

**РОБАСТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРОМ  
ТВЕРДОФАЗНОГО ДОПОЛИАМИДИРОВАНИЯ****Алексеев Е.А., Лабутин А.Н., Пономарева Ю.Н.**

Алексеев Евгений Алексеевич, Лабутин Александр Николаевич, Пономарева Юлия Николаевна  
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, julia-zagarinskaya@yandex.ru

*В работе предлагается робастная система автоматического регулирования температуры гранул полиамида-6 на выходе из реактора твердофазного дополиамидирования. Применяя инструментарий пакета инженерных вычислений Matlab была получена формализованная модель пилотного реактора в форме передаточных функций по каналам управления и возмущения. Для регулирования температуры использована классическая одноконтурная замкнутая система на базе астатического полиномиального регулятора минимального порядка. Методом модального управления рассчитаны параметры настройки регулятора. Методом компьютерного моделирования были проведены исследования замкнутой системы управления на ковариантность с задающим воздействием и инвариантность к действию внешнего возмущения. Анализ полученных данных подтвердил работоспособность предложенной системы. Внедрение рассмотренного алгоритма регулирования в производственный процесс синтеза полиамида-6 позволит повысить качество готовой продукции.*

**Ключевые слова:** полиамид-6, математическое моделирование, робастная система управления, полиномиальный регулятор.

**ROBUST CONTROL SYSTEM  
OF PREPOLYAMIDATION TANK****Alekseev E.A., Labutin A.N., Ponomareva Y.N.**

Alekseev Eugene Alekseevich, Labutin, Alexander Nikolaevich, Ponomareva Yulia Nikolaevna  
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, julia-zagarinskaya@yandex.ru

*Robust automatic control system of polymer pellets temperature at outlet of prepolyamidation tank are suggested in this paper. Tank formalized model in form of transfer functions of control and disturbance channels were derived from mathematical model of tank by using applications of Matlab. Classical closed-loop control system containing minimal order astatic polynomial controller are used. Parameters of controller were calculated by using of modal control method. Examinations of control system were carried out by simulations. Efficiency of proposed control system were proved. Quality of final product, made from polyamide-6 pellets, will be increased by introduction proposed control algorithm in technological process of polymer synthesis.*

**Keywords:** polyamide-6, math modeling, robust control system, polynomial controller.

Проектирование эффективных систем управления стадиями является одной из основных задач, решаемых при создании энерго- и ресурсоэффективных технологических процессов получения полимера полиамида-6 [1]. Для крупнотоннажных производств эта задача в основном решена. На предприятиях для поддержания регулируемых величин на заданном уровне как правило

применяются типовые одноконтурные, комбинированные и каскадные системы на базе ПИ и ПИД алгоритмов регулирования [2-4].

Для вновь вводимых малотоннажных производственных линий, имеющих нередко несколько отличное аппаратурно-технологическое оформление по сравнению с крупнотоннажными, задачи управления не решены.

В работах [5-6] предложена энергоэффективная технологическая схема получения полиамида-6, предусматривающая введение новых стадий дополиамидирования в твёрдой фазе и совмещённого процесса сушки-демономеризации. Дополиамидирование представляет собой сложный гетерофазный процесс, который осуществляется в реакторе типа «труба в трубе». Вдоль продольной оси реактора-дополимеризатора расположен вращающийся шнек, предназначенный для перемещения и «ворошения» твёрдой фазы. Шнек содержит ряд равномерно распределённых по длине вала лопастей. В результате аппарат получается «разделённым» на ячейки одинакового размера. Для создания необходимой температуры в рубашку подается динил – жидкофазный органический теплоноситель. Авторами [5-6] были проведены исследования кинетики реакции дополиамидирования в твёрдой фазе, определены оптимальные значения технологических и режимных параметров. Установлено, что технологическими параметрами, характеризующими состояние процесса и определяющими его эффектив-

ность, являются концентрация мономера в гранулах и температура твёрдых частиц.

В этой связи актуальной является задача синтеза системы регулирования температуры гранул на выходе из реактора-дополимеризатора.

Авторами [6] разработана математическая модель процесса дополиамидирования, отражающая процессы в твёрдых частицах полимера, взаимодействие твёрдой и парогазовой фаз, структуру гидродинамических потоков. Модель построена с учётом конструктивных особенностей пилотного реактора. Проведя серию вычислительных экспериментов с использованием исходной модели, было получено математическое описание реактора в форме передаточных функций по различным каналам. Передаточная функция по каналу регулирования температуры «расход теплоносителя (u) – температура гранул на выходе (y)» описывает поведение объекта в окрестности рабочей точки и представляет собой последовательное соединение апериодического звена второго порядка и звена запаздывания [8]:

$$H_{об}(s) = \frac{\hat{y}}{\hat{u}} = \frac{k_{об}e^{-\tau_3 s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{1.78e^{-1.23s}}{(2.21s + 1)(2.15s + 1)}, \quad (1)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент передачи, °C/[кг/ч];  $T_1, T_2$  – постоянные времени, ч;  $\tau_3$  – время запаздывания, ч.

Аппроксимировав звено запаздывания апериодическим звеном первого порядка [7] с передаточной функцией

$$H_3(s) \cong \frac{1}{\tau_3 s + 1} = \frac{1}{1.23s + 1},$$

получим следующий вид выражения (1):

$$H_{об}(s) = \frac{1.78}{(2.21s + 1)(2.15s + 1)(1.23s + 1)} = \frac{1.78}{5.84s^3 + 10.11s^2 + 5.59s + 1}. \quad (2)$$

Ранее в работе [8] была предложена система регулирования температуры гранулята на выходе из реактора на базе астатического регулятора состояния. Недостатком представленного подхода является необходимость измерения всего вектора переменных состояния, участвующих в формировании управляющего воздействия. Если оперативное измерение какой-либо переменной состояния невозможно или нецелесообразно, то в этом случае в структуру системы регулирования дополнительно включается наблюдатель состояния. Это приводит к увеличению сложности системы регулирования.

Альтернативой введению наблюдателя состояния является метод редукции регуляторов

состояния [9], который в некоторых случаях не может быть применён. В данной работе в качестве альтернативы регулятору состояния предлагается использовать полиномиальный регулятор.

Системы с полиномиальными регуляторами «входа – выхода» предлагают наиболее простое в структурном отношении решение задачи синтеза систем модального управления [4]. Полиномиальные регуляторы основываются на идеях метода желаемой (эталонной) передаточной функции. При этом нули и полюсы системы размещаются в заданных точках комплексной плоскости. Данный метод хорошо изучен, однако его применение для ряда объектов может привести к физически нереализуемой или негрубой системе.

Для получения работоспособной системы можно наложить ряд ограничений на структуру желаемой передаточной функции замкнутой системы, а также передаточную функцию регулятора [10]. В общем виде структура замкнутой систе-

мы с полиномиальным регулятором может иметь вид, представленный на рис. 1.

Передаточная функция замкнутой системы с полиномиальным алгоритмом регулирования имеет следующий вид:

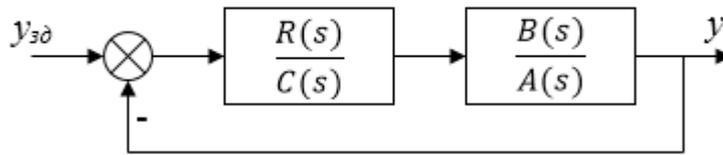


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы с полиномиальным регулятором

Fig. 1. Structural diagram of a closed system with a polynomial controller

$$H_{зс}(s) = \frac{B_p(s)B_{об}(s)}{C(s)A_{об}(s) + R(s)B_{об}(s)},$$

где  $R(s)$  и  $B_{об}(s)$  – полиномы числителя передаточной функции регулятора и объекта, соответственно;  $C(s)$  и  $A_{об}(s)$  – полиномы знаменателя передаточной функции регулятора и объекта,

соответственно.

Приравняв характеристическое уравнение системы к эталонному уравнению, получим основное уравнение синтеза [10]:

$$C(s)A_{об}(s) + R(s)B_{об}(s) = D(s), \tag{3}$$

где  $D(s)$  – эталонный характеристический полином замкнутой системы.

Параметры эталонного полинома регулятора, а также эталонного полинома определяются по следующим соотношениям:

Порядки полиномов числителя и знамена-

$$\text{deg}R(s) = \text{deg}A_{об}(s) - 1$$

$$\text{deg}C(s) = \text{deg}R(s)$$

$$\text{deg}D(s) = \text{deg}A_{об}(s) + \text{deg}C(s)$$

Для того, чтобы определить неизвестные коэффициенты полинома числителя и знаменателя передаточной функции регулятора необходимо решить систему алгебраических уравнений, которая получается путём приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях  $s$  в левой и правой частях основного уравнения синтеза (3).

обеспечить заданные быстродействие, степень колебательности и динамическую ошибку при наличии недопустимо большой статической ошибки. Для её ликвидации в структуру регулятора дополнительно вводится интегратор [10].

Использование систем на базе полиномиальных алгоритмов регулирования в случаях, когда в прямой цепи отсутствует интегратор, может

Для удобства проведения расчётов интегратор можно вводить в структуру самого объекта:  $A_{об1}(s) = sA_{об}(s)$ . Тогда передаточная функция полиномиального регулятора температуры примет следующий вид:

$$H_p(s) = \frac{r_3s^3 + r_2s^2 + r_1s + r_0}{c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0} \tag{4}$$

$$D(s) = (s + \Omega)^7 = s^7 + 7\Omega s^6 + 21\Omega^2 s^5 + 35\Omega^3 s^4 + 35\Omega^4 s^3 + 21\Omega^5 s^2 + 7\Omega^6 s + \Omega^7,$$

В качестве желаемого характеристического полинома  $D(s)$  был выбран бином Ньютона 7-го порядка.

параметры  $\tau_r$  определяется по соотношению [10]:

где  $\Omega$  – настроечный параметр.

$$\Omega = \frac{\tau_0}{\tau_p}, \tag{5}$$

Среднегеометрический корень  $\Omega$  для выбранного типа и порядка эталонного полинома и заданного времени переходного процесса ре-

где  $\tau_0 = 6$  – безразмерное время регулирования, определённое для нормированной стан-

дартной переходной функции системы при  $\Omega = 1$  и единичном входном воздействии [10]. При выбранном времени регулирования  $tr \approx 5$  ч среднегеометрический корень  $\Omega = 1.2$  (ч-1).

$$H_p(s) = \frac{8.01s^3 + 15.16s^2 + 9.51s + 2.01}{0.17s^3 + 1.14s^2 + 3.04s + 3.98} \quad (6)$$

Методами компьютерного моделирования предложенная система с астатическим полиномиальным регулятором была исследована на работоспособность. Были сформулированы следующие требования к точности в статике и динамике: максимальные значения статической  $\Delta_{ст}$  и динамической  $\delta$  ошибок по модулю не должны превышать  $1^\circ\text{C}$ , время регулирования должно быть меньше или равно 5 ч.

На рис. 2 приведены результаты исследования замкнутой системы на ковариантность с заданием при смене заданного значения на величину  $\Delta t_{зад} = +2^\circ\text{C}$ . Коридор допустимых отклонений выходной величины от желаемого значения на рисунке обозначен штриховой линией. Как видно на рис. 1 замкнутая система с полиноми-

Тогда передаточная функция астатического полиномиального регулятора имеет вид:

альным регулятором является ковариантной с задающим воздействием, статическая ошибка отсутствует. Переходный процесс управления характеризуется наличием перерегулирования. Время регулирования  $tr \approx 4$  ч, что не превосходит заданного значения. Динамическая ошибка составляет  $0,46^\circ\text{C}$ . Это объясняется всплеском величины управляющего воздействия на начальном этапе переходного процесса регулирования, приводящим к «выбросу» управляемой переменной. Уменьшением величины среднегеометрического корня  $\Omega$  можно добиться монотонного аperiodического характера переходного процесса управления, однако при этом время регулирования увеличится.

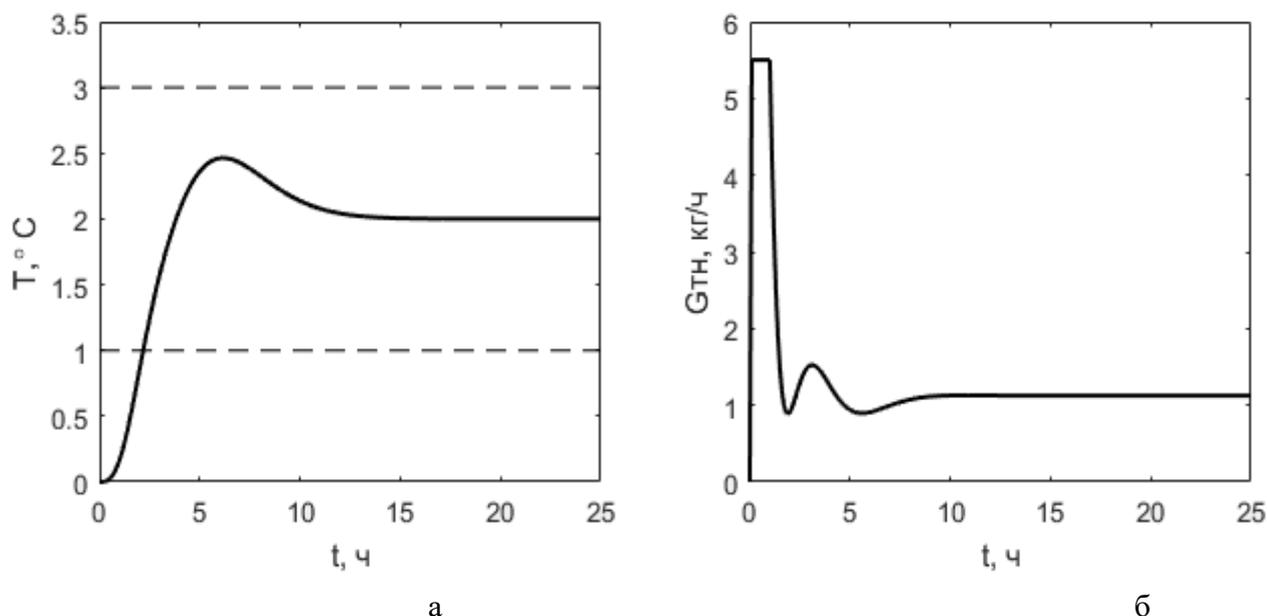


Рис. 2. Изменение выхода объекта (а) и управляющего воздействия (б) при смене задания регулятору  $\Delta t_{зад} = +2^\circ\text{C}$   
 Fig. 2. Change in the output of the object (a) and the control action (b) when changing the setting for the controller  $\Delta t_{set} = +2^\circ\text{C}$

Результаты исследования системы на инвариантность к действию внешнего возмущения (входная температура теплоносителя) приведены на рис. 3.

При моделировании математическая модель системы была дополнена уравнениями, отражающими действие возмущения на объект.

Как видно из рис. 3 при увеличении температуры теплоносителя, поступающего в рубашку обогрева, реактор-дополимеризатор выходит на новый стационарный режим. Замкнутая система с астатическим полиномиальным регулятором характеризуется наличием перерегулирования. Статическая ошибка отсутствует, однако наблюдается динамическая ошибкой величиной  $1,1^\circ\text{C}$ .

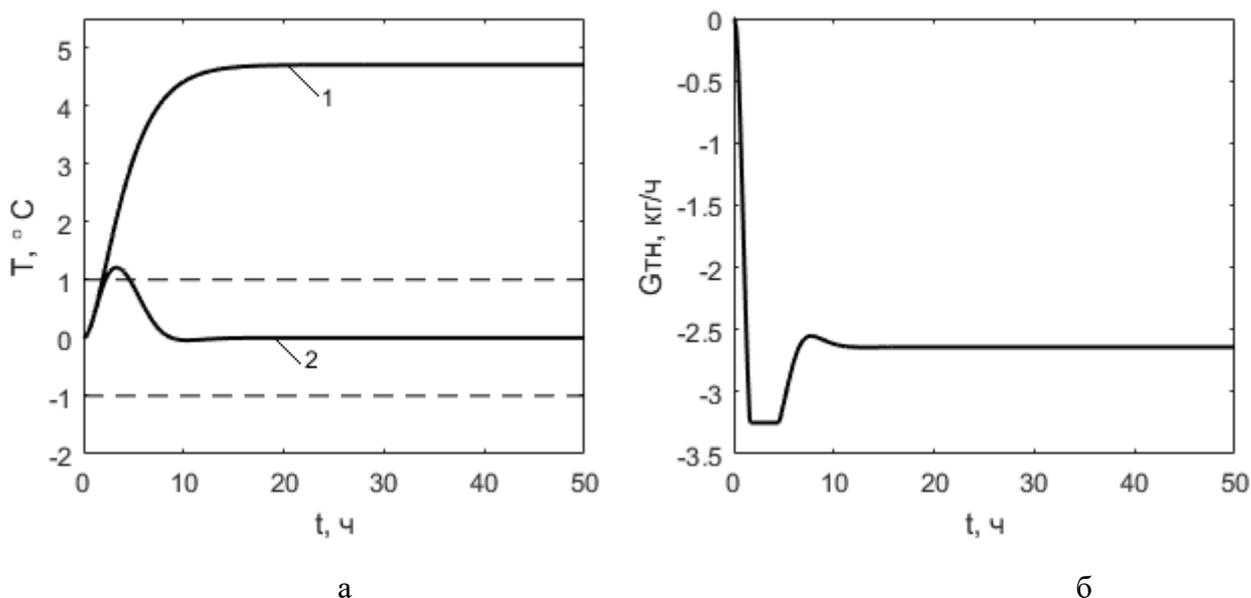


Рис. 3. Изменение выхода объекта (а) и управляющего воздействия (б) при действии внешнего возмущения  $\Delta t_{тн,вх} = + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1 – объект без регулятора; 2 – замкнутая система с полиномиальным регулятором  
 Fig. 3. Change in the output of the object (a) and control action (b) under the action of an external disturbance  $\Delta t_{f,in} = + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1 - object without a controller; 2 - closed system with polynomial controller

Таким образом, анализ результатов компьютерных моделирований позволяет сделать вывод о том, что предложенная система регулирования температуры гранул на выходе на базе полиномиального регулятора является инвариантной к действию возмущений и ковариантна с заданием.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для поддержания заданного значения температуры гранул на выходе из реактора-дополимеризатора в работе предложен алгоритм управления на базе полиномиального регулятора «входа-выхода». Исходя из требований к показателям качества и характеру переходного процесса

управления (время регулирования, статическая ошибка, динамическая ошибка) был проведён параметрический синтез регулятора. Методами компьютерного моделирования была проверена и подтверждена работоспособность и эффективность предложенной системы регулирования.

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

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

#### 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. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 368 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для студентов вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
4. Тютиков В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2006. 256 с.
5. Мизеровский Л.Н., Базаров Ю.М. Твердофазный синтез полиамида-6. *Химические волокна*. 2006. № 4. С. 40–48.

#### REFERENECES

1. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Borisov V.I., Dli M.I. Models of Energy Efficiency Management of Complex Chemical-Technological Systems. Smolensk: Universum, 2017. 204 p.
2. Ray U. Methods of control of technological processes. M.: Mir, 1983. 368 p.
3. Rotach V.Ya. Theory of automatic control: a textbook for university students. M.: MPEI Publishing House, 2008. 396 p.
4. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. Robust modal control of technological objects. Ivanovo: Ivanovo state. energy university im. IN AND. Lenina, 2006. 256 p.
5. Mizerovsky L.N., Bazarov Yu.M. Solid-phase synthesis of polyamide-6. *Chemical fibers*. 2006. N 4. P. 40–48.

6. **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.
7. **Титов Н.И., Успенский В.К.** Моделирование систем с запаздыванием. Л.: Энергия, 1969. 98 с.
8. **Лабутин А.Н., Алексеев 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. **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. **Пупков К.А., Егупов Н.Д.** 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. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
6. **Alekseev E.A., Golovushkin B.A., Labutin A.N., Erofeeva E.V.** Simulation of the process of obtaining polyamide-6. *Izv. universities. Chemistry and chem. technology*. 2015. V.58. Issue. 1. P. 65–68.
7. **Titov N.I., Uspensky V.K.** Modeling systems with delay. Leningrad: Energy, 1969. 98 p.
8. **Labutin A.N., Alekseev E.A.** Synthesis of temperature control algorithms in the solid-phase additional polyamidation reactor. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2021. N 3(67). P. 63–69. DOI:10.6060/snt.20216703.0009
9. **Apolonsky V.V., Tararykin S.V.** Methods for the synthesis of reduced state controllers of linear dynamic systems. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2014. N 6. P. 25–33.
10. **Pupkov K.A., Egupov N.D.** Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 5 vols.; 2nd ed., revised. and additional T.3: Synthesis of regulators of automatic control systems. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2004. 616 p.