

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

**В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин, Г.В. Волкова, А.Н. Деветьяров**

Владимир Юрьевич Невиницын \*, Александр Николаевич Лабутин, Галина Витальевна Волкова, Андрей Николаевич Деветьяров

Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000.

E-mail: nevinitsyn@gmail.com \*, lan@isuct.ru, konf\_gv@mail.ru, and9yarov@gmail.com

*На основе системного подхода в статье решена задача анализа химического реактора как объекта управления и сформулированы рекомендации по структурно-топологическому синтезу различных вариантов системы управления. Описаны этапы и задачи системного анализа реактора как объекта управления. Указанные задачи решены на примере аппарата емкостного типа при реализации сложной последовательно-параллельной экзотермической реакции оксигилирования бутилового спирта, имеющей большое практическое значение. Необходимость решения задач системного анализа обусловлена повышением требований к качеству и эффективности работы комплекса реактор – подсистема управления, расширением функциональных задач реактора, включая, в том числе, изменение производительности аппарата. В то же время сложность и нетривиальность задач системного анализа обусловлена такими характеристиками объекта, как многомерность, нелинейность и многосвязность. Разработана концептуальная и математическая модель объекта, решена задача оптимизации реактора. Определены численные значения входных переменных и переменных состояния в оптимальном статическом режиме, обеспечивающих заданное значение производительности. Проведено исследование динамических свойств реактора путем построения кривых разгона по различным каналам. Установлено, что объект в окрестности рабочей точки по большинству динамических каналов нелинеен. Получена линеаризованная математическая модель химического реактора в пространстве состояний. Определены матрицы состояния и управления. Исследованы общесистемные свойства объекта (устойчивость стационарного состояния, наблюдаемость и управляемость) при выборе различных вариантов векторов измеряемых и управляющих переменных. Установлено, что исследуемый объект обладает свойством устойчивости свободного движения. Предложены варианты топологической структуры системы управления реактором.*

**Ключевые слова:** системный анализ, химический реактор, устойчивость, наблюдаемость, управляемость, оптимизация, компьютерное моделирование

## SYSTEM ANALYSIS OF CHEMICAL REACTOR AS CONTROL OBJECT

**V.Yu. Nevinitsyn, A.N. Labutin, G.V. Volkova, A.N. Devetyarov**

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

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

E-mail: nevinitsyn@gmail.com \*, lan@isuct.ru, konf\_gv@mail.ru, and9yarov@gmail.com

*Using system approach, the problem of the analysis of chemical reactor as control object has been solved. Recommendations for structural and topological synthesis of various control system types were given. The steps and tasks of system analysis of the reactor as control object were described. Mentioned tasks were solved by the example of capacity-type device for the realization of a complex series-parallel exothermal reaction of oxyethylation of butyl alcohol having great practical importance. The need to solve the problems of system analysis is due to the increase in the requirements for the quality and efficiency of the reactor – control subsystem complex, the expansion of the reactor's functional tasks including change in apparatus productivity. At the same time, the complexity and non-triviality of the tasks of system analysis is caused by such characteristics of the object as multidimensionality, nonlinearity and multiplicity. Conceptual and mathematical models of the object were created. Reactor optimization problem was solved. Numerical values of the input variables and the state variables in the optimal static mode were determined which provide desired value of productivity. The study of dynamic properties of the reactor was carried out by plotting step response curves through various channels. It is established that the object in the vicinity of the operating point by the most dynamic channels is nonlinear. The linearized mathematical model of the chemical reactor in the state space was obtained. The state and control matrixes were defined. The system-wide properties of the object (steady state stability, controllability and observability) were studied when selecting different options of vectors of measured and control variables. It is established that the object has the property of free motion stability. The variants of the topological structure of the reactor control system were proposed.*

**Key words:** system analysis, chemical reactor, stability, observability, controllability, optimization, computer simulation

**Для цитирования:**

Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Девятьяров А.Н. Системный анализ химического реактора как объекта управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 92-99

**For citation:**

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

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированный технологический комплекс, образованный химическим реактором и соответствующей системой автоматического управления, является сложной иерархической системой со всеми свойствами, присущими этим системам. Данное обстоятельство предполагает системный подход к решению задач проектирования собственно химического реактора и системы управления объектом [1, 2].

Системный анализ химического реактора как объекта управления на стадии проектирования предполагает решение следующих задач:

- разработка концептуальной и математической модели объекта;
- формулировка и решение задачи оптимального синтеза – определение структурных, режимно-технологических и конструктивных параметров, обеспечивающих экстремум некоторого критерия эффективности;

- исследование и анализ статических и динамических свойств объекта;
- анализ общесистемных свойств объекта (устойчивость стационарного состояния, наблюдаемость и управляемость), определяющих структуру системы автоматического управления и требования к алгоритму управления, который должен обеспечивать оптимальный режим функционирования в условиях действия возмущений.

Необходимость решения указанных задач обусловлена повышением требований к качеству и эффективности работы комплекса реактор – подсистема управления, расширением функциональных задач реактора, включая, в том числе, изменение производительности аппарата [3].

подавляющее большинство исследований посвящено решению первых двух задач [2, 4, 5] и недостаточное внимание уделяется анализу общесистемных свойств реактора как объекта управления, хотя были опубликованы замечательные работы по устойчивости химических реакторов [6-8].

В то же время сложность и нетривиальность перечисленных задач обусловлена такими характеристиками объекта, как многомерность, нелинейность и многосвязность [1, 9, 10].

В общем случае математическая модель реактора в пространстве состояний имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{d\tau} &= \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}), \\ \bar{y} &= C \cdot \bar{x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{u}$  –  $n$ -мерный вектор состояния и  $g$ -мерный вектор управления, соответственно;  $\bar{y}$  –  $m$ -мерный вектор выходных переменных;  $C$  – ( $m \times n$ ) матрица измерений;  $\bar{f}(\cdot)$  – нелинейные функции своих аргументов.

Исследование устойчивости стационарного состояния объекта и управляемости для нелинейных моделей в форме (1) в общем случае практически затруднено [11]. Поэтому для реальных задач в настоящее время используются линеаризованные в окрестности стационарного состояния  $\{\bar{x}^0, \bar{u}^0\}$  модели

$$\frac{d\hat{x}}{d\tau} = A\hat{x} + B\hat{u}, \quad (2)$$

$$\hat{y} = C \cdot \hat{x}, \quad (3)$$

где  $A = \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  – матрица состояния;

$B = \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial u_k} \right\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $k = \overline{1, r}$  – матрица управления;

$$\hat{x}_i = x_i - x_i^0; \hat{u}_i = u_i - u_i^0.$$

Система управления, включающая объект и управляющее устройство, может быть работоспособной только в том случае, если собственные движения в ней затухают, т.е. свободное движение системы устойчиво. В связи с этим, для корректного решения задачи алгоритмического и параметрического синтеза системы управления необходимо располагать информацией об устойчивости свободного движения объекта.

Согласно первого метода Ляпунова А.М. [12], стационарное состояние объекта устойчиво, т.е. исследуемый объект обладает свойством устойчивости свободного движения, если корни характеристического уравнения  $\det(\lambda I - A) = 0$  (собственные числа матрицы состояния  $A$ )  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , имеют отрицательные вещественные части.

Если объект устойчив, то при синтезе системы управления основной задачей является обеспечение требуемого качества процессов управления (время регулирования, статическая и динамическая точность). Если же стационарное состояние

объекта неустойчиво, то задача алгоритмического и параметрического синтеза должна быть решена таким образом, чтобы в первую очередь обеспечить устойчивость свободного движения системы в целом, и затем уже обеспечить заданные значения показателей качества процессов управления.

Необходимым условием для решения задачи синтеза и реализации системы управления объектом является наличие свойства управляемости в пространстве состояний или в пространстве выходных переменных. Условия управляемости для нелинейных объектов могут быть получены только для специальных классов последних [11]. Для реальных задач возможно установить наличие или отсутствие этого свойства путем анализа линеаризованных в окрестности стационарного состояния уравнений модели (2). Если линеаризованная модель управляема в окрестности установившегося состояния ( $\bar{x}^0$ ), то делается допущение, что управляем и исходный нелинейный объект.

Для исследования свойства управляемости в пространстве состояний строится матрица управляемости и определяется ее ранг [12]:

$$U = [B : AB : A^2B : \dots : A^{n-1}B]. \quad (4)$$

Если матрица  $U$  имеет полный ранг, то объект обладает свойством полной управляемости. В ситуации, когда возможно сформировать несколько наборов вектора управления, и соответственно, несколько вариантов матрицы  $B$  в (2), для каждого из них необходимо провести анализ управляемости объекта.

С учетом практической невозможности полного измерения вектора состояния важно исследовать свойство наблюдаемости объекта. Объект (2), (3) обладает свойством полной наблюдаемости, если матрица наблюдаемости

$$H = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : (A^T)^{n-1} C^T] \quad (5)$$

имеет полный ранг [12]. Очевидно, что состав и количество измеряемых переменных состояния (структура матрицы  $C$ ) должна обеспечить возможность построения наблюдателя состояния при невозможности измерения всего вектора состояния.

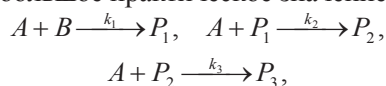
Невырожденность матриц управляемости и наблюдаемости, определяя наличие этих свойств у объекта, одновременно позволяет найти в явной форме матрицы преобразования исходной системы (2) к управляемой и наблюдаемой канонической формам [13]. Преимущество управляемой канонической формы заключается в простоте вычисления модели вход-выход и синтезе алгоритма управления с обратной связью по состоянию [14]. Наблюдаемая каноническая форма позволяет более просто построить подходящий наблюдатель состояния

[14]. Математические модели объекта в новом базисе, построенные с использованием матрицы преобразования, позволяют эффективно использовать современные методы синтеза линейных САУ: модальное управление, оптимальное управление, полиномиальные регуляторы [13, 15, 16].

Ниже представлены результаты решения перечисленных задач на примере реактора смешения для проведения сложной параллельно-последовательной реакции с использованием методов компьютерного моделирования.

*Постановка и решение задачи оптимального синтеза реактора*

В емкостном аппарате реализуется трехстадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция оксиэтилирования бутилового спирта, имеющая большое практическое значение [17]:



где  $A, B$  – оксид этилена и спирт, соответственно;  $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции;  $k_1, k_2, k_3$  – константы скоростей стадий. Исходные реагенты подаются в аппарат отдельными потоками. Целевым является продукт  $P_2$ . Реактор снабжен рубашкой, в которую подается хладагент.

Анализируемый реактор, как правило, является элементом сложной ХТС, например, каскада реакторов или элементом реакторного узла более сложной структуры, как это показано в [5].

Математическая модель динамики реактора имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + \frac{v_1 x_1^{ex}}{V} - \frac{v x_1}{V}, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + \frac{v_2 x_2^{ex}}{V} - \frac{v x_2}{V}, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - \frac{v x_3}{V}, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - \frac{v x_4}{V}, \\ \frac{dx_5}{d\tau} &= \frac{v_1 x_5^{ex1}}{V} + \frac{v_2 x_5^{ex2}}{V} - \frac{v x_5}{V} + \\ &+ \frac{\Delta H_1 k_1 x_1 x_2 + \Delta H_2 k_2 x_1 x_3 + \Delta H_3 k_3 x_1 x_4}{\rho C} - \\ &- \frac{K_T F_T (x_5 - x_6)}{V \rho C}, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \frac{v_{xl} x_6^{ex}}{V_{xl}} - \frac{v_{xl} x_6}{V_{xl}} + \frac{K_T F_T (x_5 - x_6)}{V_{xl} \rho_{xl} C_{xl}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $v_1, v_2$  – расходы входных потоков;  $x_1^{ex}, x_2^{ex}$  – концентрации исходных реагентов во входных потоках;  $x_5^{ex1}, x_5^{ex2}$  – температуры входных потоков;

$v_{xl}$  – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;  $x_6^{ex}, x_6$  – 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;  $x_5$  – температура реакционной смеси в аппарате;  $V$  – объем аппарата;  $V_{xl}$  – объем хладагента в рубашке;  $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4, R_2 = -k_1 x_1 x_2, R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3, R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$  – скорость реакции по компонентам  $A, B, P_1, P_2$ , соответственно;  $\Delta H_i, i = 1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;  $k_i, i = 1, \dots, 3$  – константы скоростей стадий, подчиняющиеся закону Аррениуса;  $K_T, F_T$  – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата;  $\rho, C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;  $\rho_{xl}, C_{xl}$  – плотность и теплоемкость хладагента.

Анализ системы ОДУ (6) показывает, что объект является многомерным, нелинейным и многосвязным.

Предположим, что в результате решения задачи синтеза оптимальной ХТС по производству целевого компонента [4, 18] определена оптимальная производительность реактора  $\bar{G} = \bar{x}_4 \cdot \bar{v}$ . Исходя из этого, возможно сформулировать критерий эффективности функционирования аппарата. С позиций системного анализа [19], одним из основополагающих показателей эффективности любой системы является результативность, т.е. степень достижения системой цели функционирования. В нашем случае в качестве такого показателя предлагается использовать отклонение текущего значения производительности ( $G$ ) от заданного ( $\bar{G}$ )  $\Delta G = |\bar{G} - G|$ . Текущее значение  $G$  определяется концентрацией целевого компонента на выходе аппарата, которая зависит от соотношения расходов входных потоков реагентов ( $\beta = v_1/v_2$ ), среднего времени пребывания ( $\bar{\tau} = V/\bar{v}$ ) и температуры ( $t$ ) [17]. Перечисленные технологические параметры являются управляемыми переменными на стадии проектирования, некоторые из которых могут выступать в качестве управляющих воздействий на стадии эксплуатации объекта.

Содержательная формулировка задачи оптимизации реактора выглядит следующим образом: необходимо определить значения  $\beta, \bar{\tau}, t$ , обеспечивающие минимальное расхождение между заданным и текущим значениями производительности при заданной общей нагрузке  $\bar{v}$  и ограничениях на температуру. Математическая формулировка задачи оптимизации имеет вид:

$$\{\beta^*, \bar{\tau}^*, t^*\} = \arg \min_{\beta, \bar{\tau}, t} [\bar{G} - G(\beta, \bar{\tau}, t)]^2. \quad (7)$$

Ограничениями выступают уравнения математической модели статики, а также ограничения на температуру в форме неравенства и на значения входных потоков в форме равенства:

$$\varphi_1 = t \leq 140 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_2 = \bar{v} - v_1 - v_2 = \bar{v} - \frac{1+\beta}{\beta} v_1 = 0.$$

Решение задачи проведено для различных значений производительности по целевому продукту  $\bar{G} = \bar{v} \cdot \bar{x}_4$ .

Расчеты проводились при следующих технологических, физико-химических и кинетических данных [20, 21]:  $x_1^{\text{ex}} = 19,74$  (моль/л);  $x_2^{\text{ex}} = 10,93$  (моль/л);  $x_5^{\text{ex}1} = 20$  ( $^\circ\text{C}$ );  $x_5^{\text{ex}2} = 30$  ( $^\circ\text{C}$ );  $x_6^{\text{ex}} = 20$  ( $^\circ\text{C}$ ); коэффициент теплопередачи  $K_T = 12$  (кДж/[м<sup>2</sup>·мин·К]); плотность реакционной смеси  $\rho = 0,9$  (кг/л); теплоемкость реакционной смеси  $C_p = 2$  (кДж/[кг·К]); плотность хладагента  $\rho_{\text{хл}} = 1$  (кг/л); теплоемкость хладагента  $C_{\text{хл}} = 4,18$  (кДж/[кг·К]); тепловые эффекты стадий реакции  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 80$  (кДж/моль); энергия активации  $E_1 = 48635$  (Дж/моль); предэкспоненциальный множитель константы скорости  $k_1$   $k_{10} = 109860$  (л/[моль·мин]); соотношения констант скоростей последовательных стадий  $k_2/k_1 = 2,0$ ,  $k_3/k_1 = 2,5$ .

Было исследовано влияние  $\beta$ ,  $\bar{v}$ ,  $t$ ,  $V$  на концентрацию целевого компонента  $x_4$ . На рис. 1 в качестве примера представлена зависимость концентрации целевого компонента от объема реактора для различных нагрузок на аппарат ( $\bar{v}$ ), различных соотношений входных потоков реагентов ( $\beta = v_1/v_2$ ) и температур ( $t$ ).

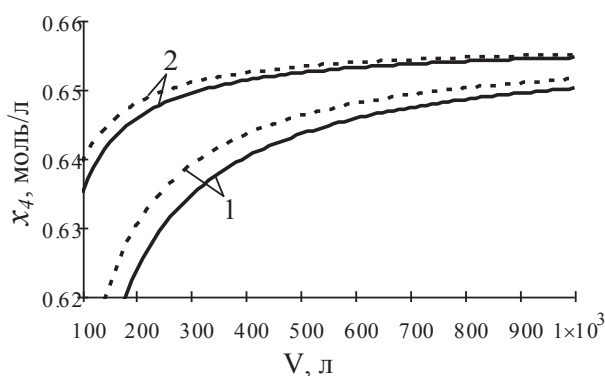


Рис. 1. Зависимость концентрации целевого компонента от объема аппарата; 1, 2 – температура 110  $^\circ\text{C}$  и 140  $^\circ\text{C}$ , соответственно; сплошная линия –  $\bar{v} = 5$  л/мин,  $\beta=1,5/3,5$ , пунктирная линия –  $\bar{v} = 4$  л/мин,  $\beta=1,2/2,8$

Fig. 1. The dependence of the concentration of the target component on the volume of the apparatus; 1, 2 – temperatures are 110  $^\circ\text{C}$  and 140  $^\circ\text{C}$ , respectively; solid line –  $\bar{v} = 5$  L/min,  $\beta=1.5/3.5$ , dashed line –  $\bar{v} = 4$  L/min,  $\beta=1.2/2.8$

Определены оптимальные значения  $\beta^* = 0,43$ ,  $t^* = 140$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $\bar{t}^* = 100$  (мин) при заданных значениях входных переменных и производительности  $\bar{G}$ . Далее были определены поверхность теплообмена аппарата ( $F_T$ ), а также параметры потока хладагента ( $v_{\text{хл}}$ ,  $x_6^{\text{вх}}$ ,  $x_6$ ). Координаты (параметры) рабочей точки следующие:  $V = 500$  (л),  $V_{\text{хл}} = 290$  (л),  $F_T = 2,9$  (м<sup>2</sup>),  $\bar{v} = 5$  (л/мин),  $\beta = v_1/v_2 = 1,5/3,5 = 0,43$ ,  $v_{\text{хл}} = 3,84$  (л/мин),  $\bar{x}_4 = 0,652$  (моль/л),  $\bar{x}_5 = 140$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $x_6^{\text{вх}} = 20$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $\bar{x}_6 = 102$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $v_1 = 1,5$  (л/мин),  $v_2 = 3,5$  (л/мин).

#### Исследование устойчивости стационарного состояния и динамических свойств объекта

После определения значений входных переменных и переменных состояния в оптимальном статическом режиме, важным моментом для решения задачи синтеза системы управления является исследование устойчивости стационарного состояния (свободного движения) объекта [12].

В соответствии с целью функционирования реактора основной задачей САУ объектом является стабилизация концентрации целевого компонента и температуры реакционной смеси в условиях действия возмущений. Исходя из физической реализуемости, в качестве управляющих воздействий выбраны расход входного потока реагента  $V$  и расход хладагента:  $u_1 = v_2$ ,  $u_2 = v_{\text{хл}}$ . Переходя в системе (6) к приращениям переменных  $\hat{x}_i = x_i - x_i^0$ ,  $\hat{u}_j = u_j - u_j^0$ ,  $i = \overline{1,6}$ ,  $j = \overline{1,2}$  получим линеаризованную модель объекта в форме (2).

Корни характеристического уравнения  $\det(\lambda_i I - A) = 0$  (собственные числа матрицы  $A$   $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1,6}$ ) имеют следующие значения:

$$\lambda_i = \begin{pmatrix} -0,6013 \\ -0,0853 \\ -0,0288 + 0,0082i \\ -0,0288 - 0,0082i \\ -0,0119 \\ -0,0100 \end{pmatrix}$$

Так как вещественные части всех собственных чисел отрицательны  $\text{Re}(\lambda_i) < 0$ ,  $i = \overline{1,6}$ , то исследуемый объект обладает свойством устойчивости свободного движения, т.е. стационарное состояние объекта устойчиво, что, как сказано ранее, необходимо учитывать при синтезе системы управления.

Необходимым этапом исследования химического реактора как объекта управления является исследование (изучение) динамических свойств объекта путем построения статических и динамических характеристик по различным каналам. Указанные свойства, показателями которых являются

коэффициенты передачи, постоянные времени и время запаздывания по различным каналам, позволяют сформулировать рекомендации по топологии системы управления и требования к алгоритмам автоматического регулирования.

С точки зрения частотных характеристик, инерционные технологические процессы представляют собой фильтры низкой частоты. Поэтому высокочастотные составляющие входных воздействий хорошо подавляются такими объектами и не оказывают существенного влияния на состояние технологического процесса. Для задач управления основной интерес представляют низкочастотные возмущения (скорость изменения которых близка к нулю). Поэтому в качестве тестирующих входных воздействий использовались ступенчатые изменения входных переменных [22]. Исходя из этого, проведено исследование динамических свойств путем построения кривых разгона по различным каналам.

На рис. 2, 3 в качестве примера представлены статические и динамические характеристики объекта по каналам  $v_2 \rightarrow x_4$  и  $v_2 \rightarrow x_5$ .

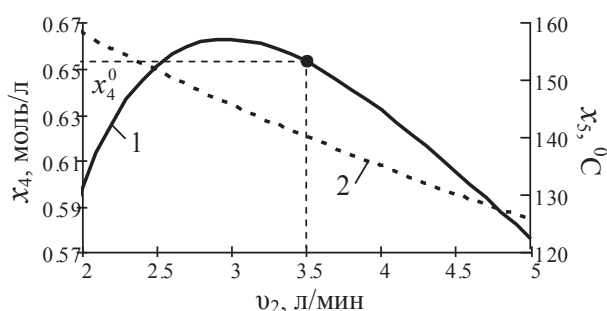


Рис. 2. Статические характеристики объекта по каналам  $v_2 \rightarrow x_4$  и  $v_2 \rightarrow x_5$ ; 1 – концентрация  $x_4$ , 2 – температура  $x_5$   
 Fig. 2. Static responses of the object for channels  $v_2 \rightarrow x_4$  and  $v_2 \rightarrow x_5$ ; 1 – concentration  $x_4$ , 2 – temperature  $x_5$

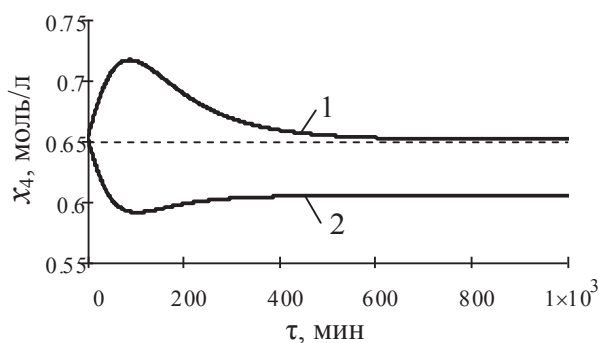


Рис. 3. Динамические характеристики объекта по каналу  $v_2 \rightarrow x_4$ ; 1 –  $\Delta v_2 = -1$  (л/мин), 2 –  $\Delta v_2 = +1$  (л/мин)  
 Fig. 3. Dynamic responses of the object for channel  $v_2 \rightarrow x_4$ ; 1 –  $\Delta v_2 = -1$  L/min, 2 –  $\Delta v_2 = +1$  L/min

Анализ характеристик показал, что объект в окрестности рабочей точки нелинеен по каналам:  $v_1 \rightarrow x_4$ ,  $v_2 \rightarrow x_4$ ,  $v_{хл} \rightarrow x_4$ ,  $v_{хл} \rightarrow x_5$ ,  $x_1^{вх} \rightarrow x_4$ ,  $x_2^{вх} \rightarrow x_5$ , а по каналам  $v_1 \rightarrow x_5$ ,  $v_2 \rightarrow x_5$  близок к линейному. Об этом, в частности, свидетельствует несимметричность кривых разгона по каналу  $v_2 \rightarrow x_4$  при положительном и отрицательном изменении входной переменной на одинаковое значение  $\pm 1$  л/мин (рис. 3). Особенность реакции объекта на отрицательную ступеньку  $\Delta v_2 = -1$  л/мин (кривая 1 на рис. 3) состоит в том, что концентрация  $x_4$  в новом установившемся состоянии совпадает с начальным значением  $x_4^0$ . Это объясняется переходом рабочей точки на статической характеристике (кривая 1 на рис. 2) с ниспадающей ветви характеристики на возрастающий участок.

*Наблюдаемость и управляемость реактора*

С практической точки зрения исследование свойства наблюдаемости позволяет сформулировать задание на разработку системы измерения, исходя из задач и цели управления технологическим процессом. Очевидно, что по возможности должны измеряться все переменные состояния, подлежащие регулированию, либо состав и количество измеряемых переменных состояния должны обеспечить возможность построения наблюдателя состояния.

Вторым практическим вопросом является выбор управляющих воздействий среди всех входных переменных. Здесь в первую очередь необходимо руководствоваться возможностями физической реализуемости управлений.

Были исследованы три варианта практической реализации измерений:

- измеряется концентрация целевого вещества –  $x_4$  и температура в реакторе –  $x_5$ , матрица измерений имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- измеряется только концентрация –  $x_4$ ,  $C = (000100)$ ;

- измеряется только температура –  $x_5$ ,  $C = (000010)$ .

Установлено, что объект полностью наблюдаем при первом и втором вариантах измерений переменных состояния и ненаблюдаем при третьем варианте.

Для исследуемого процесса возможна постановка различных вариантов задачи определения управляемости в пространстве состояний. Первый вариант – это исследование управляемости при синтезе системы стабилизации концентрации целевого компонента  $x_4 = \bar{x}_4$  и температуры процесса  $x_5 = \bar{x}_5$  с использованием вектора управления  $\{u_1 = v_2, u_2 = v_{хл}\}$ .

Второй и третий варианты – исследование управляемости при синтезе САУ только концентрацией  $x_4 = \bar{x}_4$  или только температурой  $x_5 = \bar{x}_5$  с использованием управления  $\{u_1 = v_2, u_2 = 0\}$  или  $\{u_1 = 0, u_2 = v_{\text{хл}}\}$ , соответственно.

Исследования показали, что при первом и втором вариантах построения системы управления она полностью управляема в пространстве состояний, матрицы управляемости имеют полный ранг. В третьем случае ранг матрицы управляемости  $\text{rank}(Y) = 5$ . Это означает, что существуют такие положения изображающей точки  $x = (x_1, x_2, \dots, x_6)^T$  в фазовом пространстве, из которых невозможно перевести объект в заданное конечное состояние, т.е. система не вполне управляема в пространстве состояний. В этом случае объект управляем в пространстве выходов при соответствующем выборе матрицы измерения  $C$  в уравнении  $y = Cx$ .

#### ВЫВОДЫ

В работе установлено, что свободное движение объекта в окрестности рабочей точки асимптотически устойчиво. Это означает, что объект обладает свойством стабилизируемости. Результаты исследования общесистемных свойств объекта управления позволяют решать задачу синтеза си-

стемы управления в различных постановках. Другими словами, они позволяют корректно формировать различные варианты топологической структуры будущей системы управления:

- При синтезе системы управления концентрацией целевого вещества при управляющем воздействии  $u_1 = v_2$  достаточно измерять  $x_4$ . Остальные компоненты вектора состояния могут быть оценены с помощью наблюдателя.

- При синтезе системы управления температурой процесса при управляющей воздействии  $u_2 = v_{\text{хл}}$  необходимо измерять концентрацию  $x_4$  и температуру  $x_5$ . При этом система будет наблюдаема и стабилизируема в пространстве состояний и управляема в пространстве выходов.

- При синтезе многомерной системы управления концентрацией и температурой при использовании управлений  $u_1 = v_2, u_2 = v_{\text{хл}}$  необходимо, как минимум, измерять  $x_4$  и  $x_5$ .

Выбор алгоритма управления объектом и метода параметрического синтеза САУ необходимо проводить с учетом того факта, что объект по большинству динамических каналов нелинеен. В [3, 10] предложено использовать методы синергетической теории управления для синтеза нелинейного алгоритма управления реактором и показана эффективность синтезированной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. М.: Наука. 1976. 500 с.
2. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Мищенко С.В., Островский Г.М. Новые подходы к интегрированному синтезу гибких автоматизированных химико-технологических систем. *Теорет. основы хим. технологии*. 2010. Т. 44. № 1. С. 69-77.
3. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Аналитический синтез системы управления химическим реактором. *Теорет. основы хим. технологии*. 2014. Т. 48. № 3. С. 318-322.
4. Островский Г.М., Волин Ю.М. Методы оптимизации химических реакторов. М.: Химия. 1967. 248 с.
5. Гордеев Л.С., Лабутин А.Н., Гордеева Е.Л. Синтез оптимальных многопродуктовых ресурсосберегающих реакторных систем. *Теорет. основы хим. технологии*. 2014. Т. 48. № 5. С. 580-587.
6. Вольтер Б.В., Сальников И.Е. Устойчивость режимов работы химических реакторов. М.: Химия. 1972. 192 с.
7. Кафаров В.В., Четкин В.А. Устойчивость химических реакторов. Сборник Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химической технологии. М.: ВINITI. 1980. Т. 8. С. 77-151.
8. Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. Л.: Химия. 1967. 328 с.
9. Тарутина Н.В., Софиев А.Э., Меньшутина Н.В. Анализ устойчивости функционирования мембранных биореакторов. *Теорет. основы хим. технологии*. 2008. Т. 42. № 3. С. 263-268.

#### REFERENCES

1. Kafarov V.V., Dorohov I.N. System analysis of chemical engineering processes. Strategy basics. M.: Nauka. 1976. 500 p. (in Russian).
2. Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Mishchenko S.V., Ostrovsky G.M. New approaches to the integrated synthesis of flexible automated chemical engineering systems. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2010. V. 44. N 1. P. 67-75. DOI: 10.1134/S0040579510010094.
3. Labutin A.N., Nevinityn V.Yu. Analytical synthesis of chemical reactor control system. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 3. P. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
4. Ostrovskii G.M., Volin Yu.M. Chemical reactor optimization methods. M.: Khimiya. 1967. 248 p. (in Russian).
5. 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.
6. Vol'ter B.V., Sal'nikov I.E. Stability of the chemical reactors performance. M.: Khimiya. 1972. 192 p. (in Russian).
7. Kafarov V.V., Chetkin V.A. Stability of chemical reactors. Collected Itogi Nauki i Tekhniki. Processes and apparatus of chemical technology. M.: Viniti. 1980. V. 8. P. 77-151 (in Russian).
8. Aris R. Analysis of the processes in chemical reactors. M.: Khimiya. 1967. 328 p. (in Russian).
9. Tarutina N.V., Sofiev A.E., Men'shutina N.V. Analysis of the performance stability of membrane bioreactors. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2008. V. 42. N 3. P. 251-256. DOI: 10.1134/S0040579508030044.

10. **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.
11. **Ли Э.Б., Маркус Л.** Основы теории оптимального управления. М.: Наука. 1972. 576 с.
12. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами. М.: Мир. 1983. 368 с.
13. **Алексеев А.А., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б.** Теория управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ. 1999. 435 с.
14. **Теряев Е.Д., Шамриков Б.М.** Цифровые системы и поэтапное адаптивное управление. М.: Наука. 1999. 330 с.
15. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. Под ред. Егупова Н.Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 736 с.
16. **Анисимов А.А., Котов Д.Г., Тарарькин С.В., Тютников В.В.** Анализ параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния. *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2011. № 5. С. 18-32.
17. **Лебедев Н.Н., Манаков М.Н., Швец В.Ф.** Теория технологических процессов основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия. 1975. 478 с.
18. **Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Петров В.Л.** Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия. 1979. 320 с.
19. **Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А.** Системный анализ в управлении. Под ред. Емельянова А.А. М.: Финансы и статистика. 2002. 368 с.
20. **Швец В.Ф., Цивинский Д.Н.** Кинетика реакции оксиэтилирования спиртов в бинарных смесях спирт-окись этилена. *Кинетика и катализ*. 1981. Т. 22. С. 1192-1199.
21. **Швец В.Ф., Цивинский Д.Н.** Кинетика оксиэтилирования спиртов в избытке окиси этилена. *Хим. пром-ть*. 1978. №5. С. 330-332.
22. **Александров А.Г.** Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение. 1986. 272 с.
10. **Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Devetyarov A.N.** The control system of chemical reactors cascade for the realization of a series-parallel reaction. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 11. P. 131-135 (in Russian).
11. **Lee E.B., Markus L.** Foundations of optimal control theory. M.: Nauka. 1972. 576 p. (in Russian).
12. **Ray Y.** Technological processes control methods. M.: Mir. 1983. 368 p. (in Russian).
13. **Alekseev A.A., Imaev D.H., Kuzmin N.N., Yakovlev V.B.** Control theory. SPb.: Izd. SPbGETU LETI. 1999. 435 p. (in Russian).
14. **Teryaev E.D., Shamrikov B.M.** Digital systems and phased adaptive control. M.: Nauka. 1999. 330 p. (in Russian).
15. Methods of classical and modern control theory. V. 2. Regulators synthesis and automatic control systems optimization theory. Ed. by Egupov N.D. M.: Izd. MGTU im. N.E. Bauman. 2000. 736 p. (in Russian).
16. **Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V.** Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2011. V. 50. N 5. P. 698-713. DOI: 10.1134/S1064230711040034.
17. **Lebedev N.N., Manakov M.N., Shvets V.F.** The theory of technological processes of basic organic and petrochemical synthesis. M.: Khimiya. 1975. 478 p. (in Russian).
18. **Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Petrov V.L.** Mathematical foundations of computer-aided design of chemical plants. M.: Khimiya. 1979. 320 p. (in Russian).
19. **Anfilatov V.S., Emel'yanov A.A., Kukushkin A.A.** System analysis in management. Ed. by Emel'yanov A.A. M.: Finansy i statistika. 2002. 368 p. (in Russian).
20. **Shvets V.F., Tsivinskiy D.N.** The reaction kinetics of oxyethylation of alcohols in binary mixtures of alcohol-ethylene oxide. *Kinetika i kataliz*. 1981. V. 22. P. 1192-1199 (in Russian).
21. **Shvets V.F., Tsivinskiy D.N.** The kinetics of oxyethylation of alcohols under excess of ethylene oxide. *Khimicheskaya promyshlennost*. 1978. N. 5. P. 330-332 (in Russian).
22. **Aleksandrov A.G.** Synthesis of multidimensional system regulators. M.: Mashinostroenie. 1986. 272 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 29.03.2017

Принята к опубликованию 07.06.2017

Received 29.03.2017

Accepted 07.06.2017