

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В РЕАКТОРЕ ТВЕРДОФАЗНОГО ДОПОЛИАМИДИРОВАНИЯ

Лабутин А.Н., Алексеев Е.А.

Лабутин Александр Николаевич, Алексеев Евгений Алексеевич
Ивановский государственный химико-технологический университет
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.
e-mail: lan@isuct.ru, alekseev_ea@isuct.ru

В статье рассматривается система автоматического регулирования температуры гранул на выходе из реактора дополимеризатора в процессе производства синтетического полимера полиамида-6. На основе математической модели пилотного реактора была получена формализованная модель аппарата в форме передаточных функций по основным каналам управления и возмущения в математическом пакете Matlab. Предложена структура системы регулирования, выбран алгоритм регулирования на базе регулятора состояния с интегральной составляющей и определены численные значения его параметров. Представлены результаты компьютерных моделирований исследования замкнутой системы управления на ковариантность с задающим воздействием и инвариантность к действию внешнего возмущения, подтвердившие работоспособность предложенного алгоритма. Внедрение рассмотренного алгоритма регулирования в производственный процесс синтеза полимера позволит повысить качество готовой продукции.

Ключевые слова: математическое моделирование, алгоритм управления, регулятор состояния, полиамид-6.

DESIGN OF CONTROL ALGORITHM OF TEMPERATURE IN PREPOLYAMIDATION TANK

Labutin A.N., Alekseev E.A.

Labutin Alexander Nikolaevich, Alekseev Eugene Alekseevich
Ivanovo state university of chemistry and technology
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
e-mail: lan@isuct.ru, alekseev_ea@isuct.ru

Automatic control system of polymer pellets temperature at outlet of prepolyamidation tank in polyamide-6 synthesis process are considered in this paper. Tank formalized model in form of transfer functions of main control and disturbance channels were derived from mathematical model of tank by using Matlab. Structure of control system was suggested, control algorithm based on state space controller with integral part was designed, parameters of controller were calculated. Results of computer simulations of closed-loop control system examinations, confirmed efficiency of proposed control algorithm, were shown. Quality of final product, made from polyamide-6 pellets, will be increased by introduction proposed control algorithm in technological process of polymer synthesis.

Keywords: math modeling, control algorithm, state space controller, polyamide-6.

Проблема создания ресурсо- и энергоэффективных технологических процессов получения полиамида-6 предполагает решение двух основных задач.

Первая задача – это разработка оптимального аппаратно-технологического оформления процесса. Вторая задача – это разработка эффективных систем управления процессом в условиях действия возмущений [1].

Авторами [2, 3] предложено решение первой задачи путем введения в технологическую схему производственного процесса получения полиамида-6 стадии твердофазного дополиамидирования. Это сложный гетерофазный процесс, протекающий в аппарате типа «труба в трубе». Твёрдая фаза перемещается по длине аппарата посредством вращающегося шнека-ворошителя, который содержит ряд лопастей,

равномерно распределённых по длине вала. Таким образом, аппарат получается «разделённым» на ячейки одинакового размера. В рубашку (внешняя труба) подаётся жидкофазный теплоноситель. В работах [2, 3] были проведены исследования кинетики реакции дополиамидирования в твёрдой фазе, экспериментальные и теоретические исследования пилотного реактора для реализации процесса – определены оптимальные значения технологических и режимных параметров. Технологическими параметрами, характеризующими состояние процесса и определяющими его эффективность, являются концентрация мономера в гранулах и температура твёрдых частиц.

Решение второй задачи требует разработки алгоритмов управления температурой гранул и концентрацией мономера в гранулах полимера. До настоящего времени наиболее распространёнными в практике управления технологическими процессами являются одноконтурные, комбинированные и каскадные системы на базе типовых ПИ и ПИД-алгоритмов [4-6]. Параметрический синтез указанных алгоритмов осуществляется при использовании одномерных моделей объектов в пространстве «вход-выход». Данный подход оправдывает себя при не очень высоких требованиях к статическим и динамическим свойствам системы. С учётом сложности моделей объектов, их многомерности и многосвязности наиболее перспективными считаются системы управления на базе регуляторов состояния (РС), либо комбинированных РС, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния [6-9].

Основная цель и задача системы управления дополимеризатором заключается в поддержании температуры гранул на выходе на заданном уровне.

Принимая во внимание, конструктивные особенности пилотного реактора разработана математическая модель процесса, которая отражает процессы в твёрдых частицах полимера, взаимодействие твёрдой и парогазовой фаз, структуру гидродинамических потоков [3]. Ячеичная математическая модель представляет собой систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений и состоит из 490 уравнений. Для решения задач синтеза системы автоматического регулирования использование данной математической модели невозможно ввиду её высокой сложности.

Проведя серию вычислительных экспериментов с использованием данной модели, была получена формализованная математическая модель объекта в форме передаточных функций по различным каналам. Передаточная функция по каналу регулирования температуры: «расход теплоносителя (u) – температура гранул на выходе (y)» отражает поведение объекта в окрестности состояния статики и представляет собой последовательное соединение аperiodического звена второго порядка $W_{an}(s)$ и звена запаздывания $W_3(s)$ с передаточными функциями:

Проведя серию вычислительных экспериментов с использованием данной модели, была получена формализованная математическая модель объекта в форме передаточных функций по различным каналам. Передаточная функция по каналу регулирования температуры: «расход теплоносителя (u) – температура гранул на выходе (y)» отражает поведение объекта в окрестности состояния статики и представляет собой последовательное соединение аperiodического звена второго порядка $W_{an}(s)$ и звена запаздывания $W_3(s)$ с передаточными функциями:

$$W_{an}(s) = \frac{k_{об}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{1.78}{(2.21s+1)(2.15s+1)}, \quad (1)$$

$$W_3(s) = e^{-\tau_3s} = e^{-1.23s},$$

где $k_{об}$ – коэффициент передачи, °C/ [кг/ч]; T_1 , T_2 – постоянные времени, ч; τ_3 – время запаздывания, ч.

Из литературы [10] известно, что звено запаздывания может быть аппроксимировано аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_3(s) \cong \frac{1}{\tau_3s + 1} = \frac{1}{1.23s + 1}.$$

Такая аппроксимация вносит ошибку по фазе в 5° и ошибку по амплитуде 0.145, которыми можно пренебречь. Тогда передаточная

функция по каналу регулирования (1) примет следующий вид:

$$W_{об}(s) = \frac{\hat{y}}{\hat{u}} = \frac{1.78}{4.75s^2 + 4.36s + 1} \cdot \frac{1}{1.23s + 1}. \quad (2)$$

Для решения задачи синтеза алгоритма управления преобразуем математическую модель реактора по каналу управления (2) в модель пространства состояний:

Для решения задачи синтеза алгоритма управления преобразуем математическую модель реактора по каналу управления (2) в модель пространства состояний:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= x_3, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= -0.17x_1 - 0.96x_2 - 1.73x_3 + 0.31u, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_1 = y$ – температура гранул на выходе;
 x_2 – скорость изменения температуры гранул;
 x_3 – ускорение изменения температуры гранул.

Для синтеза астатического закона регулирования на базе регулятора состояния, обладающего свойством робастности, необходимо

$$\frac{dx_4}{d\tau} = x_1 - \bar{x}_1, \quad (4)$$

где \bar{x}_1 – заданное значение температуры гранул.

Из (4) следует, что $x_4 = \int_0^\infty (x_1 - \bar{x}_1) d\tau$.
 Присутствие переменной x_4 в алгоритме управ-

вести интегральную составляющую в алгоритм управления [11, 12]. Расширим исходное пространство состояний объекта дополнительной переменной x_4 , подчиняющейся уравнению [13-16]:

ления означает введение интегральной составляющей по выходной переменной.

Векторно-матричное представление объекта (3), (4) имеет вид:

$$\frac{d\bar{X}}{d\tau} = A\bar{X} + Bu, \quad y = C\bar{x}, \quad (5)$$

$$\text{где } \bar{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0.17 & -0.96 & -1.73 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.31 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1000]$$

Управление, формируемое регулятором состояния, является линейной функцией переменных состояния [14]:

$$u = -K\bar{X} = -(k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4). \quad (6)$$

В инженерной практике широкое распространение получил метод параметрического синтеза систем управления в пространстве состояний, позволяющий поместить все корни замкнутой системы в любые выбранные положения (модальное управление) [17] и, следовательно, обеспечить желаемый характер и пока-

затели качества переходного процесса управления.

Параметры алгоритма управления (k_1, k_2, k_3, k_4) могут быть определены различными способами [6, 12, 13, 17]. В настоящей работе для этого используется соотношение (7) [6, 12]:

$$k = \bar{k}\bar{U}\bar{U}^{-1} = \bar{k}P, \quad (7)$$

где $\bar{k} = ((d_0 - a_0)(d_1 - a_1) \cdots (d_{n-1} - a_{n-1}))$ – матрица регулятора для объекта, представленного в канонической управляемой форме,

(a_i, d_i) – коэффициенты характеристического полинома объекта и эталонного характеристического полинома замкнутой системы, при котором обеспечивается устойчивость и необходимое качество переходного процесса управления;

$\bar{U} = [\bar{B} : \bar{A}\bar{B} : \bar{A}^2\bar{B} : \cdots : \bar{A}^{n-1}\bar{B}]$, $U = [B : AB : A^2B : \cdots : A^{n-1}B]$ – матрицы управляемости объекта, представленного в канонической управляемой форме и в реальных координатах;

P – матрица преобразования координат.

Векторно-матричное представление объекта (3) - (4) в канонической форме управляемости имеет вид (5) с матрицами $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.171 & -0.956 & -1.731 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \bar{C} = [0 \ 0.305 \ 0 \ 0].$$

Матрицы управляемости объекта в реальных координатах U и в канонической управляемой форме \bar{U} имеют следующий вид:

$$U = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.31 & -0.54 \\ 0 & 0.31 & -0.54 & 0.63 \\ 0.31 & -0.54 & 0.63 & -0.63 \\ 0 & 0 & 0 & 0.31 \end{bmatrix}, \bar{U} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1.73 \\ 0 & 1 & -1.73 & 2.037 \\ 1 & -1.73 & 2.037 & -2.04 \end{bmatrix}.$$

Характеристический полином объекта (3) – (4) имеет вид

$$F(s) = |(sI - A)| = s^4 + 1.73s^3 + 0.96s^2 + 0.17s = s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s.$$

В качестве желаемого характеристического полинома для замкнутой системы стабилизации, имеющей апериодический характер

переходных процессов, примем биномиальную стандартную форму четвертого порядка – такой порядок соразмерен с порядком системы:

$$\begin{aligned} H(s) &= (s + \omega_0)^4 = s^4 + 4\omega_0s^3 + 6\omega_0^2s^2 + 4\omega_0^3s + \omega_0^4 = \\ &= s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0, \end{aligned}$$

где ω_0 – настроечный параметр.

Значение параметра ω_0 (среднегеометрический корень) для выбранного типа и поряд-

ка эталонного полинома и заданного времени переходного процесса регулирования τ_p определяется по соотношению [12]:

$$\omega_0 = \frac{\tau_0}{\tau_p}, \tag{8}$$

где $\tau_0 = 7.9$ – безразмерное время регулирования, определённое для нормированной стандартной переходной функции системы при $\omega_0 = 1$ и единичном входном воздействии [12].

При выбранном времени регулирования $\tau_p \approx 5$ ч среднегеометрический корень $\omega_0 = 1.58$ (ч^{-1}). Параметры астатического регулятора состояния имеют значения: $k_1 = 50.35$, $k_2 = 45.22$, $k_3 = 14.81$, $k_4 = 20.1$.

Исследование работоспособности предложенного алгоритма регулирования заключалось в исследовании свойств инвариантности системы к возмущению и ковариантности с заданием при сформулированных требованиях к точности в статике $\Delta_{ст} = \pm 1$ °С и динамике, а также к времени регулирования.

На рис. 1 показаны результаты исследования замкнутой системы на ковариантность с заданием при изменении задания на величину $\Delta t^{\text{зад}} = +2$ °С. Как видно на рис. 1 замкнутая система с предложенным алгоритмом регулирования на базе регулятора состояния является ковариантной с задающим воздействием. Переходный процесс управления имеет апериодический характер, время регулирования $\tau_p \approx 4$ ч не превышает заданного значения.

Результаты исследования системы на инвариантность к действию внешнего возмущения приведены на рис. 2. При моделировании математическая модель в форме (5) была дополнена уравнениями, описывающими действие на объект возмущения.

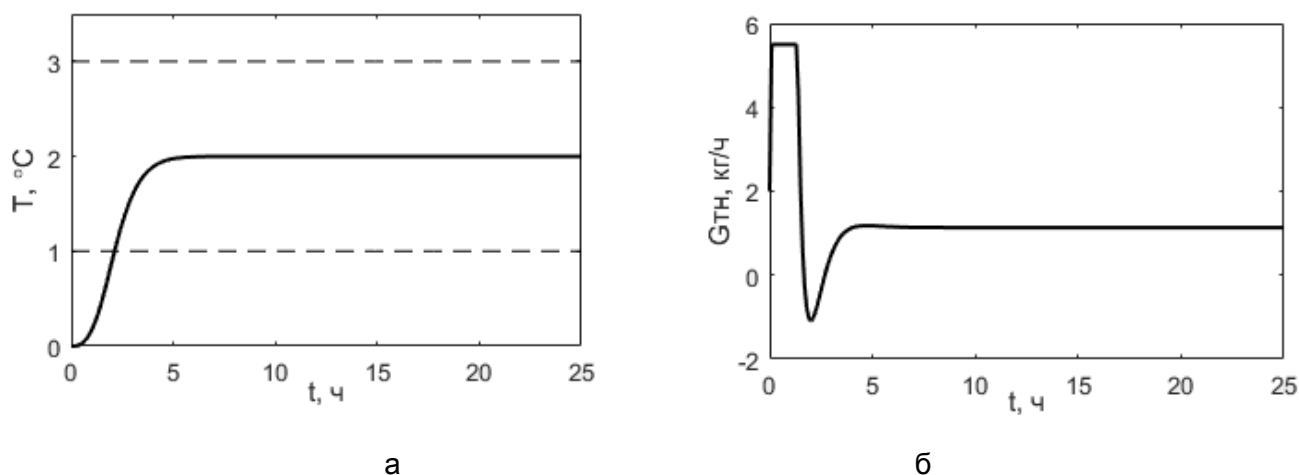


Рис. 1. Переходные процессы выходной координаты (а) и управления (б) при изменении задания регулятору $\Delta t^{\text{зад}} = +2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fig. 1. Transient processes of the output coordinate (a) and control (b) when changing the controller reference $\Delta t^{\text{set}} = +2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Как видно из рисунка 2 объект при повышении температуры теплоносителя на входе в рубашку обогрева выходит на новый стационарный режим. Замкнутая система с астатическим алгоритмом характеризуется перерегули-

рованием $\delta = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$; статическая ошибка $\Delta_{\text{ст}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким образом, можно сделать вывод, что система регулирования температуры гранул на выходе является инвариантной к действию возмущений и ковариантна с заданием.

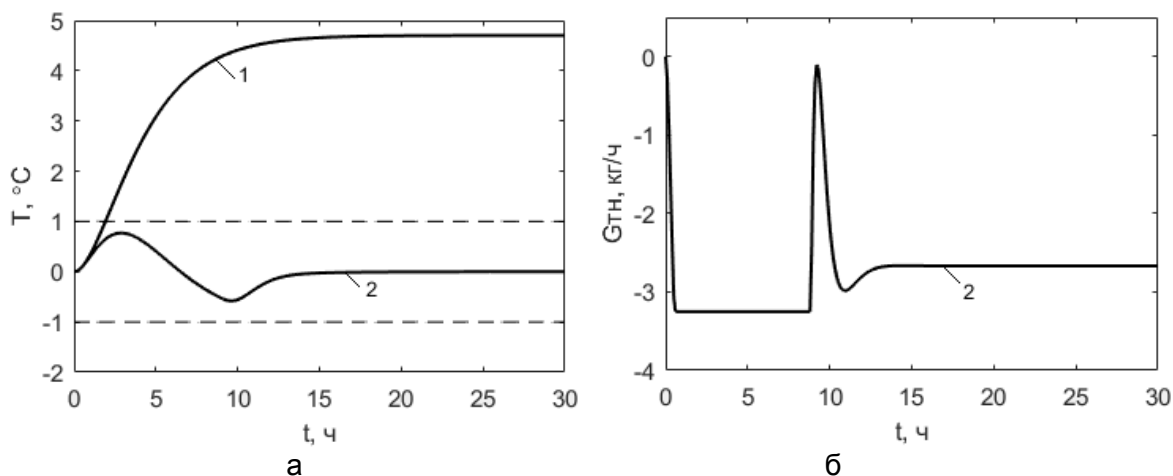


Рис. 2. Переходные процессы выхода объекта (а) и управления (б) при действии внешнего возмущения $\Delta t_{\text{тн,вх}} = +5 \text{ } ^\circ\text{C}$: 1 – объект без регулятора; 2 – замкнутая система с астатическим алгоритмом

Fig. 2. Transient processes of the object output (a) and control (b) under the action of an external disturbance $\Delta t_{\text{n.in}} = +5 \text{ } ^\circ\text{C}$: 1 – object without a controller; 2 – a closed system with an astatic algorithm

Заключение

Для автоматического регулирования температуры гранул на выходе из реактора-дополимеризатора предложен алгоритм управления состоянием с астатической составляющей по регулируемой переменной. Проведён параметрический синтез алгоритма управления исходя из требований к показателям качества и характеру переходного процесса управления

(время регулирования, точность в статике, перерегулирование). Методами вычислительного эксперимента была проверена и доказана работоспособность и эффективность функционирования комплекса «реактор – управляющая подсистема». Алгоритм управления температурой гранул полимера на базе астатического регулятора состояния может быть рекомендован к практическому применению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Борисов В.И., Дли М.И. Модели управления энергоэффективностью сложных химико-технологических систем. Смоленск: Универсум, 2017. 204 с.
2. Мизеровский Л.Н., Базаров Ю.М. Твердофазный синтез полиамида-6. *Химические волокна*. 2006. № 4. С. 40–48.
3. Алексеев Е.А., Головушкин Б.А., Лабутин А.Н., Ерофеева Е.В. Моделирование процесса получения полиамида-6. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 65–68.
4. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 368 с.
5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
6. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: ИГЭУ, 2006. 256 с.
7. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Peculiarities of Synthesis of Parametrically Robust Modal Control System with State Observers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2012. Vol. 51. N 5. P. 617–627.
8. 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. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2011. Vol. 50. N 5. P. 698–713.
9. Аполонский В.В., Тарарыкин С.В. Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 6. С. 25–33.
10. Титов Н.И., Успенский В.К. Моделирование систем с запаздыванием. Л.: Энергия, 1969. 98 с.
11. 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.
12. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
13. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: «Машиностроение», 1976. 184 с.
14. Chia-Chi Tsui. Robust control system design. Advanced state space techniques. CRC Press, 2003. 500 p.
15. Randy A. Freeman., Petar V. Kokotovic. Robust nonlinear control design. State-space and Lyapunov techniques. Birkhäuser, 2008. 257 p.
16. Friedland B. Control system design. An introduction to state-space methods. Dover Publications, 2005. 528 p.
17. Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем управления методом модального управления. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.

REFERENECES

1. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Borisov V.I., Dli M.I. Energy efficiency management models for complex chemical-technological systems. Smolensk: Universum, 2017. 204 p.
2. Mizerovsky L.N., Bazarov Yu.M. Solid-phase synthesis of polyamide-6. *Chemical fibers*. 2006. N 4. P. 40–48.
3. Alekseev E.A., Golovushkin B.A., Labutin A.N., Erofeeva E.V. Modeling the process of obtaining polyamide-6. *ChemChemTech [Izv.vuzov. Chemistry and chemical technology.]*. 2015.Vol. 58. Issue. 1. P. 65–68.
4. Ray W. Methods of control of technological processes. Moscow: Mir, 1983. 368 p.
5. Rotach V.Ya. Automatic control theory. Moscow: MPEI Publishing House, 2008. 396 p.
6. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. Robust modal control of technological objects. Ivanovo: ISEU, 2006. 256 p.
7. Anisimov A.A., Tararykin S.V. Peculiarities of Synthesis of Parametrically Robust Modal Control System with State Observers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2012. Vol. 51. N 5. P. 617–627.
8. 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. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2011. Vol. 50. N 5. P. 698–713.
9. Apolonsky V.V., Tararykin S.V. Methods for the synthesis of reduced state controllers for linear dynamic systems. *Izvestiya RAN. Theory and control systems*. 2014. N 6. P. 25–33.

10. **Titov N.I., Uspensky V.K.** Simulation of systems with delay. L.: Energiya, 1969. 98 p.

11. **Labutin A.N., Nevitsyn V.Yu., Zaitsev V.A., Volkova G.V.** Robust control of the concentration of the target product in a chemical reactor. *ChemChemTech [Izv.vuzov. Chemistry and chemical technology.]*. 2018. Vol. 61. Issue. 12. P. 129–136.

12. **Pupkov K.A., Egupov N.D.** Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook. Vol. 3: Synthesis of regulators of automatic control systems. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2004. 616 p.

13. **Kuzovkov N.T.** Modal control and observing devices. M.: "Mechanical engineering", 1976. 184 p.

14. **Chia-Chi Tsui.** Robust control system design. Advanced state space techniques. CRC Press, 2003. 500 p.

15. **Randy A. Freeman., Petar V. Kokotovic.** Robust nonlinear control design. State-space and Lyapunov techniques. Birkhäuser, 2008. 257 p.

16. **Friedland B.** Control system design. An introduction to state-space methods. Dover Publications, 2005. 528 p.

17. **Grigoriev V.V., Zhuravleva N.V., Lukyanova G.V., Sergeev K.A.** Synthesis of control systems by the modal control method. St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2007. 108 p.