

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, В.А. Зайцев, Г.В. Волкова

Александр Николаевич Лабутин, Владимир Юрьевич Невиницын \*, Галина Витальевна Волкова  
Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: lan@isuct.ru, nevinitsyn@gmail.com \*, konf\_gv@mail.ru

Виктор Александрович Зайцев

Кафедра информационных технологий, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000.  
E-mail: z-viktor-a@mail.ru

*В работе в качестве объекта управления рассмотрен жидкофазный химический реактор емкостного типа, снабженный механической мешалкой и теплообменной рубашкой. Аппарат функционирует в политропическом режиме. В реакторе реализуется многостадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция. Целью функционирования химического реактора является получение целевого продукта заданной концентрации. Решается задача аналитического синтеза системы автоматического управления концентрацией целевого компонента, которая обеспечивает инвариантность, ковариантность с задающими воздействиями, асимптотическую устойчивость и робастность при действии неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений. Предложен астатический закон управления, полученный с использованием синергетической теории управления. Используя метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) по заданному инвариантному многообразию, синтезирован нелинейный алгоритм управления, включающий интегральную составляющую, который решает задачу стабилизации концентрации целевого компонента на выходе реактора на заданном уровне в условиях действия возмущений на объект. Алгоритмический синтез закона управления проведен с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации. В результате имитационного моделирования установлено, что замкнутая система управления не имеет статической ошибки регулирования при действии на объект неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений, изменении задающих воздействий и начальном отклонении переменных состояния от значений в статике. Следовательно, предложенный нелинейный алгоритм управления концентрацией обладает свойством робастности. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности метода АКАР и перспективности теории синергетического управления для решения задач алгоритмического синтеза систем управления нелинейными, многомерными и многосвязными технологическими объектами. Внедрение синтезированного закона управления химическим реактором на стадии проектирования позволит реализовать гибкие кибернетически организованные химико-технологические системы.*

**Ключевые слова:** робастная система управления, аналитический синтез, синергетическая теория управления, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, химический реактор, компьютерное моделирование

## ROBUST CONCENTRATION CONTROL OF TARGET PRODUCT IN CHEMICAL REACTOR

A.N. Labutin, V.Yu. Nevinitsyn, V.A. Zaytsev, G.V. Volkova

Alexander. N. Labutin, Vladimir Yu. Nevinitsyn \*, Galina V. Volkova

Department of Technical Engineering, Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia.

E-mail: lan@isuct.ru, nevinitsyn@gmail.com \*, konf\_gv@mail.ru

Viktor A. Zaytsev

Department of Information Technologies, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: z-viktor-a@mail.ru

*A liquid-phase continuous stirred tank reactor equipped with a mechanical stirrer and cooling jacket is considered as a control object. The reactor operates in the polytropic mode. The multistep series-parallel exothermic process is carried out in the reactor. The objective of chemical reactor operation is to obtain the key product of specified concentration. The paper deals with analytical synthesis of automatic concentration control system of target product which provides invariance, covariance to the given actions, asymptotic stability and robustness under the action of uncontrollable parametric and signal disturbances. The astatic control law obtained using the synergetic control theory is proposed. Using the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR) for a given invariant manifold, a non-linear control algorithm with an integral part was synthesized which solves the problem of stabilization of the concentration of target component on the exit of the reactor at the given value under the action of disturbances on the object. Algorithmic synthesis of the control law is carried out using a non-linear mathematical model of the object without the use of the linearization procedure. As a result of simulation it was found that the closed-loop control system has no static control error under the action of uncontrollable parametric and signal disturbances on the object, changes in the set points and initial deviation of the state variables from the static values. Consequently, the proposed non-linear concentration control algorithm has the property of robustness. The obtained results indicate the effectiveness of the ADAR method and the prospects of the synergetic control theory for solving problems of algorithmic synthesis of control systems of non-linear, multi-dimensional and multi-connected technological objects. The integration of the synthesized control law of chemical reactor at the design stage will allow implementing flexible cybernetically organized chemical-technological systems.*

**Key words:** robust control system, analytical synthesis, synergetic control theory, analytical design of aggregated regulators, chemical reactor, continuous stirred tank reactor, computer simulation

### Для цитирования:

Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Зайцев В.А., Волкова Г.В. Робастное управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 12. С. 129–136

### For citation:

Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Zaytsev V.A., Volkova G.V. Robust concentration control of target product in chemical reactor. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 12. P. 129–136

### ВВЕДЕНИЕ

Центральным звеном производственного процесса превращения исходных веществ в конечные продукты является реакторный узел, который должен быть кибернетически организованным. Это требование означает, что на стадии проектирования решается задача оптимального син-

теза реакторного узла, а на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений [1]. Вторая подзадача может быть решена только путем разработки системы управления объектом.

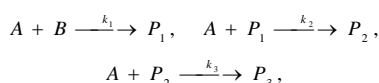
Одним из основных требований к системе управления является требование робастности, т.е.

способности сохранять работоспособность в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений. Проблема робастного управления является одной из важнейших в теории и практике автоматического управления [2]. Анализ публикаций показывает, что для обеспечения робастности систем управления химическими реакторами используют адаптивные системы автоматического управления с подстройкой параметров [3, 4], системы с прогнозирующими моделями [5, 6], безынерционные регуляторы состояния [7], робастные системы на основе типовых ПИД-регуляторов [8, 9], нечеткие системы управления [10-12], искусственные нейронные сети [13-15]. Однако указанные подходы неэффективны при синтезе систем управления существенно нелинейными объектами. Кроме того, недостатком интеллектуальных систем управления является необходимость наличия реального объекта управления и результатов его эксплуатации для обучения нейронной сети и формулирования базы правил нечеткой логики, что делает невозможным построение системы управления на стадии проектирования технологического процесса. Перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный в рамках синергетической теории управления [16, 17].

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 [16, 17]. Эффективность алгоритмов, синтезированных с применением синергетической теории управления, показана в ряде работ [18-30].

#### ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим широко применяемый в химической промышленности жидкофазный реактор емкостного типа непрерывного действия, снабженный механической мешалкой для перемешивания реакционной смеси и теплообменной рубашкой (рис. 1). В аппарате реализуется сложная экзотермическая реакция оксиэтилирования бутилового спирта, имеющая большое практическое значение:



где  $A, B$  – оксид этилена и спирт, соответственно;  $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции;  $k_1, k_2, k_3$  – констан-

ты скоростей стадий. Аппарат функционирует в политропическом режиме. Целью функционирования химического реактора является получение целевого компонента  $P_2$  заданной концентрации.

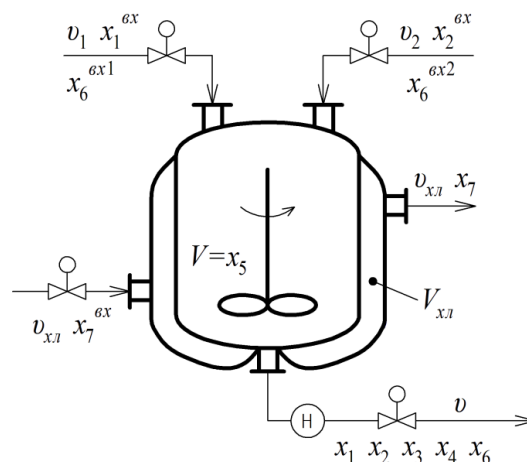


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора  
Fig. 1. Schematic diagram of the chemical reactor

На рис. 1 введены обозначения:  $x_1^{ex}, x_2^{ex}$  – концентрации исходных реагентов;  $x_6^{ex1}, x_6^{ex2}$  – температуры потоков исходных реагентов;  $v_1, v_2$  – расходы исходных реагентов;  $v_{xl}$  – 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.

Рассматриваемый реактор, как правило, является элементом сложной химико-технологической системы, например, каскада реакторов или элементом реакторного узла более сложной структуры [31].

В соответствии с назначением и целью функционирования реактора основным технологическим параметром, подлежащим стабилизации, является концентрация целевого компонента на выходе из аппарата в условиях действия возмущений. Регулирующим входным воздействием является поток исходного реагента  $v_2$  на входе в аппарат.

В предлагаемой работе решается задача аналитического синтеза нелинейного закона управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе методом АКАР, который обладает свойством робастности [17].

#### СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ АКАР

Из классической теории управления известно, что пропорциональный регулятор не обеспечивает отслеживания изменения задающих воз-

действий (уставок) или возмущающих воздействий по нагрузке. В связи с этим, представляется целесообразным синтезировать астатический закон управления концентрацией, обладающий свойством грубости (робастности). Это возможно, если в алгоритм управления ввести интегральную составляющую [16, 17].

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 [16, 17]. В нашем случае необходимо ввести одну дополнительную переменную  $z_1$ , подчиняющуюся уравнению

$$\frac{dz_1}{d\tau} = x_4 - \bar{x}_4, \quad (1)$$

где  $x_4$ ,  $\bar{x}_4$  – текущее и заданное значения концентрации целевого компонента в реакторе. Из (1) следует, что

$$z_1 = \int_0^{\tau} (x_4 - \bar{x}_4) d\tau$$

и закон управления необходимо синтезировать таким образом, чтобы переменная  $z_1$  входила в выражение для управляющего воздействия.

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

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{d\tau} &= x_4 - \bar{x}_4, \quad \frac{dx_1}{d\tau} = R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1 u, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2 x_2 + (M_B - b_3 x_2) u, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3 u, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{\alpha_1} + \\ &+ \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2) x_6 + (x_6^{\alpha_2} - x_6) b_3 u, \\ \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2 (x_6 - x_7) + b_1 (x_7^{\alpha_3} - x_7), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_A = v_1 x_1^{\alpha_1} / V$ ;  $M_B = x_2^{\alpha_2} / V$ ;  $b_1 = v_{x_7} / V_{x_7}$ ;  $b_2 = v_1 / V$ ;  $b_3 = 1 / V$ ;  $\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ;  $\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$ ;  $\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{x_7} C_{x_7} V_{x_7})$ ;  $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$ ,  $R_2 = -k_1 x_1 x_2$ ,  $R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3$ ,  $R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$  – скорость реакции по компонентам  $A$ ,  $B$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ , соответственно;  $k_i = f_i(x_6)$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – константы скоростей стадий, подчиняющиеся закону Аррениуса;  $\Delta H_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей

стадии реакции;  $K_T$ ,  $F_T$  – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата;  $\rho$ ,  $C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;  $\rho_{x_7}$ ,  $C_{x_7}$  – плотность и теплоемкость хладагента;  $u = v_2$  – регулирующее воздействие.

Анализ системы дифференциальных уравнений (2) показывает, что объект является многомерным, нелинейным и многосвязным.

Согласно решаемой задаче, цель управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого компонента на выходе аппарата на заданном уровне  $\bar{x}_4$  в условиях действия возмущений. В качестве регулирующего воздействия выбран расход реагента  $B$  на входе в аппарат –  $v_2$ , который оказывает непосредственное воздействие на переменную  $x_4$ . Таким образом, канал управления запишется:  $u \rightarrow x_4$ , где  $u=v_2$ .

Как показано в [32], при таком выборе управления объект является полностью управляемым в пространстве состояний и обладает свойством полной наблюдаемости при измерении только регулируемой переменной  $x_4$ , либо переменных  $x_4$  и  $x_6$ , при этом остальные компоненты вектора состояния могут быть восстановлены путем построения наблюдателя (при отсутствии практической возможности измерения всего вектора состояния).

Поскольку управляющее воздействие непосредственно входит в уравнение для переменной  $x_4$  системы (2), то процедура синергетического синтеза закона управления осуществляется за один этап (метод АКАР по заданному инвариантному многообразию) [16, 17].

Синергетическая постановка задачи: необходимо синтезировать закон управления  $u(x)$ , который переводит объект из произвольного начального состояния ( $x^0$ ) в фазовом пространстве в окрестность сконструированного многообразия  $\psi(x)=0$ , а затем обеспечивает его движение вдоль  $\psi(x)=0$  в заданное конечное состояние  $x_4^* = \bar{x}_4$ .

Для поиска закона управления  $u(x)$  введем в рассмотрение макропеременную, отражающую технологическое требование к системе:

$$\psi_1 = (x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1, \quad (3)$$

где  $\gamma_1$  – настроечный параметр интегральной составляющей закона управления.

Макропеременная  $\psi_1$  удовлетворяет решению основного функционального уравнения метода АКАР  $T_1 \psi_1 + \psi_1 = 0$ , которое в развернутом

виде с учетом выражения (3) в силу системы (2) примет вид:

$$T_1 [R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u + \gamma_1 (x_4 - \bar{x}_4)] + (x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1 = 0 \quad (4)$$

Из (4) получаем выражение для закона управления:

$$u = \frac{(x_4 - \bar{x}_4) + \gamma_1 z_1}{T_1 b_3 x_4} + \frac{R_4}{b_3 x_4} - \frac{b_2}{b_3} + \frac{\gamma_1 (x_4 - \bar{x}_4)}{b_3 x_4} \quad (5)$$

Выражение (5) определяет закон управления концентрацией целевого компонента. Параметрами настройки закона управления являются постоянная времени  $T_1$  и параметр  $\gamma_1$ , отвечающий за вклад интегральной составляющей. Условие асимптотической устойчивости системы в целом относительно введенного в фазовое пространство многообразия  $\psi_1=0$  имеет вид:  $T_1 > 0, \gamma_1 > 0$ .

Анализ структуры закона управления (5) показывает, что в его выражение входят переменные состояния объекта – величины  $x_1, x_3, x_4, x_6$ . На практике измерение всех переменных состояния, входящих в алгоритм управления, может оказаться невозможным в связи с отсутствием технических средств измерения концентраций некоторых веществ либо нецелесообразным, что обусловлено высокой стоимостью измерительного оборудования (датчиков). Исходя из выше изложенного, программно-техническая реализация алгоритма управления возможна двумя способами:

1) осуществляется измерение переменных состояния  $x_1, x_3, x_4, x_6$ , текущие значения которых используются для расчета управляющего воздействия (5) или строится наблюдатель при измерении части переменных состояния (переменной  $x_4$  или переменных  $x_4$  и  $x_6$ );

2) измеряется только регулируемая переменная –  $x_4$ . Остальные переменные состояния, входящие в закон управления, не измеряются и не определяются с помощью наблюдателя. Их значения при расчете управляющего воздействия принимаются постоянными и равными значениям этих переменных в статике.

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Методами компьютерного моделирования проведено исследование системы управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе с использованием синтезированного нелинейного закона. Исследованы свойства инвариантности к внешним и внутренним возмущениям, ковариантности с задающими воздействиями и

асимптотической устойчивости замкнутой системы. Моделирование проводилось при технологических и конструктивных параметрах, обеспечивающих оптимальный режим работы химического реактора [32].

В результате имитационного моделирования установлено, что замкнутая система управления не имеет статической ошибки регулирования при действии на объект неконтролируемых параметрических и сигнальных возмущений, изменении задающих воздействий и отклонении начальных условий от статических значений при реализации варианта закона управления, предусматривающего только частичное измерение переменных состояния объекта. Следовательно, предложенный нелинейный алгоритм управления концентрацией обладает свойством робастности (грубости).

На рис. 2-4 приведены примеры переходных процессов в замкнутой системе «химический реактор – нелинейный робастный регулятор» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики на 20% и кусочно-постоянном возмущении по параметру  $K_T$  на 20%, что соответствует возмущению в области больших отклонений от состояния равновесия. Отклонение переменных состояния объекта от значений в статике может быть вызвано любым параметрическим или сигнальным возмущением, что приводит к выходу объекта из желаемого состояния равновесия. При этом система управления должна обеспечивать перевод объекта в заданное конечное состояние, определяемое требуемым значением концентрации ( $x_4 = \bar{x}_4 = 0,652$  моль/л).

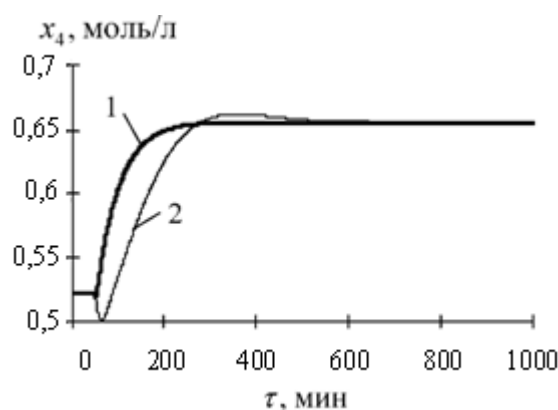


Рис. 2. Изменение регулируемой переменной при начальном отклонении переменных состояния от статики ( $\Delta x_i = -0,2x_i^0$ ): 1 – первый вариант реализации алгоритма; 2 – второй вариант Fig. 2. The change in a controlled variable at the initial deviation of the state variables from the static ( $\Delta x_i = -0,2x_i^0$ ): 1 – the first variant of the algorithm implementation; 2 – the second one

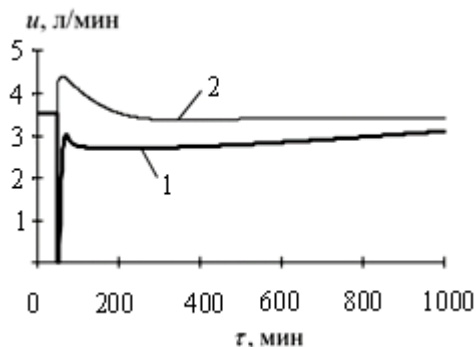


Рис. 3. Изменение управляющего воздействия при начальном отклонении переменных состояния от статики ( $\Delta x_i = -0.2x_i^0$ ): 1 – первый вариант реализации алгоритма; 2 – второй вариант  
 Fig. 3. The change in a control action at the initial deviation of the state variables from the static ( $\Delta x_i = -0.2x_i^0$ ): 1 – the first variant of the algorithm implementation; 2 – the second one

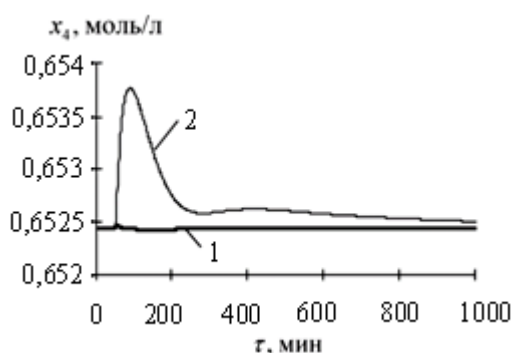


Рис. 4. Изменение регулируемой переменной при кусочно-постоянном возмущении по коэффициенту теплопередачи ( $\Delta K_T = -0.2K_T^0$ ): 1 – первый вариант реализации алгоритма; 2 – второй вариант  
 Fig. 4. The change in a controlled variable at piecewise constant disturbance of the heat transfer coefficient ( $\Delta K_T = -0.2K_T^0$ ): 1 – the first variant of the algorithm implementation; 2 – the second one

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лабути́н А.Н.** Оптимизация гибких многопродуктовых реакторных систем непрерывного типа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 1999. Т. 42. Вып. 1. С. 117-122.
2. **Гайду́к А.Р.** Синтез робастных систем управления с запаздыванием. *Автоматика и телемеханика.* 1997. № 1. С. 90-99.
3. **Petre E., Selisteanu D., Roman M.** Nonlinear robust adaptive control strategies for a lactic fermentation process. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018. V. 93. N 2. P. 518-526. DOI: 10.1002/jctb.5383.
4. **Yuan P., Zhang B., Mao Z.** A self-tuning control method for Wiener nonlinear systems and its application to process control problems. *Chin. J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. N 2. P. 193-201. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.07.003.
5. **Oravec J., Bakosova M.** Robust model-based predictive control of exothermic chemical reactor. *Chem. Papers.* 2015. V. 69. N 10. P. 1389-1394. DOI: 10.1515/chempap-2015-0146.
6. **Ghaffari V.** A robust control system scheme based on model predictive controller (MPC) for continuous-time systems. *Opt. Control Applic. Meth.* 2017. V. 38. N 6. P. 1032-1041. DOI: 10.1002/oca.2310.
7. **Yazdi M.B., Jahed-Motlagh M.R.** Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization. *Chem. Eng. J.* 2009. V. 155. N 3. P. 838-843. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.008.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, методами теории синергетического управления решена задача аналитического синтеза нелинейного робастного закона регулирования, обеспечивающего управление концентрацией целевого компонента в химическом реакторе в условиях действия на объект параметрических и сигнальных возмущений. Алгоритмический синтез закона управления проведен с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации. Компьютерное моделирование показало инвариантность замкнутой системы «химический реактор – регулятор» к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности метода АКАР и перспективности теории синергетического управления для решения задач алгоритмического синтеза систем управления нелинейными, многомерными и многосвязными технологическими объектами. Внедрение синтезированного закона управления химическим реактором на стадии проектирования позволит реализовать гибкие кибернетически организованные химико-технологические системы.

## REFERENCES

1. **Labutin A.N.** Optimization of flexible multiproduct continuous reactor systems. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 1999. V. 42. N 1. P. 117-122 (in Russian).
2. **Gaiyduk A.R.** Synthesis of robust control systems with delay. *Avtomatika Telemekhanika.* 1997. V. 1. P. 90-99 (in Russian).
3. **Petre E., Selisteanu D., Roman M.** Nonlinear robust adaptive control strategies for a lactic fermentation process. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018. V. 93. N 2. P. 518-526. DOI: 10.1002/jctb.5383.
4. **Yuan P., Zhang B., Mao Z.** A self-tuning control method for Wiener nonlinear systems and its application to process control problems. *Chin. J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. N 2. P. 193-201. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.07.003.
5. **Oravec J., Bakosova M.** Robust model-based predictive control of exothermic chemical reactor. *Chem. Papers.* 2015. V. 69. N 10. P. 1389-1394. DOI: 10.1515/chempap-2015-0146.
6. **Ghaffari V.** A robust control system scheme based on model predictive controller (MPC) for continuous-time systems. *Opt. Control Applic. Meth.* 2017. V. 38. N 6. P. 1032-1041. DOI: 10.1002/oca.2310.
7. **Yazdi M.B., Jahed-Motlagh M.R.** Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization. *Chem. Eng. J.* 2009. V. 155. N 3. P. 838-843. DOI: 10.1016/j.cej.2009.09.008.

8. **Anil C., Sree R.P.** PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method. *Asia-Pacific. J. Chem. Eng.* 2015. V. 10. N 5. P. 734-742. DOI: 10.1002/apj.1911.
9. **Babu D.C., Kumar D.B.S., Sree R.P.** Tuning of PID Controllers for Unstable Systems Using Direct Synthesis Method. *Ind. Chem. Eng.* 2017. V. 59. N 3. P. 215-241. DOI: 10.1080/00194506.2016.1255570.
10. **Mohammadzaheri M., Chen L.** Double-command fuzzy control of a nonlinear CSTR. *Kor. J. Chem. Eng.* 2010. V. 27. N 1. P. 19-31. DOI: 10.2478/s11814-009-0347-8.
11. **So G.B., Jin G.G.** Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR. *Kor. J. Chem. Eng.* 2018. V. 35. N 4. P. 819-825. DOI: 10.1007/s11814-017-0329-1.
12. **Chen Q.X., Yu L.** A delay-dependent robust fuzzy MPC approach for nonlinear CSTR. *Canad. J. Chem. Eng.* 2010. V. 88. N 3. P. 425-431. DOI: 10.1002/cjce.20277.
13. **Kamesh R., Rani K.Y.** Application of artificial neural network-based generic model control to multivariable processes. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 2017. V. 12. N 5. P. 775-789. DOI: 10.1002/apj.2117.
14. **Li S., Gong M.Z., Liu Y.J.** Neural network-based adaptive control for a class of chemical reactor systems with non-symmetric dead-zone. *Neurocomputing.* 2016. V. 174. P. 597-604. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.09.072.
15. **Bahita M., Belarbi K.** Fuzzy modelling and model reference neural adaptive control of the concentration in a chemical reactor (CSTR). *Ai & Society.* 2018. V. 33. N 2. P. 189-196. DOI: 10.1007/s00146-018-0806-z.
16. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
17. **Колесников А.А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: Едиториал УРСС. 2005. 240 с.
18. **Labutin A.N., Nevinityn V.Y.** Analytical synthesis of chemical reactor control system. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 3. P. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
19. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В.** Робастное управление температурным режимом химического реактора. *Информатика и системы управления.* 2018. № 3. С. 115-123. DOI: 10.22250/isu.2018.57.115-123.
20. **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. Вып. 2. С. 38-44. DOI: 10.6060/tcct.2017602.5479.
21. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В.** Управление температурным режимом химического реактора с применением нелинейного робастного алгоритма. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2018. № 2. С. 64-68.
22. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В.** Программно-технический комплекс для проектирования и полунатурного моделирования систем управления химическими реакторами. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2016. № 2. С. 111-117.
23. **Labutin A.N., Nevinityn V.Y.** Analytical synthesis of chemical reactor control system. *Internat. J. Advan. Stud.* 2016. V. 6. N 1. P. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37.
24. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В.** Синтез эффективного комплекса "реактор – управляющая система" с использованием синергетического подхода. *Хим. пром-ть.* 2014. Т. 91. № 2. С. 63-67.
25. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В.** Управление реакторным узлом с распределенной подачей исходного реагента. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2014. № 2. С. 165-172.
8. **Anil C., Sree R.P.** PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method. *Asia-Pacific. J. Chem. Eng.* 2015. V. 10. N 5. P. 734-742. DOI: 10.1002/apj.1911.
9. **Babu D.C., Kumar D.B.S., Sree R.P.** Tuning of PID Controllers for Unstable Systems Using Direct Synthesis Method. *Ind. Chem. Eng.* 2017. V. 59. N 3. P. 215-241. DOI: 10.1080/00194506.2016.1255570.
10. **Mohammadzaheri M., Chen L.** Double-command fuzzy control of a nonlinear CSTR. *Kor. J. Chem. Eng.* 2010. V. 27. N 1. P. 19-31. DOI: 10.2478/s11814-009-0347-8.
11. **So G.B., Jin G.G.** Fuzzy-based nonlinear PID controller and its application to CSTR. *Kor. J. Chem. Eng.* 2018. V. 35. N 4. P. 819-825. DOI: 10.1007/s11814-017-0329-1.
12. **Chen Q.X., Yu L.** A delay-dependent robust fuzzy MPC approach for nonlinear CSTR. *Canad. J. Chem. Eng.* 2010. V. 88. N 3. P. 425-431. DOI: 10.1002/cjce.20277.
13. **Kamesh R., Rani K.Y.** Application of artificial neural network-based generic model control to multivariable processes. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 2017. V. 12. N 5. P. 775-789. DOI: 10.1002/apj.2117.
14. **Li S., Gong M.Z., Liu Y.J.** Neural network-based adaptive control for a class of chemical reactor systems with non-symmetric dead-zone. *Neurocomputing.* 2016. V. 174. P. 597-604. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.09.072.
15. **Bahita M., Belarbi K.** Fuzzy modelling and model reference neural adaptive control of the concentration in a chemical reactor (CSTR). *Ai & Society.* 2018. V. 33. N 2. P. 189-196. DOI: 10.1007/s00146-018-0806-z.
16. **Kolesnikov A.A.** Synergetic theory of control. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 p. (in Russian).
17. **Kolesnikov A.A.** Synergetic control methods of complex systems: the theory of system synthesis. М.: Editorial URSS. 2005. 240 p. (in Russian).
18. **Labutin A.N., Nevinityn V.Y.** Analytical synthesis of chemical reactor control system. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 3. P. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
19. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu., Volkova G.V.** Robust control of a chemical reactor temperature regime. *Informatika Sistemy Upravleniya.* 2018. N 3. P. 115-123 (in Russian). DOI: 10.22250/isu.2018.57.115-123.
20. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu.** Synthesis of chemical reactor nonlinear control algorithm using synergetic approach. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 2. P. 38-44 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017602.5479.
21. **Nevinityn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V.** Temperature control of chemical reactor using nonlinear robust algorithm. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2018. N 2. P. 64-68 (in Russian).
22. **Nevinityn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V.** Software-hardware solution for design and simulation of chemical reactors control systems. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2016. N 2. P. 111-117 (in Russian).
23. **Labutin A.N., Nevinityn V.Y.** Analytical synthesis of chemical reactor control system. *Internat. J. Advan. Stud.* 2016. V. 6. N 1. P. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37.
24. **Labutin A.N., Nevinityn V.Yu., Devetyarov A.N., Volkova G.V.** Synthesis of an effective complex "reactor – control system" using a synergetic approach. *Khim. Prom-t'.* 2014. V. 91. N 2. P. 63-67 (in Russian).
25. **Nevinityn V.Yu., Labutin A.N., Devetyarov A.N., Volkova G.V.** Control of reactor unit with partitioned feeding of general reagent. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2014. N 2. P. 165-172 (in Russian).

26. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Деветьяров А.Н.** Система управления каскадом химических реакторов для проведения последовательно-параллельной реакции. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2013. Т. 56. Вып. 11. С. 131-135.
27. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю.** Синергетический синтез системы управления химическим реактором. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 11. С. 104-107.
28. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В.** Синтез и моделирование многомерной системы управления каскадом химических реакторов. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2012. № 2. С. 150-157.
29. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю.** Управление химическим реактором в условиях изменения спроса на продукцию. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2012. № 3. С. 122-129.
30. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю.** Синергетический синтез регулятора концентрации целевого компонента в каскаде химических реакторов. *Изв. вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством.* 2011. № 3. С. 86-92.
31. **Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L.** Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 5. P. 637-643. DOI: 10.1134/S0040579514050170.
32. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Деветьяров А.Н.** Системный анализ химического реактора как объекта управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 92-99. DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.
26. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Devetyarov A.N.** Control system of chemical reactor cascade for series-parallel reaction realization. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 11. P. 131-135 (in Russian).
27. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu.** Synergetic synthesis of chemical reactor control system. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 11. P. 104-107 (in Russian).
28. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Volkova G.V.** Synthesis and modeling of multidimensional control system of chemical reactors cascade. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2012. N 2. P. 150-157 (in Russian).
29. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu.** Chemical reactor control under conditions of production demand change. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2012. N 3. P. 122-129 (in Russian).
30. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu.** Synergetic synthesis of concentration regulator of the target component in the cascade of chemical reactors. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Ekon. Finansy Upravl. Proizvodstvom.* 2011. N 3. P. 86-92 (in Russian).
31. **Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L.** Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 5. P. 637-643. DOI: 10.1134/S0040579514050170.
32. **Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Devetyarov A.N.** System analysis of chemical reactor as control object. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 9. P. 92-99 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017609.5587.

*Поступила в редакцию 19.04.2018  
Принята к опубликованию 08.10.2018*

*Received 19.04.2018  
Accepted 08.10.2018*