

**ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕАКТОРОМ-ДОПОЛИМЕРИЗАТОРОМ**

**Алексеев Е.А., Лабути А.Н.**

Алексеев Евгений Алексеевич, Лабути Александр Николаевич  
Ивановский государственный химико-технологический университет,  
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.  
E-mail: alekseev\_ea@isuct.ru, lan@isuct.ru

*В статье представлены результаты решения задачи синтеза алгоритма управления аппаратом твердофазного дополиамидирования. Для достижения цели управления предложена одно-контурная система на базе цифрового астатического регулятора состояния. С использованием программного пакета Matlab была получена дискретная математическая модель реактора. Численные значения параметров настройки регулятора состояния определены методом модального управления. Работоспособность исследуемой системы регулирования температуры гранул полиамида-6 была проверена методом программно-аппаратного моделирования. В состав программно-технического комплекса входили программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 154 и станция оператора. Связь между контроллером и рабочей станцией осуществлялась посредством OPC-сервера через сеть Ethernet. Были проведены исследования замкнутой системы на ковариантность и инвариантность к действию внешнего возмущения. Анализ полученных результатов подтвердил эффективность синтезированного алгоритма: выбранные критерии качества работы системы регулирования не превосходили заданных значений. Показано, что при невозможности измерения всех переменных состояния система может быть неустойчивой.*

**Ключевые слова:** полиамид-6, цифровая система управления, регулятор состояния, программируемый логический контроллер

**HARDWARE-IN-THE-LOOP MODELING OF CONTROL SYSTEM  
FOR PREPOLYAMIDATION TANK**

**Alekseev E.A., Labutin A.N.**

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

*The results of solving task of synthesizing control algorithm for prepolyamidation tank are shown in this paper. To achieve an aim of controlling closed-loop control system based on digital astatic state space controller were suggested. Discrete mathematical model of apparatus was derived in program Matlab. Parameters values of control algorithm were computed by using modal control method. Workability of considered control system for polyamide-6 pellets temperature were examined by means of hardware-in-the-loop modeling. Hardware-software complex consists of programmable-logical controller OWEN PLC 154 and user workstation. Communication between controller and workstation realizes by means of OPC-server via Ethernet network. Covariance and invariance under external disturbance features were studied. Efficiency of designed control algorithm was proved by the results of examinations: selected criteria of control system efficiency are less than their given values. It is shown that if state space variables can not be measured then closed-loop control system can be unstable.*

**Keywords:** polyamide-6, digital control system, state space controller, programmable-logical controller

**Для цитирования:**

Алексеев Е.А., Лабути А.Н. Полунатурное моделирование системы управления реактором-дополнителем. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С.100-106. DOI: 10.6060/snt.20268501.00011

**For citation:**

Alekseev E.A., Labutin A.N. Semi-naturalistic modeling of the control system of a reactor-additive. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 100-106. DOI: 10.6060/snt.20268501.00011

В настоящее время синтетический полимер полиамид-6 (ПА-6) находит широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, пищевой, нефтедобывающей, металлургической и пр. На основе ПА-6 могут быть получены нити технического и медицинского назначения, композиционные материалы, обладающие особыми свойствами (огнестойкие, ударопрочные, морозостойкие и пр.), протезы, искусственные кровеносные сосуды, товары народного потребления лёгкой промышленности. При разработке энерго- и ресурсоэффективных технологических процессов получения синтетических полимеров остро стоит задача эффективного управления стадиями [1-5]. На типовых производствах регламентные значения технологических параметров поддерживаются, как правило, за счёт применения различных по структуре систем регулирования на базе ПИД регуляторов. В тех случаях, когда для проведения технологического процесса предлагается использовать аппаратно-технологическое

оформление, несколько отличное от типового, задачи управления могут быть не вполне решены.

В работах [6, 7] описано энергоэффективное аппаратно-технологическое оформление получения ПА-6. Авторы [6] предлагают расширить существующую технологическую схему новыми стадиями, одной из которых является дополиамидирование гранул полимера. Этот сложный гетерофазный процесс протекает в трубчатых реакторах при определённом температурном режиме. В этой связи, задача синтеза системы регулирования температуры гранул на выходе из реактора является актуальной.

На основе математической модели процесса дополиамидирования [7], представляющей собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, была получена линеаризованная модель в форме передаточных функций. Передаточная функция по каналу регулирования температуры имеет следующий вид [8]:

$$H_{06}(s) = \frac{1.78}{(2.21s + 1)(2.15s + 1)(1.23s + 1)}. \quad (1)$$

В представленной работе для обеспечения желаемой температуры гранулята ПА-6, покидающего аппарат, предлагается использовать одноконтурную систему на базе цифрового астатического регулятора состояния. Для синтеза циф-

ровой системы будем использовать метод модального управления.

Математическое описание объекта (1) в форме пространства состояний может быть представлено следующим образом:

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx, \quad A = \begin{bmatrix} -0.452 & 0 & 0 \\ 0.465 & -0.465 & 0 \\ 0 & 0.813 & -0.813 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.805 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [001], \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы состояния, входа и выхода объекта;  $u$  – управляющее воздействие на объект;  $x$  – вектор переменных состояния;  $y$  – выходной сигнал объекта.

Расширим исходное пространство состояний (2) дополнительной переменной  $x_4$ , описываемой выражением (3):

$$\dot{x}_4 = x_3. \quad (3)$$

Благодаря наличию данного уравнения становится возможным провести процедуру синтеза цифрового астатического закона регулирования, обладающего свойством робастности [9, 10].

Преобразуем расширенное пространство состояний (2-3) в дискретную форму. Для этого воспользуемся встроенной функцией математического пакета Matlab. При  $T_0 = 0.025$  ч матрицы состояния  $A_d$ , входа  $B_d$  и выхода объекта  $C_d$  в дискретной форме примут вид (4):

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.989 & 0 & 0 & 0 \\ 0.011 & 0.988 & 0 & 0 \\ 0.0001164 & 0.02 & 0.98 & 0 \\ 9.754 \times 10^{-7} & 0.0002514 & 0.025 & 1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.0001161 \\ 7.852 \times 10^{-7} \\ 3.925 \times 10^{-9} \end{bmatrix}, \quad C_d = [0010]. \quad (4)$$

Регулятор состояния формирует управляющее воздействие  $u$  на объект управления согласно линейному закону [9-12]:  $u = -K_d x_d = -(k_{d,1}x_{d,1} + k_{d,2}x_{d,2} + k_{d,3}x_{d,3} + k_{d,4}x_{d,4})$ . (5)

Численные значения параметров алгоритма управления ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ) могут быть опреде-

лены различными способами, которые хорошо описаны в литературе по теории автоматического управления (например, применение формулы Аккермана). В настоящей работе для решения данной задачи воспользуемся соотношением (6):

$$K_d = \overline{K_d} \cdot \overline{U_d} \cdot U_d^{-1}, \quad \overline{K_d} = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, d_2 - a_2, d_3 - a_3], \quad (6)$$

где  $\overline{K_d}$  – матрица регулятора для объекта, представленного в канонической форме управляемости (КФУ); ( $a_i, d_i$ ) – коэффициенты характеристического полинома объекта и эталонного характеристического полинома замкнутой системы регулирования, при котором обеспечивается устойчивость системы и необходимое качество переходного процесса управления;  $\overline{U_d} = [\overline{B_d} : \overline{A_d} \cdot \overline{B_d} : \overline{A_d^2} \cdot \overline{B_d} : \overline{A_d^3} \cdot \overline{B_d}]$ ,  $U_d = \overline{B_d} \cdot \overline{A_d} \cdot \overline{B_d} \cdot \overline{A_d^2} \cdot \overline{B_d} \cdot \overline{A_d^3} \cdot \overline{B_d}$  – матрицы управляемости объекта, представленного в КФУ и в реальных координатах.

На вид переходных процессов регулирования выходной переменной непосредственно оказывает влияние форма, в которой задан эталонный характеристический полином замкнутой системы (например, стандартные полиномы Ньютона, Баттерворта или произвольная форма).

Для того, чтобы переходные процессы в исследуемой системе регулирования носили монотонный характер, применим в качестве желаемого характеристического полинома выражение (7), порядок которого соразмерен с порядком рассматриваемого объекта:

$$D(z) = (z - \Omega_d)^4 = z^4 + d_3 z^3 + d_2 z^2 + d_1 z + d_0, \quad (7)$$

где  $z$  – оператор дискретного преобразования;  $\Omega_d$  – среднегеометрический корень полинома контура управления.

Значение параметра  $\Omega_d$  было определено согласно методике, представленной в работах [12, 13]. Рассчитанное значение составило 0.887.

Для исследования работоспособности системы регулирования с предложенным алгоритмом

была проведена её реализация на базе программно-технического комплекса (ПТК) кафедры ТКиА. ПТК включает в себя программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 154 с модулями ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов (в данной работе не задействованы) и рабочую станцию, соединённые по сети Ethernet (рис. 1).

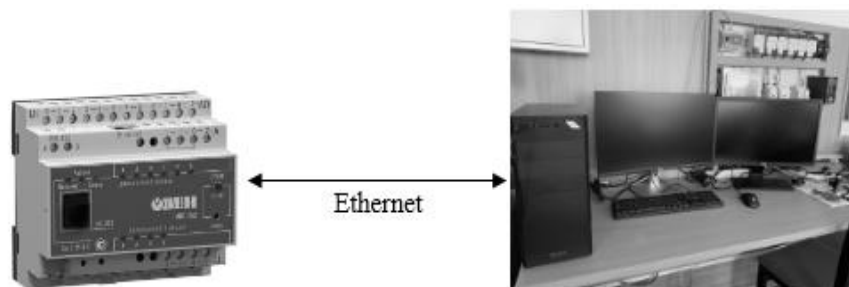


Рис. 1. Структура программно-технического комплекса  
Fig. 1. Structure of hardware-software complex

Контроллер ОВЕН ПЛК154 представляет собой моноблочный контроллер, имеющий на борту 4 аналоговых входа, 4 дискретных входа, 4 аналоговых выхода и 4 дискретных выхода. Основная область применения ПЛК 154 это малые системы автоматизации. Для программирования контроллера используется система CoDeSys v.2.3, поддерживающая все языки программирования стандарта МЭК 61131-3.

Рассматриваемая в работе система регулирования температуры гранул полимера была исследована методом программно-аппаратного моделирования. Алгоритм управления был реализован в контроллере ОВЕН ПЛК 154 на языке программирования ST. Моделирование работы реактора выполнялось с применением приложения Simulink математического пакета Matlab. Обмен данными между контроллером и компьютерной моделью происходил через поставляемый вместе со средой CoDeSys OPC сервер.

Для оценки эффективности и работоспособности системы были сформулированы следующие требования к точности в статике и дина-

мике: допустимое отклонение температуры от своего заданного значения  $\pm 1^\circ\text{C}$ , максимальное значение динамической ошибки  $\pm 2^\circ\text{C}$ , время регулирования не должно превышать 5 ч. Исходя из физического смысла при проведении моделирования на управляющее воздействие было наложено ограничение в виде *sat*-функции:

$$\text{sat}u = \begin{cases} u_{\min}, & u < u_{\min} \\ u, & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ u_{\max}, & u > u_{\max} \end{cases}$$

где  $u_{\max}$  и  $u_{\min}$  – максимальное и минимальное значения регулирующего воздействия.

На рис. 2 приведены переходные процессы выхода объекта (а) и управления (б) при исследовании замкнутой системы на ковариантность с задающим воздействием  $\Delta t_{\text{зад}}$ .

Как видно на рис. 2, а при смене задания регулятору на величину  $+2^\circ\text{C}$  график изменения температуры гранул полиамида-6 имеет монотонный характер, статическая ошибка отсутствует, время регулирования составляет  $\approx 4$  ч, что не превосходит допустимого значения.

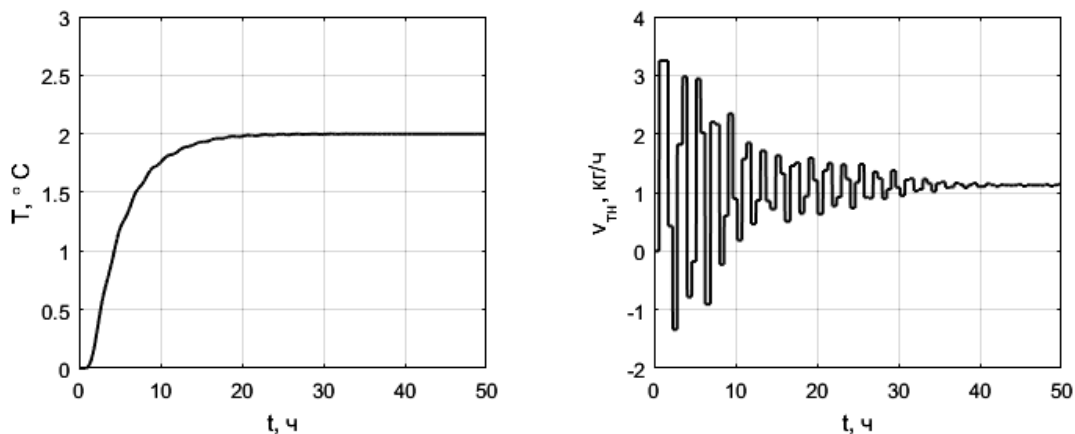


Рис. 2. Исследование замкнутой системы на ковариантность  
Fig. 2. Examination of closed-loop control system for covariance

При проведении исследования на инвариантность исходная система уравнений (2-4) была дополнена уравнениями, описывающими действие внешнего возмущения (температуры теплоносителя на входе в рубашку обогрева) на объект. Переходные процессы выхода объекта (а) и управления (б) показаны на рис. 3. Увеличение температуры поступающего в рубашку теплоносителя приводит к тому, что объект без регулятора выходит на новое стационарное состояние (линия 1 на рис. 3,а). При этом отклонение температуры гранул полимера, покидающих реактор, от регламентного значения составляет  $4,7^\circ\text{C}$ , что превышает допустимую величину статической ошибки.

В замкнутой системе с астатическим регулятором состояния наблюдается нулевая статическая ошибка, величина динамической ошибки составляет  $1,57^\circ\text{C}$  (линия 2 на рис. 3,а).

Экспериментальным путём было проведено исследование влияния периода квантования на устойчивость замкнутой системы автоматического регулирования. На рис. 4 показаны переходные процессы выхода объекта при смене задания регулятору на  $\Delta t_{\text{зад}} = +2^\circ\text{C}$ , полученные при различных значениях параметра  $T_0$ .

Как видно на рис. 4 увеличение значения  $T_0$  приводит к тому, что замкнутая система становится неустойчивой

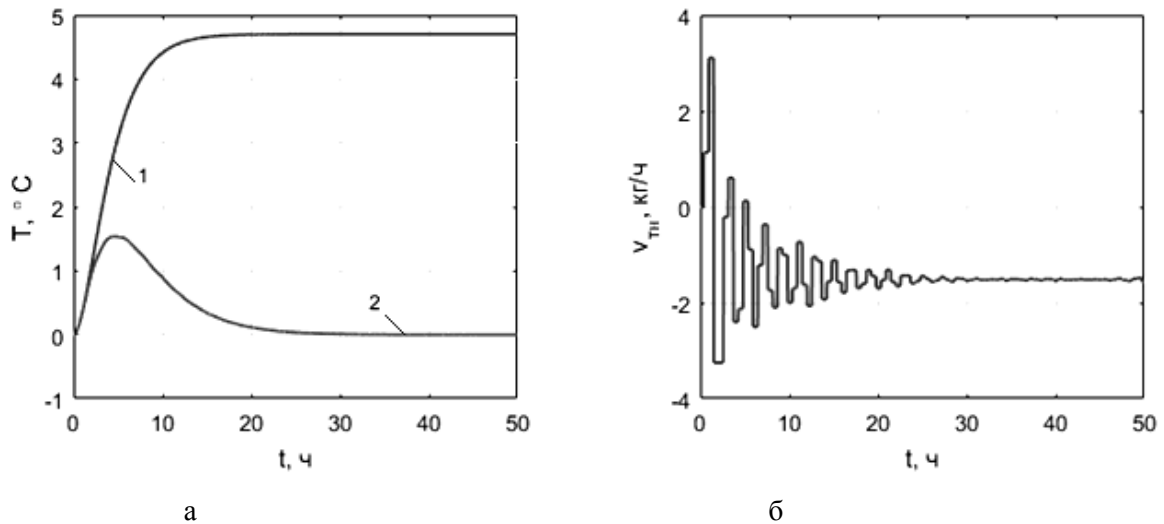


Рис. 3. Исследование замкнутой системы на инвариантность:  
1 – объект без регулятора; 2 – замкнутая система  
Fig. 3. Examination of closed-loop control system for invariance:  
1 – object without controller; 2 – closed-loop control system

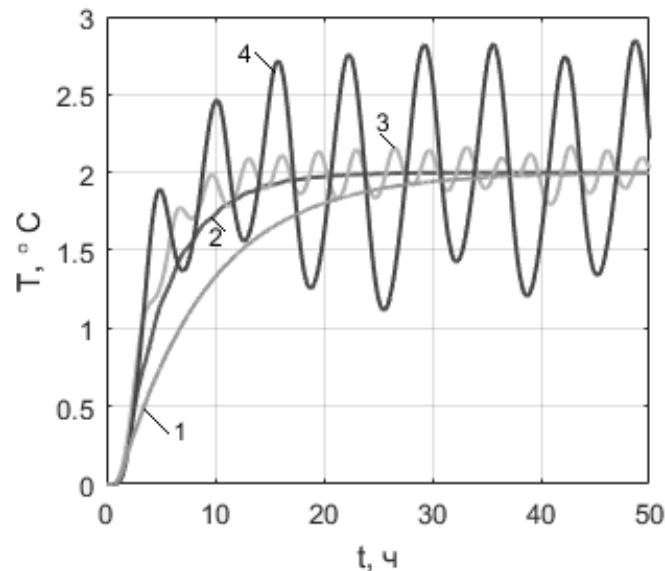


Рис. 4. Переходная характеристика системы регулирования при различных значениях параметра  $T_0$ :  
1 –  $T_0 = 0.01$  ч, 2 –  $T_0 = 0.025$  ч, 3 –  $T_0 = 0.05$  ч, 4 –  $T_0 = 0.1$  ч  
Fig 4. Step response of control system under various values of  $T_0$ : 1 –  $T_0 = 0.01$  h, 2 –  $T_0 = 0.025$  h,  
3 –  $T_0 = 0.05$  h, 4 –  $T_0 = 0.1$  h

Исследования замкнутых систем, представленные в работе, были проведены в предположении, что все переменные состояния объекта измеряются.

Однако на практике не всегда имеется физическая возможность измерения всех выходных координат.

На рис. 5 представлены переходные процессы выхода объекта при смене задания регулятору на величину  $+2$  °C для случаев, когда измеряется не весь вектор переменных состояния.

При измерении только выходной переменной  $x_3$  замкнутая система является неустойчивой (линия 1 на рис. 5). При измерении только переменных  $x_1$  и  $x_3$  замкнутая система является устойчивой (линия 2 на рис. 5), критерии качества не превосходят заданных величин.

В том случае, когда возможно измерение только переменных  $x_2$  и  $x_3$  замкнутая система также является неустойчивой (линия 3 на рис. 5), однако амплитуда и период колебаний меньше, чем в случае измерения только переменной  $x_3$ .

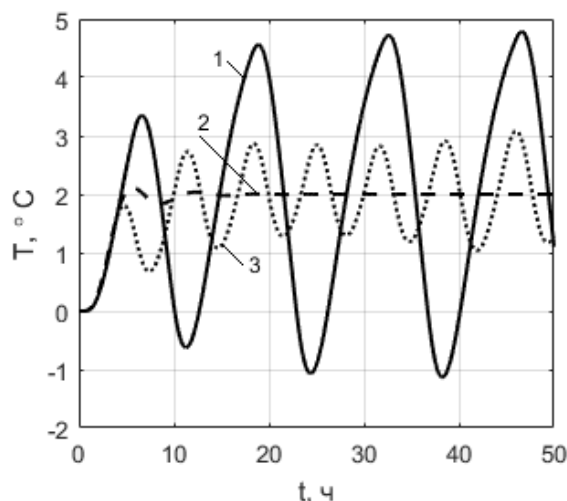


Рис. 5. Исследование замкнутой системы на ковариантность при неполном векторе измерения:

1 – измеряется только  $x_3$ , 2 – измеряются только  $x_1$  и  $x_3$ , 3 – измеряются только  $x_2$  и  $x_3$

Fig 5. Examination closed-loop control system under incomplete measurement vector: 1 – variable  $x_3$  is measured only, 2 – variables  $x_1$  and  $x_3$  are measured only, 3 – variables  $x_2$  and  $x_3$  are measured only

Таким образом, анализируя полученные результаты программно-аппаратного моделирования, можно сделать заключение о том, что предложенная система регулирования температуры гранул полиамида-6 при возможности измерения всех переменных состояния является работоспособной. В случае, когда невозможно измерить какие-то из переменных, включая выходную, необходимо дополнить систему наблюдателем состояния Люенбергера [9, 12, 14], поскольку использование редуцированного регулятора состояния [15] приводит к потере устойчивости системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена цифровая система поддержания температуры гранулята ПА-6 на выходе из реактора-дополимеризатора на базе астаического регулятора состояния. Настроечные параметры алгоритма регулирования были полу-

чены методом модального управления с применением дискретной модели рассматриваемого объекта. Для оценки работоспособности исследуемой системы была проведена её реализация на базе ПТК кафедры ТКиА ФГБОУ ВО «ИГХТУ». На основании результатов, полученных в ходе программно-аппаратного моделирования, можно сделать заключение о том, что цифровая система управления является ковариантной с задающим воздействием и инвариантной к действию внешнего возмущения при условии, что все переменные состояния могут быть измерены.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this paper.*

#### 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. Блиничев В.Н., Лабути А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt. 2023 6607.6845j

#### REFERENCES

1. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Borisov V.I., Dli M.I. Models of control of energy efficiency of heavy chemical technological systems control. Smolensk: Universum. 2017. 204 p. (in Russian)
2. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G. N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu. N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. Issue. 7. P. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j

3. **Лабути́н А.Н., Андре́енков А.А., Алексе́ев Е.А., Волкова Г.В., Пономаре́ва Ю.Н.** Анализ и редукция модели реактора при синтезе системы управления. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 1(77). С. 102-108. DOI:10.6060/snt.20247701.00014
4. **Невини́цын В.Ю., Грими́нский П.Н., Лиха́ч Д.С., Суббо́тин П.А.** Разработка автоматизированной системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления ректификационной установкой. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 85-92. DOI:10.6060/snt.20247802.00012
5. **Андре́енков А.А., Лабути́н А.Н., Волкова Г.В.** Синтез и моделирование систем управления объектом с экстремальной статической характеристикой. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 2(82). С. 52-58. DOI:10.6060/snt.20258202.0007
6. **Мизеро́вский Л.Н., Базаро́в Ю.М.** Твердофазный синтез полиамида-6. *Хим. волокна*. 2006. № 4. С. 40-48.
7. **Алексе́ев Е.А., Голову́шкин Б.А., Лабути́н А.Н., Ерофе́ева Е.В.** Моделирование процесса получения полиамида-6. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т.58. Вып. 1. С. 65-68.
8. **Лабути́н А.Н., Алексе́ев Е.А.** Синтез алгоритмов управления температурой в реакторе твердофазного дополиамидирования. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. №3(67). С. 63-69. DOI:10.6060/snt.20216703.0009
9. **Тютико́в В.В., Тарары́кин С.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: Ивановский гос. Энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2006. 256 с.
10. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
11. **Анисимов А.А., Тарары́кин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. Иваново: ИГЭУ. 2015. 296 с.
12. **Анисимов А.А., Тарары́кин С.В.** Синтез робастных систем управления мехатронными объектами с цифровыми регуляторами и наблюдателями состояния. *Вестник ИГЭУ*. 2020. Вып. 6. С. 39-47. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.039-047
13. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1986. 488 с.
14. **Анисимов А.А., Соколов К.Е., Тарары́кин С.В.** Синтез параметрически грубых систем управления с регуляторами и наблюдателями состояния на основе грамианных технологий. *Вестник ИГЭУ*. 2024. Вып. 2. С. 70-81. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.070-081
15. **Аполонский В.В., Тарары́кин С.В.** Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 6. С. 25–33.
3. **Labutin A.N., Andreenkov A.A., Alekseev E.A., Volkova G.V., Ponomareva Yu.N.** Analysis and reduction of the reactor model in the synthesis of a control system. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 1 (77). P. 102-108. DOI: 10.6060/snt.20247701.00014
4. **Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Likhach D.S., Subbotin P.A.** Development of an automated system for data collection and operational dispatch control of a distillation unit. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 2 (78). P. 85-92. DOI: 10.6060/snt.20247802.00012
5. **Andreenkov A.A., Labutin A.N., Volkova G.V.** Synthesis and modeling of control systems for an object with extreme static characteristics. *Modern high technologies. Regional application*. 2025. N 2 (82). P. 52-58. DOI: 10.6060/snt.20258202.0007
6. **Mizerovskiy L.N., Bazarov Yu.M.** Solid-phase synthesis of polyamide-6. *Fibre Chemistry*. 2006. N 4. P. 40-48.
7. **Alekseev E.A., Golovushkin B.A., Labutin A.N., Erofeeva E.V.** Simulation of production polyamide-6. *ChemChemTech*. 2015. V. 58. N 6. P. 65-68.
8. **Labutin A.N., Alekseev E.A.** Design of control algorithm of temperature in prepolyamidation tank. *Modern high technologies. Regional application*. 2021. N 3(67). P. 63-69. DOI:10.6060/snt.20216703.0009
9. **Tyutikov, V.V., Tararykin S.V.** Robust modal control of technological objects. Ivanovo: ISPU. 2006. 256 p. (in Russian)
10. Methods of classical and modern automatic control theory. Synthesis of automatic control system controllers. Pod. red. K.A. Pupkova i N.D. Egupova M. BMSTU, 2004. 616 p. (in Russian)
11. **Anisimov A.A., Tararykin S.V.** Structural-parametric synthesis, optimization and tuning of technological objects control systems. Ivanovo: ISPU, 2015. 296 p.
12. **Anisimov A.A., Tararykin S.V.** Synthesizing robust control systems for mechatronic objects with digital state space controllers and observers. *ISEU Bulletin*. 2020. N 6. P. 39-47. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.039-047
13. **Kuo B.** Theory and design of automatic control systems. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 488 p.
14. **Anisimov A.A., Sokolov K.E., Tararykin S.V.** Synthesis of parametrically rough control systems with regulators and state observers based on Gramian technologies. *ISEU Bulletin*. 2024 N 2. P. 70-81. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.070-081
15. **Apolonskiy V.V., Tararykin S.V.** Methods for the synthesis of reduced state controllers of linear dynamic systems. *Izvestia RAN. Theory and control systems*. 2014. N 6. P. 25-33.

Поступила в редакцию(Received) 10.12.2025  
Принята к опубликованию (Accepted) 05.02.2026