
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК: 66.011:681.51

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-4-11

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

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ

В работе решена задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в жидкофазном химическом реакторе с использованием регулятора состояния. Параметры настройки регулятора состояния определены с использованием метода модального управления. Для устранения статической ошибки регулирования и обеспечения свойства робастности системы управления в структуру регулятора состояния введена интегральная составляющая.

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

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

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF THE CONCENTRATION CONTROL SYSTEM IN THE CHEMICAL REACTOR ON THE BASIS OF THE STATE CONTROLLER

The paper deals with the synthesis of a single-channel control system of concentration vector in a liquid-phase chemical reactor using a state controller. Settings of the state controller are determined using the modal control method. An integral component was introduced into the structure of the state controller to eliminate the static control error and ensure the robustness of the control system.

Keywords: chemical reactor, state controller, modal control, integral part, nonlinear control object, computer simulation.

Введение

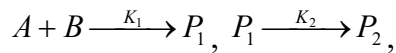
Цель функционирования химического реактора – это реализация процесса превращения исходных реагентов в продукты реакции и обеспечение заданного состава реакционной смеси. Показателем ресурсоэффективности является степень превращения какого-либо исходного реагента или выход целевого продукта. Отсюда главной задачей системы автоматизации и управления объектом является задача стабилизации концентрации целевого компонента на оптимальном уровне в условиях действия возмущений. Трудность и проблема решения задачи структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления (САУ) обусловлена многомерностью, многосвязностью и нелинейностью математической модели реактора [1]. Несмотря на указанные свойства объекта до настоящего времени для управления процессом используются линейные САУ на базе ПИД-алгоритмов [2, 3]. 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 [4]. В настоящее время 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 [4-6]. При выбранной структуре системы управления с РС особое значение для обеспечения робастности системы приобретает метод параметрического синтеза системы. Наиболее часто используется для решения этой задачи метод модального управления [7, 8].

В предлагаемой работе решается задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в химическом реакторе с использованием регулятора состояния методом модального управления.

Характеристика объекта управления и постановка задачи

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.

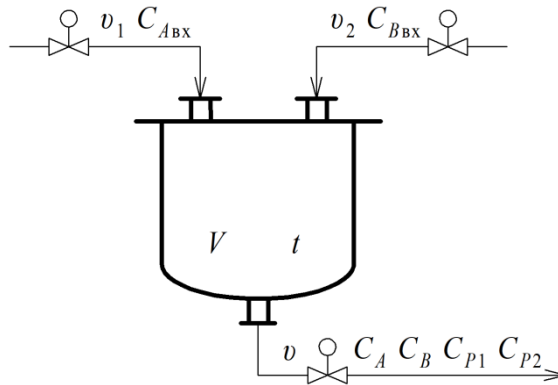


Рис. 1. Принципиальная схема реактора

На рис. 1 обозначено: v_1, v_2 – расходы потоков исходных компонентов; $C_{Aвх}, C_{Bвх}$ – концентрации исходных компонентов; v – расход смеси на выходе из реактора; t – температура смеси в реакторе; C_A, C_B, C_{P1}, C_{P2} – концентрации продуктов реакции; V – объем смеси в реакторе.

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

$$\begin{aligned} V \frac{dC_A}{d\tau} &= v_1 C_{Aвх} - (v_1 + v_2) C_A + V(-K_1 C_A C_B); \\ V \frac{dC_B}{d\tau} &= v_2 C_{Bвх} + V(-K_1 C_A C_B) - (v_1 + v_2) C_B; \\ V \frac{dC_{P1}}{d\tau} &= V(K_1 C_A C_B - K_2 C_{P1}) - (v_1 + v_2) C_{P1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Исходя из требований к содержанию побочного продукта в реакционной смеси (C_{P2}) при заданной нагрузке на аппарат по исходным реагентам $\{(v_1; C_{A_{ВХ}}), (v_2; C_{B_{ВХ}})\}$ были определены режимно-технологические и конструктивные параметры процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта. Значения параметров представлены ниже: $V = 500$ л; $t = 68.45$ °С; $v_1 = 3$ л/мин; $v_2 = 3.5$ л/мин; $C_{A_{ВХ}} = 19.74$ моль/л; $C_{B_{ВХ}} = 5$ моль/л; $K_1 = 120000$ л/(моль мин); $K_2 = 12000$ л/(моль мин); $C_A = 7.21$ моль/л; $C_B = 0.787$ моль/л; $C_{P1} = 1.843$ моль/л.

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого продукта на заданном значении $C_{P1} = \bar{C}_{P1}$ в условиях действия возмущений. В качестве управляющего воздействия выступает расход потока реагента $A - v_1$.

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

В общем виде линеаризованная в окрестности положения равновесия математическая модель запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{d\tau} &= A\bar{x} + Bu; \\ y &= F\bar{x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{x} = \Delta\bar{C} = (\Delta C_A \quad \Delta C_B \quad \Delta C_{P1})^T$ – вектор состояния; $u = \Delta v_1$ – управление; A, B – матрица состояний и управления; y – вектор выходных переменных; F – матрица измерений. Матрицы A, B и F имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -0.016 & -0.031 & 0 \\ -0.0034 & -0.044 & 0 \\ 0.0034 & 0.031 & -0.013 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0.025 \\ -0.00157 \\ -0.0037 \end{bmatrix}; \quad F = [0 \quad 0 \quad 1].$$

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

$$s_1 = -0.013, \quad s_2 = -0.047, \quad s_3 = -0.0126.$$

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:

$$M_u = [B: AB: A^2B] = \begin{bmatrix} 2.5 \cdot 10^{-2} & -3.513 \cdot 10^{-4} & 6.115 \cdot 10^{-6} \\ -1.6 \cdot 10^{-3} & -1.592 \cdot 10^{-5} & 1.895 \cdot 10^{-6} \\ -3.7 \cdot 10^{-3} & 8.443 \cdot 10^{-5} & -2.786 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}.$$

Поскольку ранг матрицы управляемости равен 3, то объект полностью управляем в пространстве состояний [9]. Наличие свойств устойчивости свободного движения и полной управляемости объекта позволяет использовать метод модального управления для решения задачи параметрического синтеза РС. Регулятор состояния синтезируется с использованием линеаризованной модели объекта (2), а функционировать будет на реальном нелинейном объекте. Поэтому представляет интерес сравнение динамических характеристик нелинейного и линеаризованного объекта по каналу управления. На рис. 2 представлены кривые разгона по каналам $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_{P1}$, $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_A$ при 20%-м ступенчатом изменении управления.

Анализ графиков показывает, что кривые разгона качественно совпадают, расхождение выходных переменных в установившемся состоянии не превышает $\pm 2\%$. Можно ожидать, что РС будет работоспособен на нелинейном объекте.

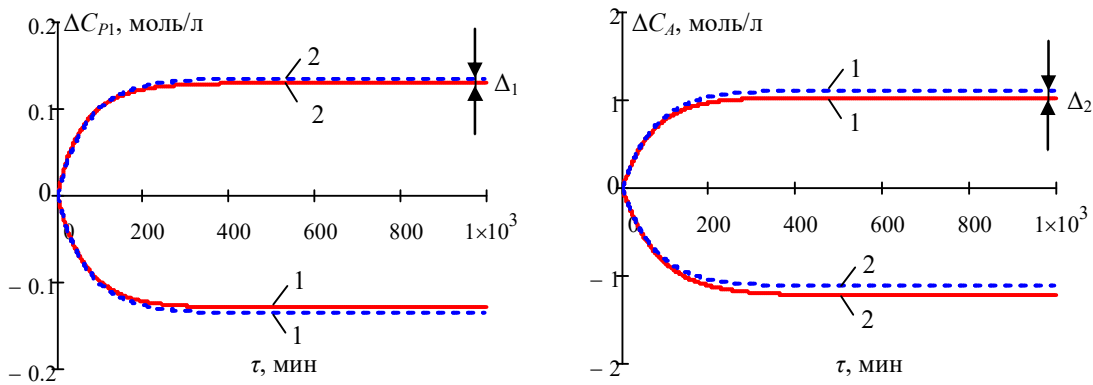


Рис. 2. Кривые разгона объекта по каналам $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_{P1}$, $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_A$ при использовании нелинейной модели (сплошная линия) и линеаризованной модели (пунктир): 1 - $\Delta v_1 = +0.2v_1^0$; 2 - $\Delta v_1 = -0.2v_1^0$

Структурно-параметрический синтез САУ концентрацией

Известно, что для объекта, заданного математической моделью вида (2), теория оптимального управления при использовании квадратичного критерия качества дает закон управления в виде безынерционного регулятора состояния, расположенного в обратной связи системы управления [9]:

$$u = -k\bar{x} = -k\Delta\bar{C}, \quad (3)$$

где $k = (k_1 \ k_2 \ k_3)$ – 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 [8]. По структуре алгоритм (3) 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 число управляющих воздействий. В нашем случае целесообразно ввести интегральную составляющую по концентрации целевого продукта ΔC_{P1} . Управление в этом случае определяется соотношением:

$$u = -(k_1 \Delta C_A + k_2 \Delta C_B + k_3 \Delta C_{P1}) - k' \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau. \quad (4)$$

Структура одноканальной САУ с учетом изложенного представлена на рис. 3.

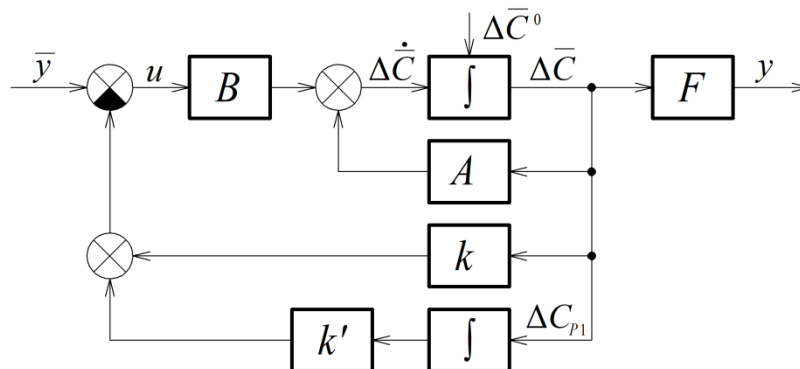


Рис. 3. Структура САУ состоянием химического реактора с учетом интегральной составляющей по концентрации ΔC_{P1}

Параметрический синтез безынерционного регулятора (3) методом модального управления осуществлялся с использованием процедуры перехода от исходного описания объекта (2) к представлению в канонической управляемой форме (КУФ):

$$\frac{d\Delta\hat{C}}{d\tau} = \hat{A}\Delta\hat{C} + \hat{b}u; \quad (5)$$

$$u = -\hat{k}\Delta\hat{C}, \quad (6)$$

где $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}$ – сопровождающая матрица характеристического полинома

исходной матрицы A : $\varphi_A(s) = s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0$, $a_0 = 7.78 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 1.38 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 7.3 \cdot 10^{-2}$; $\hat{b} = (0 \ 0 \ 1)^T$ – вектор управления.

Желаемый характеристический полином с желаемым спектром собственных чисел имеет вид: $D(s) = s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3$. Параметр ω_0 , определяющий время переходного процесса управления (τ_p), определим из соотношения [8]: $\omega_0 = \tau_0 / \tau_p$. При $\tau_p = 325$ мин получим $\omega_0 = 6/325 = 0.0185$.

Элементы вектора k в (6) определяются соотношениями:

$$k_{i+1} = d_i - a_i, \quad i = 0, 1, 2; \quad k_1 = -2.03 \cdot 10^{-6}; \quad k_2 = -4.14 \cdot 10^{-4}; \quad k_3 = 1.9 \cdot 10^{-2}.$$

Переход к коэффициентам обратной связи исходной системы (2) осуществляется по уравнению:

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

где $P_u = \hat{M}_u M_u^{-1}$ – матрица преобразования исходной системы (2) к КУФ (5); M_u, \hat{M}_u – матрица управляемости объекта, заданного исходной моделью (2) и моделью в КУФ (5).

Параметры регулятора состояния исходного объекта согласно (7) примут значения: $k_1 = -1.25$; $k_2 = -15.58$; $k_3 = 3.29$. Таким образом, управляющее воздействие запишется:

$$u = 1.25\Delta C_A + 15.58\Delta C_B - 3.29\Delta C_{P1}. \quad (8)$$

Настройки РС с интегральной составляющей определялись по методике, приведенной в [10]. Выражение (4) в явном виде запишется:

$$u = 2.26\Delta C_A + 16.08\Delta C_B + 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau. \quad (9)$$

Исследование работоспособности СУ путем компьютерного моделирования

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 (ΔC_{PI}) и способность подавлять параметрические возмущения по константе скорости (ΔK_I).

В качестве показателей качества процессов управления использовали время регулирования и величину статической ошибки.

На рис. 4 приведены примеры процессов управления при действии внешнего возмущения по входной концентрации исходного реагента B : $\Delta C_{Bвх} = -0.1C_{Bвх}$.

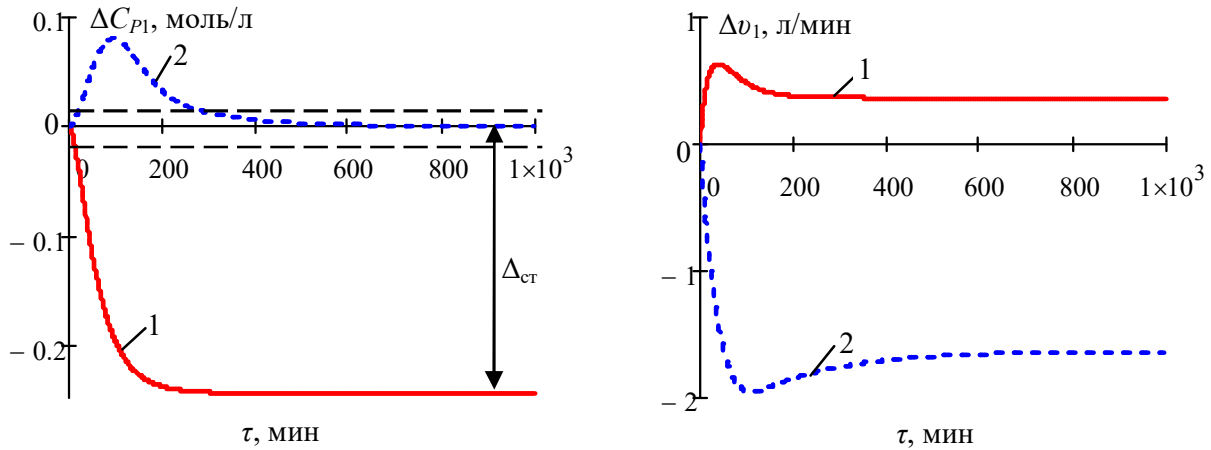


Рис. 4. Переходные процессы управления при внешнем возмущении $\Delta C_{Ввх} = -0.1 C_{Ввх} = -0.5$ моль/л:
1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Анализ результатов показывает, что САУ на базе безынерционного РС не является инвариантной к возмущению, так как изменение выходной регулируемой переменной ΔC_{P1} характеризуется наличием недопустимой статической ошибки, в то время как РС с интегральной составляющей успешно компенсирует возмущение $\Delta C_{Ввх}$ без статической ошибки.

Аналогичная картина наблюдается при исследовании САУ на ковариантность с заданием по ΔC_{P1} . Установлено, что РС с интегральной составляющей отслеживает изменение задания по $\Delta C_{P1} = 15\%$ от установившегося значения без статической ошибки. Безынерционный РС характеризуется наличием существенной ошибки регулирования в статике.

Особое внимание уделено исследованию робастности. На рис. 5 приведены переходные процессы управления при 30%-м ступенчатом возмущении по параметру K_1 : $\Delta K_1 = 0.3 K_1$.

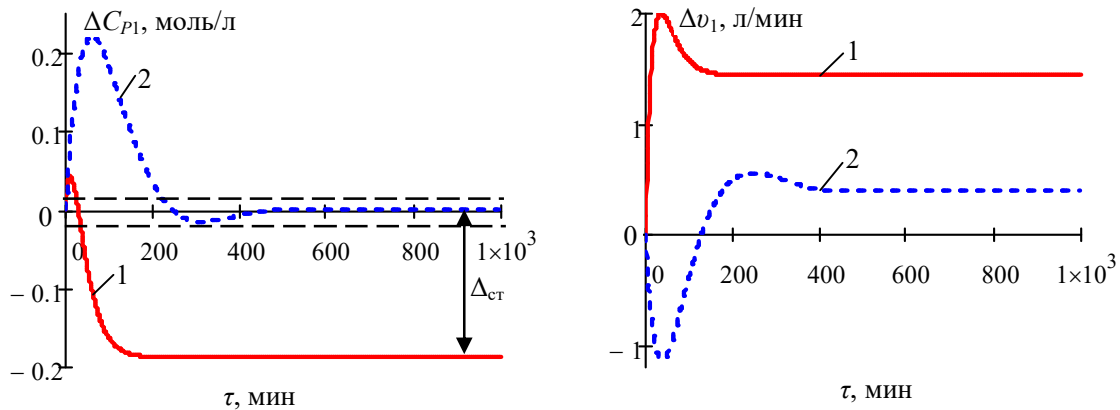


Рис. 5. Процессы управления при параметрическом возмущении $\Delta K_1 = 0.3 K_1$:
1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Характер кривых на рис. 5 показывает, что оба варианта САУ обладают свойством устойчивости, но по величине статической ошибки регулирования безынерционный РС следует отвергнуть.

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

В работе была исследована работоспособность САУ при отсутствии текущих измерений концентраций компонентов A и B ($\Delta C_A = 0$; $\Delta C_B = 0$). Алгоритм управления в этом случае представляет собой одномерный ПИ-закон:

$$u = 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau.$$

Исследования показали, что САУ и в этом случае является работоспособной: компенсирует 10%-ое возмущение по $\Delta C_{Bвх}$, отслеживает изменение задания по ΔC_{P1} на 15 % и компенсирует 30%-ое параметрическое возмущение по параметру K_1 .

Заключение

В работе предложена САУ концентрацией веществ в химическом реакторе на базе регулятора состояний, синтезированного методом модального управления. Методом компьютерного моделирования комплекса «нелинейный объект – линейная подсистема управления» показана работоспособность САУ на базе РС с интегральной составляющей, как для случая полного измерения вектора состояния, так и случая измерения только выходной переменной.

Список литературы:

References:

- 1 Синергетика и проблемы теории управления. Под ред. Колесникова А.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 504 с.
2. Chitturi A., Ravi P.S. PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2015. V. 10. N. 5. P. 734-742.
3. Krishna D., Suryanarayana K., Aparna G., Sree R.P. Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors // *Indian Chemical Engineer*. 2012. V. 54. N. 3. P. 157-179.
4. Анисимов А.А., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Анализ параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2011. № 5. С. 18-32.
5. Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В. Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // *Известия ТРТУ*. 2005. № 1(45). С. 53-62.
6. Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технических объектов. Иваново: ГОУВПО «ИГЭУ», 2005. 172 с.
7. Вершинин И.В., Тютиков В.В. Синтез параметрически грубых систем модального управления // *Энергия-2015. Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник конкурсных докладов*. 2015. С. 134-137.
1. *Sinergetika i problem teorii upravleniya* [Synergetics and control theory issues]. Ed. by Kolesnikov A.A. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 504 p. [in Russian]
2. Chitturi A., Ravi P.S. PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2015. V. 10. N. 5. P. 734-742.
3. Krishna D., Suryanarayana K., Aparna G., Sree R.P. Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors // *Indian Chemical Engineer*. 2012. V. 54. N. 3. P. 157-179.
4. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analiz parametricheskoj chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizaciya system modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Parametric sensitivity analysis and structural optimization of modal control systems with state controllers]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2011. no. 5. pp. 18-32. [in Russian]
5. Tyutikov V.V., Kotov D.G., Tararykin S.V. Usloviya parametricheskoj grubosti SAU s regulyatorami sostoyaniya [Parametric robustness conditions of ACS with state controllers]. *Izvestiya TRTU*. 2005. no. 1(45). pp. 53-62. [in Russian]
6. Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. *Sintez linejnyh regulyatorov dlya upravleniya sostoyaniem tekhnicheskikh ob'ektov* [Synthesis of linear regulators for state control of technical objects]. Ivanovo: GOUVPO «IGEU», 2005. 172 p. [in Russian]
7. Vershinin I.V., Tyutikov V.V. Sintez parametricheski grubyh system modal'nogo upravleniya [Synthesis of parametrically robust modal control systems]. *Energiya-2015. Desyataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Sbornik konkursnyh dokladov*. 2015.

8. 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.

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

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

pp. 134-137. [in Russian]

8. *Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory]. vol. 2. *Sintezregulyatoroviteoriyaoptimizacii sistemavtomaticheskogoupravleniya* [Regulator synthesis and automatic control system optimization theory]. Ed. by Egupov N.D. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 736 p. [in Russian]

9. Lee E.B., Markus L. Foundations of optimal control theory. New York: Wiley, 1967. 576 p.

10. Kuzovkov N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustrojstva* [Modal control and observers]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 184 p. [in Russian]

Статья поступила в редколлегию 18.06.19.

Рецензент: д.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет

Аверченков А.В.

Статья принята к публикации 30.10.19.

Сведения об авторах

Лабути́н Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского государственного химико-технологического университета
Тел.: 8-910-985-43-05.
E-mail: lan@isuct.ru

Загаринская Юлия Николаевна

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского государственного химико-технологического университета.
Тел.: 8-4932-32-72-26
E-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

Невини́цын Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского государственного химико-технологического университета.
Тел.: 8-915-837-94-53.
E-mail: nevinitsyn@gmail.com

Волкова Галина Витальевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского государственного химико-технологического университета
Тел.: 8-4932-32-72-26.
E-mail: konf_gv@mail.ru

Information about authors:

Labutin Alexander Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of Chair, department of «Technical Engineering Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology
Phone: 8-4932-32-72-26.
E-mail: lan@isuct.ru

Zagarinskaya Yulia Nikolaevna

graduate student, department of «Technical Engineering Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology
Phone: 8-4932-32-72-26.
E-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

Nevinitsyn Vladimir Yurievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor, department of «Technical Engineering Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology.
Phone: 8-4932-32-72-26.
E-mail: nevinitsyn@gmail.com

Volkova Galina Vitalievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor, department of «Technical Engineering Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology.
Phone: 8-4932-32-72-26.
E-mail: konf_gv@mail.ru