

10. Polishchuk, I.V., Bobkov, S.P. Ispol'zovanie metoda diskretnykh elementov dlya modelirovaniya protsessa neuprugogo deformirovaniya [Simulation of inelastic deformation using

discrete elements method]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 71–74.

11. Deyvis, R. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solids]. Moscow: Inostrannaya literatura, 1961. 104 p.

*Бобков Сергей Петрович,*

ФБГОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и цифровой экономики, e-mail: bsp@isuct.ru

*Bobkov Sergey Petrovich,*

Ivanovo State University of Chemical and Technology, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Information Technology and Digital Economics, e-mail: bsp@isuct.ru

*Полищук Илья Викторович,*

ФБГОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», соискатель кафедры информационных технологий и цифровой экономики, e-mail: ajto@mail.ru

*Polishchuk Ilya Viktorovich,*

Ivanovo State University of Chemical and Technology, Postgraduate, Department of Information Technology and Digital Economics, e-mail: ajto@mail.ru

УДК 66.011:681.51

## СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ

А.Н. ЛАБУТИН, Ю.Н. ЗАГАРИНСКАЯ, В.Ю. НЕВИНИЦЫН, Г.В. ВОЛКОВА, В.А. ЗАЙЦЕВ

ФБГОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: lan@isuct.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Проблема структурно-параметрического синтеза систем автоматического управления технологическими объектами обусловлена многомерностью, многосвязностью и нелинейностью их математических моделей. Несмотря на указанные свойства таких объектов, до настоящего времени для управления процессом используются традиционные линейные системы на базе ПИД-алгоритмов. Поскольку при синтезе линейных систем с использованием моделей «вход-выход» не учитывается многомерность и взаимное влияние координат состояния, в таких системах усиливается влияние параметрических и сигнальных возмущений на качество процессов управления. В условиях возрастания требований к качеству и эффективности управления технологическими процессами является целесообразным применение принципа управления по вектору состояния, основанного на использовании безынерционных регуляторов состояния, либо комбинированных регуляторов состояния, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния.

**Материалы и методы.** Исследование проведено с использованием методов системного анализа технологических процессов как объектов управления, методов теории автоматического управления, методов синтеза систем управления на базе регуляторов состояния, методов компьютерного моделирования.

**Результаты.** Получена линеаризованная математическая модель жидкофазного химического реактора в пространстве состояния. Установлено, что исследуемый объект обладает свойством устойчивости свободного движения и является полностью управляемым в пространстве состояния. Решена задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в химическом реакторе с использованием регуляторов состояния. Параметры настройки регуляторов состояния определены с использованием метода модального управления. Методом компьютерного моделирования комплекса «нелинейный объект – линейная подсистема управления» показана работоспособность САУ на базе регуляторов состояния с интегральной составляющей. Показано, что отсутствие интегральной составляющей в структуре алгоритма управления приводит к возникновению недопустимо большой статической ошибки регулирования.

**Выводы.** Для устранения статической ошибки регулирования и обеспечения свойства робастности системы управления в структуру регуляторов состояния рекомендуется вводить интегральную составляющую. Это обеспечивает работоспособность САУ при полном измерении вектора состояния.

**Ключевые слова:** химический реактор, нелинейный объект управления, регулятор состояния, модальное управление, интегральная составляющая, компьютерное моделирование

## SYNTHESIS AND ANALYSIS OF THE MULTIDIMENSIONAL TECHNOLOGICAL OBJECT CONTROL SYSTEM ON THE STATE REGULATOR BASIS

A.N. LABUTIN, Yu.N. ZAGARINSKAYA, V.Yu. NEVINITSYN, G.V. VOLKOVA, V.A. ZAITSEV  
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: lan@isuct.ru

### Abstract

**Background.** The problem of structural-parametric synthesis of automatic control systems (ACS) of technological objects is determined by the multi-dimensionality, multi-connectedness and nonlinearity of their mathematical models. Despite the indicated properties of such objects, traditional linear systems based on PID-algorithms are still used for process control. Since the synthesis of linear systems using input-output models does not take into account the multi-dimensionality and mutual influence of state coordinates, such systems increase the influence of parametric and signal perturbations on the quality of control processes. The increasing requirements for the quality and efficiency of technological processes control made it expedient to apply the control principle by the state vector based on the use of uninertial state regulators or combined state regulators including flexible feedback on the derivative state coordinates or state coordinate integrals.

**Materials and methods.** The research uses methods of system analysis of technological processes as control objects, methods of automatic control theory, methods of control systems synthesis on the state regulators basis, methods of computer simulation.

**Results.** The linearized mathematical model of liquid-phase chemical reactor in the state space has been obtained. It has been established that the investigated object has the property of free movement stability and it is fully controlled in the state space. The problem of synthesis of a single-channel concentration vector control system in a chemical reactor using state regulator has been solved. The parameters of state regulator settings have been determined using the method of modal control. The efficiency of the automatic control system on the basis of the state regulator with an integral component has been shown using the method of computer simulation of the 'nonlinear object – linear control subsystem' complex. It has been demonstrated that the absence of an integral component in the control algorithm structure leads to a great static error of regulation.

**Conclusions.** To eliminate the static error of control and ensure the robustness of the control system, it is recommended to introduce an integral component into the structure of state controller. This ensures the efficiency of the control system both for the case of complete measurement of the state vector and for the case of measurement of the output controlled variable only.

**Key words:** chemical reactor, nonlinear control object, state controller, modal control, integral part, computer simulation

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.2.057-064

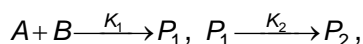
**Введение.** Необходимым условием решения проблемы создания энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов является повышение качества и эффективности функционирования систем управления объектами [1]. Вместе с тем задача структурно-параметрического синтеза САУ многомерными, многосвязными, нелинейными объектами в общем виде не решена [2]. Несмотря на указанные свойства объектов, до настоящего времени для управления процессами используются од-

ноконтурные и каскадные линейные САУ на базе ПИД-алгоритмов [3, 4]. Системы данного типа эффективны, если объект характеризуется стабильностью параметров, отсутствием взаимосвязанности переменных состояния и не предъявляются жесткие требования к качеству управления [5]. Поскольку при синтезе одноканальных линейных систем с использованием моделей «вход-выход» не учитывается взаимное влияние координат состояния, в таких системах усиливается влияние параметрических и сиг-

нальных возмущений на качество процессов управления [6]. Промежуточное положение между многомерными, многосвязными и одномерными системами занимают системы со скалярным управлением, в которых управляющее воздействие формируется как функция от координат состояния [7]. В условиях возрастания требований к качеству и эффективности управления технологическими процессами является целесообразным применение принципа управления по вектору состояния, основанного на использовании безынерционных регуляторов состояния (РС), либо комбинированных РС, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния [6, 8, 9]. При выбранной структуре системы управления с РС особое значение для обеспечения ее робастности приобретает метод параметрического синтеза системы. Наиболее часто используется для решения этой задачи метод модального управления [5, 10, 11].

Ниже решается задача синтеза одноканальной системы управления концентрацией в химическом реакторе с использованием регулятора состояния методом модального управления.

**Методы исследования.** Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется двухстадийная химическая реакция:



где  $A, B$  – исходные реагенты;  $P_1, P_2$  – продукты реакции;  $K_1, K_2$  – константы скоростей стадий.

Принципиальная схема реактора представлена на рис. 1. Исходные реагенты  $A$  и  $B$  подаются в аппарат отдельными потоками. Режим работы реактора – изотермический. Целевым продуктом является вещество  $P_1$ ;  $P_2$  – побочный продукт.

Математическая модель динамики объекта при допущении о постоянстве уровня имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{d\tau} &= \frac{v_1 C_{A_{\text{вх}}} - (v_1 + v_2) C_A + V(-K_1 C_A C_B)}{V}; \\ \frac{dC_B}{d\tau} &= \frac{v_2 C_{B_{\text{вх}}} + V(-K_1 C_A C_B) - (v_1 + v_2) C_B}{V}; \\ \frac{dC_{P_1}}{d\tau} &= \frac{V(K_1 C_A C_B - K_2 C_{P_1}) - (v_1 + v_2) C_{P_1}}{V}. \end{aligned} \quad (1)$$

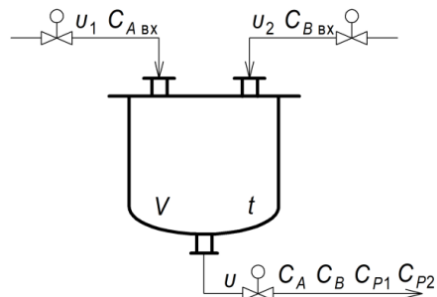


Рис. 1. Принципиальная схема реактора:  $u_1, u_2$  – расходы потоков исходных компонентов;  $C_{A_{\text{вх}}}, C_{B_{\text{вх}}}$  – концентрации исходных компонентов;  $U$  – расход смеси на выходе из реактора;  $t$  – температура смеси в реакторе;  $C_A, C_B, C_{P_1}, C_{P_2}$  – концентрации продуктов реакции;  $V$  – объем смеси в реакторе

Исходя из требований к содержанию побочного продукта в реакционной смеси ( $C_{P_2}$ ) при заданной нагрузке на аппарат по исходным реагентам  $\{(u_1; C_{A_{\text{вх}}}), (u_2; C_{B_{\text{вх}}})\}$  были определены режимно-технологические и физические параметры процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта. Значения параметров представлены ниже:  $V = 500$  л;  $t = 68,5$  °С;  $u_1 = 3$  л/мин;  $u_2 = 3,5$  л/мин;  $C_{A_{\text{вх}}} = 19,74$  моль/л;  $C_{B_{\text{вх}}} = 5$  моль/л;  $K_1 = 4,362 \cdot 10^{-3}$  л/(моль мин);  $K_2 = 4,362 \cdot 10^{-4}$  мин<sup>-1</sup>;  $C_A = 7,21$  моль/л;  $C_B = 0,787$  моль/л;  $C_{P_1} = 1,843$  моль/л.

Задача управления химическим реактором, функционирующим в изотермическом режиме, может быть сформулирована в различных постановках: стабилизация выхода целевого продукта  $P_1$ , т.е. стабилизация концентрации  $C_{P_1}$  в условиях действия возмущений, или стабилизация степени превращения исходного реагента  $B$ , т.е. концентрации  $C_B$ . В качестве управляющего воздействия предлагается использовать расход потока реагента  $B$  –  $\Delta u_2$ , так как реагент  $A$  подается в аппарат в существенном избытке по сравнению с реагентом  $B$ .

Поскольку предполагается синтез САУ на базе РС, проведено исследование устойчивости положения равновесия (свободного движения) объекта и управляемости в пространстве состояний. Для этого осуществлена линеаризация математической модели объекта в окрестности положения равновесия.

Линеаризованная математическая модель запишется следующим образом:

$$\frac{d\Delta\bar{C}}{dt} = A\Delta\bar{C} + Bu, \quad (2)$$

$$y = F\Delta\bar{C},$$

где  $\Delta\bar{C} = (\Delta C_A \ \Delta C_B \ \Delta C_{P1})^T$  – вектор состояния;  $u = \Delta u_2$  – управление;  $A, B$  – матрицы состояния и управления;  $y$  – выходная переменная;  $F$  – матрица выхода.

Матрицы  $A$  и  $B$  имеют следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0160 & -0,031 & 0 \\ -0,0034 & -0,044 & 0 \\ 0,0034 & 0,031 & -0,013 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,0140 \\ 0,00843 \\ -0,0037 \end{bmatrix}.$$

Матрица выхода при управлении концентрацией  $C_{P1}$  имеет вид  $F = [0 \ 0 \ 1]$ , при управлении концентрацией  $C_B$ :  $F = [0 \ 1 \ 0]$ .

Были определены собственные числа матрицы  $A$  (корни характеристического полинома)  $\det(I \cdot s - A) = 0$ :

$$s_1 = -0,013, \quad s_2 = -0,0474, \quad s_3 = -0,013.$$

Все собственные числа вещественные и отрицательные, следовательно, объект обладает свойством устойчивости положения равновесия. Для исследования свойства управляемости объекта в пространстве состояний построена и вычислена матрица управляемости:

$$M_u = [B: AB: A^2B] =$$

$$= \begin{bmatrix} -1,4 \cdot 10^{-2} & -2,798 \cdot 10^{-5} & 1,068 \cdot 10^{-5} \\ 8,425 \cdot 10^{-3} & -3,25 \cdot 10^{-4} & 1,454 \cdot 10^{-5} \\ -3,68 \cdot 10^{-3} & 2,649 \cdot 10^{-4} & 1,388 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}.$$

Ранг матрицы  $M_u$  равен 3, и можно сделать вывод, что объект управляем в пространстве состояний [11, 12]. Но вычисление определителя матрицы дает результат  $\det M_u = -1,9 \cdot 10^{-13}$ , что приведет, очевидно, к синтезу практически неработоспособной системы [5]. Окончательное суждение о полной управляемости объекта можно сформировать по результатам исследования вырожденности передаточной функции [13].

Передаточные функции от входа к соответствующему выходу имеют следующий вид:

$$W_1(s) = \frac{\Delta C_{P1}(s)}{u(s)} = \frac{-0,0037(s-0,01)(s+0,0127)}{(s+0,013)(s+0,0474)(s+0,0129)};$$

$$W_2(s) = \frac{\Delta C_B(s)}{u(s)} = \frac{0,00842(s+0,0223)(s+0,013)}{(s+0,013)(s+0,0474)(s+0,0129)}.$$

Обе передаточные функции являются вырожденными, т.е. имеют одинаковые нули и полюса, и, следовательно, объект не является полностью управляемым по обоим каналам.

Анализ стехиометрических уравнений реакции и структуры уравнений математической модели объекта (1) и/или (2) показывает, что изменение координаты  $C_{P1}(\Delta C_{P1})$  не влияет на переменные  $C_A(\Delta C_A)$  и  $C_B(\Delta C_B)$ . Учитывая данное обстоятельство, переформулируем задачу синтеза следующим образом: необходимо синтезировать одноканальную систему управления концентрацией вещества  $B$  ( $C_B$ ) в реакторе на базе регулятора состояния.

Объект задан матрицами:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0160 & -0,031 \\ -0,0034 & -0,044 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,0140 \\ 0,00843 \end{bmatrix}; \quad F = [0 \ 1].$$

Передаточная функция объекта  $W(s) = \frac{\Delta C_B(s)}{u(s)} = \frac{0,00842(s+0,0223)}{(s+0,0474)(s+0,013)}$  не содержит диполей и, следовательно, объект является управляемым.

Известно, что для объекта, заданного математической моделью вида (3), теория оптимального управления при использовании квадратичного критерия качества дает закон управления в виде безынерционного регулятора состояния, расположенного в цепи обратной связи системы управления [12]:

$$u = -k\Delta\bar{C}, \quad (4)$$

где  $k = (k_1 \ k_2)$  – вектор-строка настроечных параметров. Численные значения настроек определяются путем решения уравнений Риккати, что является трудоемкой задачей.

Альтернативным подходом к определению настроек регулятора является использование метода модального управления [5, 11]. По структуре алгоритм (4) является пропорциональным регулятором, который, как известно, не обеспечивает надлежащего отслеживания уставок или возмущающих воздействий по нагрузке в системе. Поэтому желательно введение в

алгоритм управления интегральной составляющей, снижающей ошибку регулирования в статике. При этом число переменных состояния, для которых вводится интегральная составляющая, не должно превышать числа управляющих воздействий. В нашем случае целесообразно ввести интегральную составляющую по концентрации продукта  $\Delta C_B$ . Управление в этом случае определяется соотношением

$$u = -(k_1 \Delta C_A + k_2 \Delta C_B) - k_3 \int_0^{\infty} \Delta C_B d\tau. \quad (5)$$

Структура одноканальной САУ с учетом изложенного представлена на рис. 2.

Параметрический синтез РС предполагает формулировку требований к характеру переходного процесса управления, динамическим и статическим показателям качества. Учитывая распределение корней характеристического уравнения объекта (они вещественные) и требование отсутствия перерегулирования, в качестве эталонного предпочтительнее использовать полином Ньютона второго порядка. Точность регулирования в статике с учетом погрешности измерения концентраций принимается  $\Delta_{зад} = \pm 0,04$  моль/л. Время регулирования, определяемое инерционностью объекта,  $\tau_p \approx 70$  мин.

Параметрический синтез безынерционного регулятора (4) методом модального управления осуществлялся с использованием процедуры перехода от исходного описания объекта (3) к представлению в канонической управляемой форме (КУФ):

$$\frac{d\hat{\Delta C}}{d\tau} = \hat{A}\hat{\Delta C} + \hat{b}u; \quad (6)$$

$$u = -\hat{k}\hat{\Delta C},$$

где  $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_0 & a_1 \end{bmatrix}$  – сопровождающая матрица характеристического полинома  $\varphi(s) = s^2 + a_1s + a_0$  исходной матрицы  $A$ :  $a_0 = 6,26 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_1 = 6,088 \cdot 10^{-2}$ ;  $\hat{b} = (0 \ 1)^T$  – вектор коэффициентов управления.

Эталонный характеристический полином с желаемым спектром собственных чисел имеет вид

$$D(s) = s^2 + d_1s + d_0 = s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2.$$

Параметр  $\omega_0$  определяется с использованием нормированных стандартных переходных функций (при  $\omega_0 = 1$ ), для которых определено безразмерное время переходного процесса ( $\tau_0$ ). При заданном (требуемом) времени переходного процесса управления  $\tau_p$  параметр  $\omega_0$  для выбранного типа и порядка эталонного характеристического уравнения вычисляется по соотношению

$\omega_0 = \tau_0/\tau_p$ . Для характеристического уравнения второго порядка  $\tau_0 = 4,8$ , следовательно,  $\omega_0 = 0,069$ .

Элементы вектора  $\hat{k}$  в (6) определяются соотношениями:

$$\hat{k}_{i+1} = d_i - a_i, \quad i = 0, 1;$$

$$\hat{k}_1 = 4,08 \cdot 10^{-3}; \quad \hat{k}_2 = 7,6 \cdot 10^{-2}.$$

Переход к коэффициентам обратной связи исходной системы (3) осуществляется по уравнению

$$k = \hat{k}P_u, \quad (7)$$

где  $P_u = \hat{M}u \cdot Mu^{-1}$  – матрица преобразования исходной системы (3) к КУФ (6);  $Mu$ ,  $\hat{M}u$  – матрицы управляемости объекта, заданного исходной моделью (3) и моделью в КУФ (6).

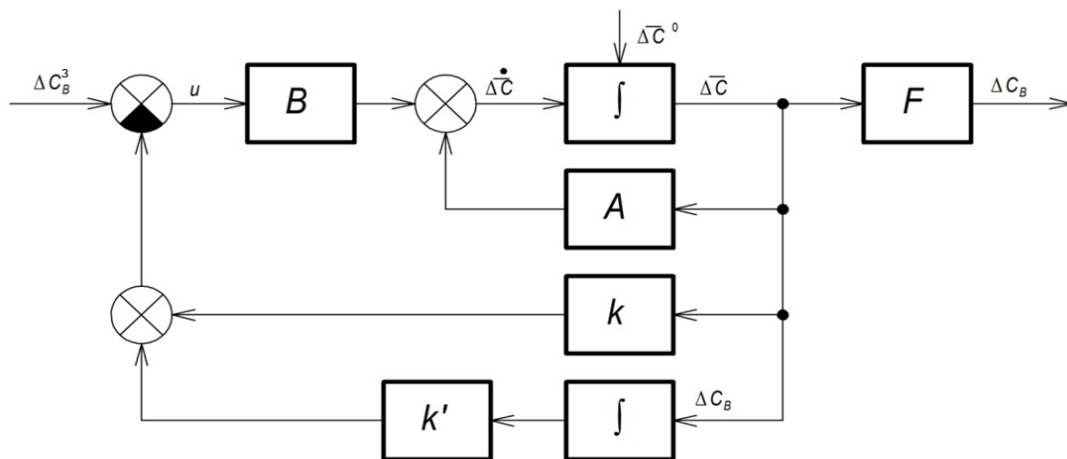


Рис. 2. Структура системы автоматического управления состоянием химического реактора с учетом интегральной составляющей по концентрации  $\Delta C_B$

Параметры регулятора состояния исходного объекта, согласно (7), примут значения:

$$k_1 = -4,07; k_2 = 2,084.$$

Таким образом, управляющее воздействие запишется как

$$u = 4,07\Delta C_A - 2,084\Delta C_B. \quad (8)$$

Настройки РС с интегральной составляющей определялись двумя способами. Первый способ – по методике, приведенной в [14]. Второй способ заключается в следующем. Исходная математическая модель объекта (3) дополнялась уравнением для переменной  $z$ :

$$\frac{dz}{d\tau} = \Delta C_B. \quad (9)$$

Далее проводились все этапы расчета настроек для расширенной системы уравнений математической модели. При этом принимали  $\omega_0 = 0,069$ , как и ранее. Параметры настройки регулятора, определенные обоими способами, совпадают. Их значения следующие:

$$k_1 = 7,397; k_2 = 30,002; k_3 = 1,747.$$

Правильность определения значений коэффициентов регулятора проверена путем сравнения коэффициентов характеристического уравнения матрицы замкнутой системы с коэффициентами эталонного характеристического полинома.

**Результаты исследования.** Регуляторы состояния синтезированы с использованием линеаризованной модели объекта, а функционировать система управления будет на реальном нелинейном объекте. Поэтому моделирование САУ проводили с использованием исходной нелинейной модели (1). Исследовались свойства САУ подавлять внешние возмущения, отслеживать изменение задания ( $\Delta C_B^3$ ) и способность подавлять параметрические возмущения по константе скорости ( $\Delta K_1$ ).

На рис. 3 приведены примеры процессов управления при изменении задания  $\Delta C_B^3 = 0,1$ .

Анализ результатов (рис. 3) показывает, что САУ на базе безынерционного РС не является ковариантной с заданием, так как изменение выходной регулируемой переменной  $\Delta C_B$  характеризуется наличием недопустимой статической ошибки, в то время как РС с интегральной составляющей

отслеживает изменение задания на 20 % от установившегося значения без статической ошибки.

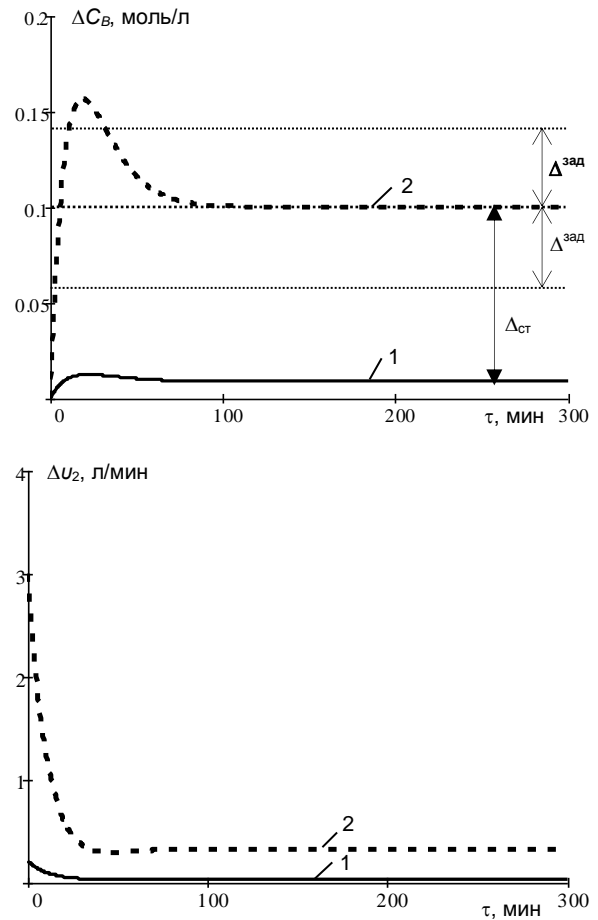


Рис. 3. Переходные процессы управления при изменении задания  $\Delta C_B^3 = 0,1$  моль/л: 1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Аналогичная картина наблюдается при исследовании САУ на инвариантность к возмущениям. Установлено, что РС с интегральной составляющей успешно компенсирует возмущение  $\Delta C_{Bвх}$  без статической ошибки. Безынерционный РС характеризуется наличием существенной ошибки регулирования в статике.

Особое внимание уделено исследованию робастности. На рис. 4 приведены переходные процессы управления при 20 %-м ступенчатом возмущении по параметру  $K_1$ :  $\Delta K_1 = 0,2K_1$ .

Характер кривых на рис. 4 показывает, что оба варианта САУ обладают свойством устойчивости, но, по величине статической ошибки регулирования, безынерционный РС следует отвергнуть.

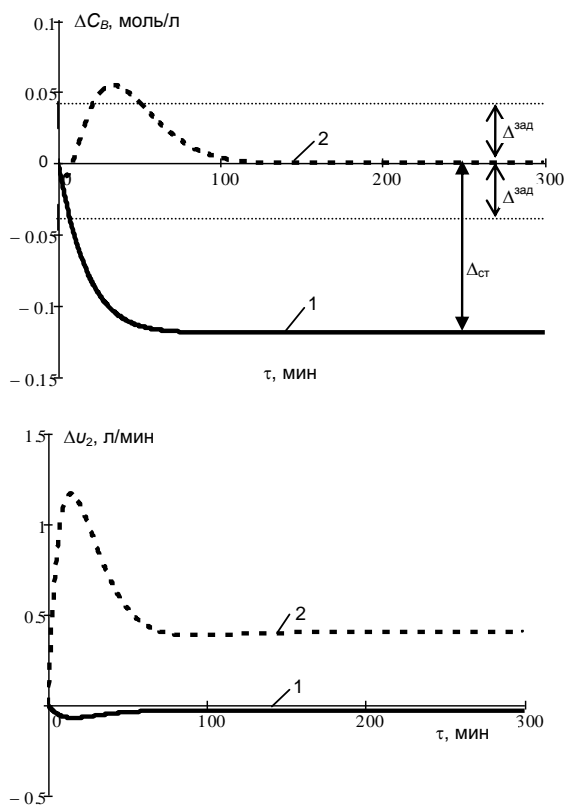


Рис. 4. Процессы управления при параметрическом возмущении  $\Delta K_1 = 0,2K_1$ : 1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Таким образом, сравнительный анализ качества процессов управления показывает, что работоспособной следует признать САУ на базе РС с интегральной составляющей.

**Выводы.** Путем компьютерного моделирования комплекса «нелинейный объект – линейная подсистема управления» показана работоспособность САУ на базе РС с интегральной составляющей, что позволяет рекомендовать изложенный подход синтеза для решения задачи структурно-параметрического синтеза САУ аналогичными объектами.

#### Список литературы

1. **Модели** управления энергоэффективностью сложных химико-теплотехнологических систем / В.П. Мешалкин, В.И. Бобков, В.В. Борисов, М.И. Дли. – Смоленск: Универсум, 2017. – 204 с.
2. **Синергетика** и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
3. **Chitturi A., Ravi P.S.** PID control of integrating systems using Multiple Dominant Pole placement method // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 734–742.

ical Engineering. – 2015. – Vol. 10, No. 5. – P. 734–742.

4. **Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors** / D. Krishna, K. Suryanarayana, G. Aparna, R.P. Sree // *Indian Chemical Engineer*. – 2012. – Vol. 54, No. 3. – P. 157–179.

5. **Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – 256 с.

6. **Анализ** параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А.А. Анисимов, Д.Г. Котов, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2011. – № 5. – С. 18–32.

7. **Александров А.Г.** Синтез регуляторов многомерных систем. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.

8. **Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В.** Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // *Известия ТРТУ*. – 2005. – № 1(45). – С. 53–62.

9. **Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.** Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технических объектов. – Иваново, 2005. – 172 с.

10. **Вершинин И.В., Тютиков В.В.** Синтез параметрически грубых систем модального управления // *Энергия-2015. X Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. конкурсных докл.* – 2015. – С. 134–137.

11. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: учебник в 3 т. Т. 2. / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

12. **Ли Э.Б., Маркус Л.** Основы теории оптимального управления. – М.: Наука, 1972. – 576 с.

13. **Воронов А.А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985. – 352 с.

14. **Кузовков Н.Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

#### References

1. Meshalkin, V.P., Bobkov, V.I., Borisov, V.V., Dli, M.I. *Modeli upravleniya energoeffektivnost'yu slozhnykh khimiko-teplotekhnologicheskikh sistem* [Energy efficiency control models for complex chemical thermal systems]. Smolensk: Universum, 2017. 204 p.
2. Kolesnikova, A.A. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and control theory issues]. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 504 p.
3. Chitturi, A., Ravi, P.S. PID control of integrating systems using Multiple Dominant Pole placement method. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 734–742.

4. Krishna, D., Suryanarayana, K., Aparna, G., Sree, R.P. Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors. *Indian Chemical Engineer*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 157–179.

5. Tyutikov, V.V., Tararykin, S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami* [Robast modal control of technological objects]. Ivanovo, 2006. 256 p.

6. Anisimov, A.A., Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. Analiz parametriceskoy chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizatsiya sistem modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Parametric sensitivity analysis and structural optimization of modal control systems with state controllers]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 5, pp. 18–32.

7. Aleksandrov, A.G. *Sintez regulyatorov mnogomernykh sistem* [Synthesis of multidimensional systems regulators]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 272 p.

8. Tyutikov, V.V., Kotov, D.G., Tararykin, S.V. Usloviya parametriceskoy grubosti SAU s regulyatorami sostoyaniya [Parametric robustness conditions of ACS with state controllers]. *Izvestiya TRTU*, 2005, no. 1(45), pp. 53–62.

9. Kotov, D.G., Tararykin, S.V., Tyutikov, V.V. *Sintez lineynykh regulyatorov dlya upravleniya sostoyaniem tekhnicheskikh ob'ektov* [Synthesis of

linear regulators for state control of technical objects]. Ivanovo, 2005. 172 p.

10. Vershinin, I.V., Tyutikov, V.V. Sintez parametriceski grubykh sistem modal'nogo upravleniya [Synthesis of parametrically robust modal control systems]. *Sbornik konkursnykh dokladov «Energija-2015. X mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh»* [Energy-2015. 10<sup>th</sup> International scientific and technical conference of students and young researchers: collection of competitive reports]. 2015, pp. 134–137.

11. Egupov, N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. V 3 t., t. 2* [Methods of classical and modern automatic control theory. In 3 vol., vol. 2]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 736 p.

12. Li, E.B., Markus, L. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya* [Foundations of optimal control theory]. Moscow: Nauka, 1972. 576 p.

13. Voronov, A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh sistem* [Introduction to the dynamics of complex managed systems]. Moscow: Nauka, 1985. 352 p.

14. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and observers]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 184 p.

*Лабутин Александр Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматике, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: lan@isuct.ru

*Labutin Alexander Nikolaevich,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Technical Cybernetics and Automation, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: lan@isuct.ru

*Загаринская Юлия Николаевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», старший преподаватель кафедры технической кибернетики и автоматике, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

*Zagarinskaya Yulia Nikolaevna,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Senior Lecturer, Department of Technical Cybernetics and Automation, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

*Невиницын Владимир Юрьевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики и автоматике, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: nevinitsyn@gmail.com

*Nevinitsyn Vladimir Yuryevich,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Department of Technical Cybernetics and Automation, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: nevinitsyn@gmail.com

*Волкова Галина Витальевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики и автоматике, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: konf\_gv@mail.ru

*Volkova Galina Vitalievna,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Department of Technical Cybernetics and Automation, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: konf\_gv@mail.ru

*Зайцев Виктор Александрович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматике, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: z-viktor-a@mail.ru

*Zaitsev Victor Alexandrovich,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Technical Cybernetics and Automation, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: z-viktor-a@mail.ru