация подаваемого пиридона	0,129	кмоль/ м ³
T_1	Температура подаваемой HNO ₃	20	°С
T_2	Температура суспензии пиридона	41	°С
k	Константа скорости реакции	1,6·10 ¹¹	с ⁻¹
E	Энергия активации реакции	83,25	кДж/моль
R	Универсальная газовая постоянная	8,31	Дж/(моль·°С)
n	Порядок реакции	1	–
H	Тепловой эффект нитрования	1,5·10 ³	Дж/моль
c	Теплоемкость витамина В ₆	1550	Дж/(кг·°С)
ρ	Плотность витамина В ₆	1431	кг/ м ³
c_1	Теплоемкость HNO ₃	1744	Дж/(кг·°С)
ρ_1	Плотность HNO ₃	1400	кг/ м ³
c_2	Теплоемкость суспензии пиридона	1529	Дж/(кг·°С)
ρ_2	Плотность суспензии пиридона	1696	кг/ м ³
S	Площадь теплообмена	14,6	м ²
k_t	Коэффициент теплопередачи к воде	947	Вт/(м ² ·°С)
V_w	Объем воды в рубашке	0,585	м ³
c_w	Теплоемкость воды в рубашке	4179	Дж/(кг·°С)
ρ_w	Плотность воды в рубашке	992,1	кг/ м ³
T_w	Температура воды на входе в рубашку	8	°С

Модель реактора дополняется математическими моделями аппаратуры, учитывающими их характеристики, погрешности и динамику.

При моделировании характеристик регулирующих органов во внимание принимается изменение коэффициента гидравлического сопротивления λ в зависимости от скорости потока жидкости. Данное явление обусловлено сущностью процесса регулирования, при котором в зависимости от степени открытия регулирующего органа протекает разное количество управляющего потока. Расчет коэффициента λ в круглых трубах ведется по формулам (2)–(4). Расчет учитывает изменения расхода и, следовательно, числа Рейнольдса. В качестве входных параметров используется текущее значение числа Рейнольдса (Re) и безразмерный коэффициент шероховатости $n_{eq}=D/\Delta_{eq}$, равный отношению внутреннего диаметра трубопровода (D) к эквивалентной шероховатости трубы (Δ_{eq}). Разработанная модель (2) представляет собой аппроксимацию известной номограммы Колбрука–Уайта для определения коэффициента λ . Для диапазона чисел $Re > 4000$ разработанная модель имеет вид ($x = \ln(n_{eq})$):

$$\lambda = \frac{1,91 \cdot 10^4 \cdot x^{-5,2} + 39}{1000} + \frac{184,2 \cdot x^{-0,26} - 131,7}{1000} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-\lg(\text{Re}) - \frac{\lg(4000)}{1,14 \cdot 10^{13} \cdot e^{-\left(\frac{x-56,5}{10,8}\right)^2}}}{1}} \right). \quad (2)$$

Для диапазона чисел $Re < 2000$ при моделировании используется уравнение Стокса

$$\lambda = 64 / \text{Re}. \quad (3)$$

Для диапазона чисел $2000 < Re < 4000$ применяется уравнение вида

$$\lambda = 0,629 \cdot e^{-0,00216 \cdot \text{Re}} + 0,0137 \cdot e^{-0,000274 \cdot \text{Re}}. \quad (4)$$

Для окончательного получения влияния РО на поток жидкости в трубопроводе с учетом скорости потока и λ , выбранной линейной или равнопроцентной расходной характеристикой РО (обеспечивающей пропорциональную зависимость между пропускной способностью клапана и ходом плунжера), используется аналитическая модель вида:

$$Q = \sqrt{\frac{-K \cdot \gamma + \sqrt{K^2 \cdot \gamma^2 + 4 \cdot (K-1) \cdot Q_{\max}^2 \cdot \gamma}}{2 \cdot (K-1)}}. \quad (5)$$

Здесь Q — объемный расход среды, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{\max} — максимальный расход в системе при полностью открытом РО; γ — вспомогательный коэффициент; K — коэффициент, зависящий от формы пропускной характеристики РО.

Коэффициент K равен для линейной $K = 1/S^2$ и равнопроцентной $K = e^{7,82 \cdot (1-S)}$ пропускных характеристик РО, где S — степень открытия РО ($0 < S < 1$).

Вспомогательный коэффициент равен

$$\gamma = \frac{(P_i - P_f + \Delta P_h) \cdot \pi^2 \cdot D^5}{8 \cdot \rho \cdot (\sum \xi \cdot D + L \cdot \lambda)}. \quad (6)$$

Здесь P_i — начальное давление в линии, Па; P_f — конечное давление в линии, Па; ΔP_h — гидростатический напор, Па; ξ — коэффициент местного гидравлического сопротивления; ρ — плотность потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; L — длина прямых участков трубопровода, м; λ — коэффициент гидравлического трения; D — диаметр трубопровода, м.

Таким образом, полученные зависимости (5), (6) позволяют учесть нелинейную зависимость расхода от степени открытия РО.

Модель электрического прямоходного исполнительного механизма разработана исходя из следующего:

- время полного хода составляет 20 с;
- выбег моделируется инерционным звеном с запаздыванием, где запаздывание составляет 0,04 с, а постоянная времени — 0,06 с;
- люфт составляет 0,5 % хода;
- введено ограничение на 1200 включений / час.

Для улучшения качества регулирования ПСАУ используется модель разделенного управления на потоке. Так, поток азотной кислоты в реактор разделен на два потока, каждый оснащен РО со своими характеристиками. Введенный в программу регулирования логический элемент распределяет расход среды через РО таким образом, что большая часть его проходит через РО со степенью открытия S^1 , а меньшая — со степенью открытия S^2 . Суммарный расход среды, проходящий через оба РО, равен управляющему воздействию. Для моделирования ограничения скорости перемещения исполнительного механизма (степени открытия РО) и выбора РО, который будет осуществлять управляющее воздействие, в программе управления заложен алгоритм, показанный на рис. 2.

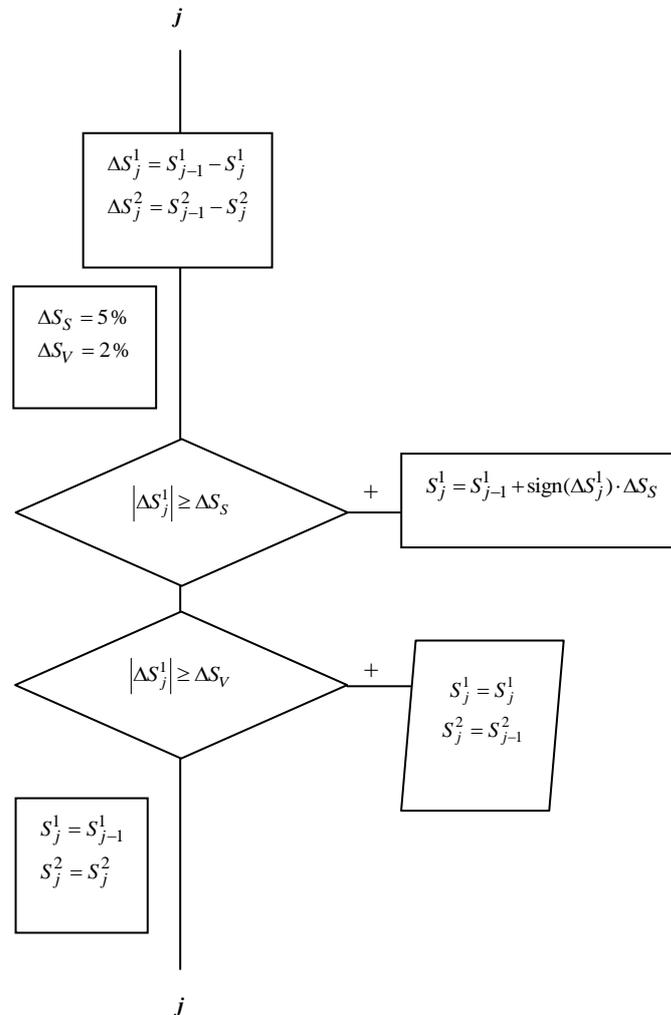


Рис. 2

На значение управления, полученного с регулятора, накладывается нелинейность типа люфта величиной 0,5 % хода регулирующего органа. Далее формируется сигнал разности степени открытия РО на предыдущем и текущем шагах. Если это приращение больше реальной скорости перемещения исполнительного механизма (ИМ), то степень открытия РО ограничивается 5 % открытия в данном такте (DSs) (время полного хода составляет 20 с). Однако если приращение величины открытия РО меньше 2 % (ΔSV), то обрабатывать данное возмущение будет второй РО с меньшей площадью проходного сечения.

Для управления объектом выбран многомерный линейный оптимальный цифровой регулятор с моделью скачкообразных возмущений. Расчет регулятора ведется в соответствии с методикой, описанной в [12, 13]. Уравнение разработанного цифрового регулятора, записанное для текущего момента времени, имеет такой вид (уравнение динамики возмущений опущено):

$$u = -K_1 \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ -T_w + (x_4 + x_4^{meas.er.}) \end{bmatrix} - K_2 \cdot x_r,$$

где x_i — состояния модели реактора, x_r — состояния интегральной составляющей, являющейся моделью возмущений в виде скачка, e — сигнал рассогласования, включающий погрешность (measurement error) соответствующего канала измерения ($x_i^{meas.er.}$). $e_i = -z_i + (x_i + x_i^{meas.er.})$, где z_1 — задание по уровню в реакторе; z_2 — задание по концентрации выходного продукта; z_3 — задание по температуре в реакторе.

При синтезе регулятора использовался интегральный квадратичный критерий качества с весовой матрицей состояния Q и матрицей управления R , где $Q = 0,011 \cdot \text{diag} \cdot I$; $Q(5,5) = 0,3$; $Q(7,7) = 0,01$; $R = 2000$.

Настройки регулятора K_1 и K_2 равны

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,091 & -0,0019 & -0,0005 \\ 0,035 & -0,07 & 0,0078 & -0,00002 \\ -0,0078 & -0,14 & -0,01 & -0,00056 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 0,0072 & 0,00056 & -0,0007 \\ 0,001 & -0,00043 & 0,00019 \\ -0,00012 & -0,0002 & -0,0002 \end{bmatrix}.$$

Реактор оснащен измерительными преобразователями. Преобразователи температуры предназначены для измерения температуры процесса нитрования и охлаждающей воды в рубашке. Ультразвуковой уровнемер и концентратомер обеспечивают непрерывное измерение уровня в реакторе и концентрации витамина В₆ на выходе. Информация об измеряемых параметрах поступает на вход промышленного компьютера, в котором реализуется алгоритм управления реактором. В метрологии принято погрешность моделировать равномерным распределенным стационарным случайным шумом, следовательно, при моделировании используем этот подход [14].

Модель термопреобразователей имеет следующие характеристики:

- абсолютная погрешность (Δt_{ABS}) составляет $(0,15 + 0,002 \cdot t)$ °C;
- динамика представлена инерционным звеном с постоянной времени 7,8 с;

— сигнал на входе суммируется с равномерно распределенным стационарным шумом, амплитуда которого равна $\Delta t_{ABS} / \sqrt{3}$.

Модель ультразвукового уровнемера имеет такие характеристики:

— абсолютная погрешность измерения (Δh_{ABS}) составляет ± 3 мм;

— динамика представлена инерционным звеном с постоянной времени 0,2 с;

— сигнал на входе суммируется с равномерно распределенным стационарным шумом, амплитуда которого равна $\Delta h_{ABS} / \sqrt{3}$.

Модель концентромера имеет следующие характеристики:

— приведенная погрешность (γ_C) измерения составляет 2,5 %;

— динамика представлена инерционным звеном с постоянной времени 0,5 с;

— сигнал на входе суммируется с равномерно распределенным стационарным шумом, амплитуда которого равна $\gamma_C \cdot (\text{Диапазон}) / (\sqrt{3} \cdot 100)$.

Исследование прецизионной системы автоматического управления

Переходные процессы, полученные при моделировании разработанной системы управления, приведены на рис. 3 (*a* — уровень $h = x_1/3,2$, *b* — температура

в реакторе $T = x_3$, *в* — концентрация витамина В₆ на выходе реактора, $C = x_2$; 1 — система управления без учета свойств аппаратуры; 2 — прецизионная система управления; 3 — прецизионная система управления с разделением потоков).

Основным влияющим на процессы в реакторе возмущением, которое невозможно поддерживать технологически, является изменение плотности суспензии (концентрации пиридона в ней). Максимальное отклонение плотности суспензии равно 9,5 %.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, показывает, что прецизионное моделирование системы автоматического управления дает результаты, отличающиеся от упрощенного представления системы при моделировании. При разработке важно точное воспроизведение не только нелинейной модели объекта управления, но и реальных характеристик аппаратуры управления.

Несмотря на неидеальность аппаратуры автоматизации, созданная прецизионная САУ процессом синтеза витамина В₆ обеспечивает не только высокое качество полученного витамина, но и безопасность процесса синтеза. Строгое поддержание технологического режима препятствует протеканию нежелательных реакций, приводящих к примесям и нарушению гомологической формулы витамина В₆. Кроме того, строгое под-

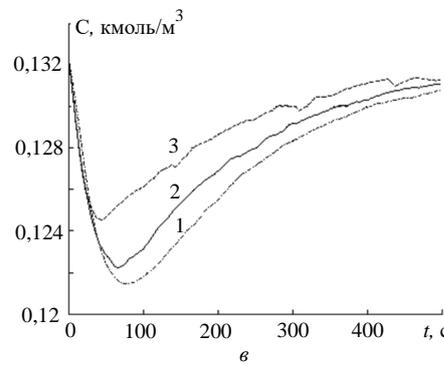
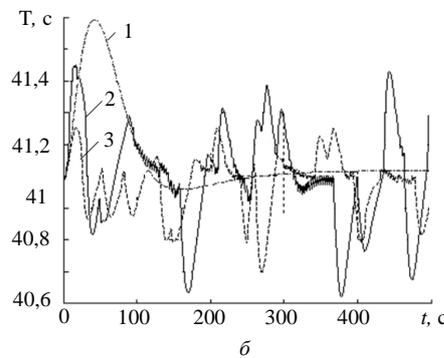
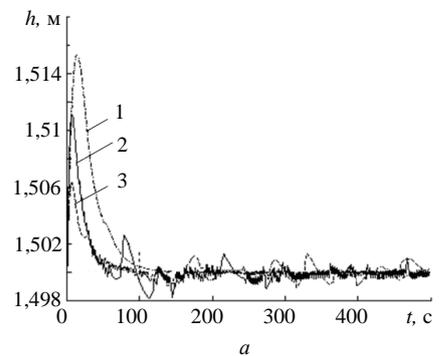


Рис. 3

держание температуры в зоне реакции снимает потенциальную опасность неконтролируемого роста температуры при экзотермической реакции нитрования. Применение управления с разделением потоков исходных продуктов позволило реализовать более точное управляющее воздействие при нанесении внутренних и внешних возмущений. Видно, что характерной особенностью предложенного подхода, обеспечивающей учет нелинейных свойств компонентов САУ, является получение более достоверных результатов моделирования.

На рис. 4 изображены переходные процессы изменения управляемых параметров при одновременном изменении нагрузки на 25 % и отклонении плотности суспензии пиридона: *a* — температура в реакторе $T = x_3$, *б* — концентрация витамина В₆ на выходе реактора, $C = x_2$; 1 — система управления на базе локальных регуляторов; 2 — прецизионная система управления; 3 — прецизионная система управления с разделением потоков.

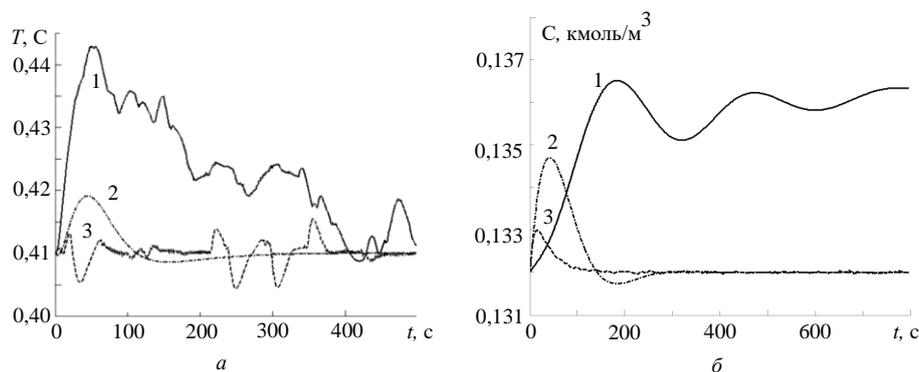


Рис. 4

Результаты исследования показали, что разработанная ПСАУ обладает свойством робастности при изменении нагрузки установки, чего не может обеспечить система управления на базе локальных регуляторов при стабилизации концентрации продукта, а также температуры в реакторе в зоне допустимых и безопасных для проведения реакции пределов.

Заключение

Разработана прецизионная система автоматического управления реактором синтеза витамина В₆. Модель реактора учитывает взаимное влияние параметров, теплопередачу и кинетику химической реакции. Модель аппаратуры автоматизации учитывает погрешности, инерционности, запаздывания датчиков и исполнительных механизмов, люфт, выбег и количество включений исполнительных механизмов.

Проведенная разработка может послужить основой методики создания прецизионных САУ химическими реакторами непрерывного типа в фармацевтике и, возможно, в других отраслях промышленности.

О.А. Стопакевич, О.О. Уліцька

ПРЕЦИЗІЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ХІМІЧНИМ РЕАКТОРОМ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Розглянуто розробку прецизійної системи автоматичного керування хімічним реактором безперервної дії в процесі синтезу вітаміну В₆. В реактор надходять

потоки концентрованої азотної кислоти і суспензії піридону з оцтовим ангідридом. Реакція взаємодії піридону з кислотою є екзотермічною, тому в реакторі передбачена сорочка для охолодження суміші. Хімічний реактор синтезу вітаміну В₆, з точки зору моделювання, є реактором ідеального перемішування. Модель реактора враховує взаємний вплив параметрів, теплопередачу і кінетику хімічної реакції. Модель апаратури автоматизації враховує її основні властивості. Беруться до уваги динаміка виконавчих механізмів, вибіг, швидкість ходу валу, що дозволяє більш точно реалізувати керування. Облік особливостей вимірювальних пристроїв при моделюванні системи керування підвищує реалістичність перехідних процесів і оцінки якості системи. Ядром системи є оптимальний нелінійний багатовимірний регулятор. Система керування дозволяє забезпечити високоточне підтримання температури екзотермічної реакції за рахунок обліку властивостей апаратури. Крім цього, досягається більш якісна компенсація збурень за рахунок застосування підходу керування з поділом вхідних потоків порівняно з типовою системою керування. Розроблена система має властивість робастності при зміні навантаження установки, забезпечуючи високу якість і безпеку процесу синтезу отриманого вітаміну. Суворе підтримання технологічного режиму перешкоджає протіканню небажаних реакцій, що призводять до домішок і порушення гомологічної формули вітаміну В₆. Розглянутий алгоритм може служити основою методики розробки прецизійних систем автоматичного керування процесами хіміко-технологічного типу.

Ключові слова: прецизійна система автоматичного керування, реактор, вітамін В₆, нелінійна математична модель.

A.A. Stopakevich, E.O. Ulitskaya

PRECISION CONTROL SYSTEM FOR A CONTINUOUS CHEMICAL REACTOR

The article discusses the development of a precision automatic control system for a continuous chemical reactor in the synthesis of vitamin B₆. The reactor receives streams of concentrated nitric acid and a suspension of pyridone with acetic anhydride. The reaction of pyridone with acid is exothermic, therefore a jacket is provided in the reactor for cooling the mixture. The chemical reactor for the synthesis of vitamin B₆, from the point of view of modeling, is a reactor of ideal mixing. The reactor model takes into account the mutual influence of parameters, heat transfer and the kinetics of a chemical reaction. The model of automation equipment takes into account its basic properties. Take into account the dynamics of the actuators, coasting, the speed of the shaft, which allows more accurate control. Taking into account the features of measuring devices in control system modeling increases the realism of transients and assessing the quality of the system. The core of the system is an optimal nonlinear multidimensional controller. The control system allows to provide high-precision maintenance of the temperature of the exothermic reaction by taking into account the properties of the equipment. In addition, a higher quality compensation of disturbances is achieved through the use of a control approach with separation of incoming flows in comparison with a typical control system. The developed system has the property of robustness when changing the load of the installation, ensuring high quality and safety of the synthesis process of the obtained vitamin. Strict maintenance of the technological regime prevents the occurrence of undesirable reactions leading to the occurrence of impurities and the violation of the homologous formula of vitamin B₆. The considered development algorithm can serve as the basis for the development of precision automated process control systems of chemical-technological type.

Keywords: precision automatic control system, reactor, vitamin B₆, nonlinear mathematical model.

1. Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М. Прецизионное управление нестационарными летательными аппаратами по углу крена. «Международный научно-технический журнал «Проблемы управления». 2011. №5. С. 82–87.
2. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2014. **76**, № 4. С. 164–173.
3. Precision control of modular robot manipulators: the VDC approach with embedded FPGA. W.H. Zhu, T. Lamarche, E. Dupuis, D. Jameux, P. Barnard, G. Liu. *IEEE Trans. on Robotics*. 2013. **9**, N 5. P. 1162–1179. DOI: 10.1109/TRO.2013.2265631.
4. Lei L., Yi Y. Modeling and precision control of systems with hysteresis. UK, Oxford : Butterworth–Heinemann, 2015. 178 p.
5. Стопакевич А.А. Разработка робастной системы управления колонной атмосферной перегонки нефти. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2 (77). С. 49–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50964.
6. Стопакевич А.А., Стопакевич А.А. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 1(79). С. 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59107.
7. Fomin O., Masri M., Pavlenko V. Intelligent technology of nonlinear dynamics diagnostics using Volterra kernels moments. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. Publisher: NAUN. 2016. **10**. P. 158–165.
8. Patrascioiu C., Koester M., Fidlin A. Nonlinear dynamics of a hydraulic pressure control valve. *11th International Conference on Vibration Problems*. Lisbon, Portugal, 9–12 September 2013. P.129–135.
9. Patrascioiu C., Panaitescu C., Paraschiv N. Control valves modeling and simulation. *CONTROL'09 5th WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control*. La Laguna, Spain, July 01–03. P. 63–68.
10. Коротченкова Н.В., Самаренко В.Я. Витамины гетероциклического ряда. Строение, свойства, синтез, химическая технология. СПб : Изд-во СПХФА, 2006. 80 с.
11. Карякин Н.В. Основы химической термодинамики. М. : Академия, 2003. 463 с.
12. Ulitska O.O., Stopakevych O.A. Design of precise control systems of industrial plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N 2/2 (86). P. 56–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.98941.
13. Стопакевич А.А. Системный анализ и теория сложных систем управления. Одесса : Астропринт, 2013. 352с.
14. Стопакевич А.А. Моделирование погрешности термометра сопротивления при разработке информационно-управляющих систем. *Український метрологічний журнал*. 2015. №4. С. 33–36.

Получено 01.08.2018
После доработки 02.01.2019