

УДК 681.51

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ В УСТАНОВКЕ УТИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

С. Р. Шакиров, А. Г. Квашнин, А. В. Писарев

*Институт вычислительных технологий СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6  
E-mail: pisarev@tecon.ru*

Рассмотрен синтез адаптивной системы автоматического управления производительностью вихревой сушилки установки утилизации органических отходов. Представлено обоснование применения адаптивного регулятора для управления загрузкой сушилки влажным топливом.

*Ключевые слова:* моделирование адаптивной системы автоматического управления, алгоритм работы адаптивного регулятора, синтез контура управления процессом сушки, вихревая сушилка.

DOI: 10.15372/AUT20180516

**Введение.** В [1] были созданы и запатентованы способ и оборудование для переработки углеродосодержащих материалов. Для демонстрации промышленного применения разработанной технологии сконструирована и изготовлена опытно-промышленная установка, которая производит тепловую энергию и энергоносители из органических отходов с различным химическим составом, физическими свойствами и высокой влажностью [2].

Экспериментально показано, что производительность установки утилизации органических отходов определяется загрузкой вихревой сушилки влажным топливом. А степень загрузки вихревой сушилки обусловлена температурой сушильного агента (дымовых газов) на выходе из сушилки. Динамические характеристики температуры дымовых газов на выходе из сушилки являются нестационарными и зависят от ряда факторов: физико-химических свойств органического топлива, режима работы установки, температуры дымовых газов, поступающих на сушку, и пр.

Цель данного исследования — синтез адаптивного регулятора, позволяющего идентифицировать динамические характеристики объекта регулирования (ОР) и обеспечить требуемую по условиям протекания технологических процессов загрузку сушилки влажным топливом путём стабилизации температуры дымовых газов за сушилкой [3]. Экспериментально определено, что следует поддерживать температуру дымовых газов за сушилкой в диапазоне от 130 до 170 °С [4]. При снижении температуры происходит конденсация паров воды, содержащихся в сушильном агенте после сушки. Увеличение температуры дымовых газов за сушилкой влечёт за собой снижение ресурса работы дымососа установки и экономичности работы установки в целом.

**Определение динамических характеристик дымовых газов на выходе вихревой сушилки.** По результатам испытаний опытно-промышленного образца установки утилизации органических отходов [4, 5], изучения его технологической схемы и особенностей режимов функционирования создана математическая модель вихревой сушилки. По каналу «задание частоты вращения частотно-регулируемому преобразователю (ЧРП) сушилки  $\omega_{\text{ЧРП}}^3$  — температура дымовых газов на выходе из сушилки (перед дымососом)

$t_{г. ДС}$ » математическая модель представлена передаточной функцией ОР  $W_{ОР}(s)$  вида

$$W_{ОР}(s) = \frac{k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} k_M k_{ШП}}{T_{ЧРП} T_M T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} s^3 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} k_M k_{ШП}}{(T_{ЧРП} T_M + T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} (T_{ЧРП} + T_M)) s^2 + (T_{ЧРП} + T_M + T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}) s + 1}, \quad (1)$$

где  $s$  – оператор Лапласа;  $T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  (с) — постоянная времени передаточной функции по каналу «расход топлива на сушку — температура дымовых газов на выходе из сушилки»;  $k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  (°С/кг) — коэффициент усиления передаточной функции по каналу «расход топлива на сушку — температура дымовых газов на выходе из сушилки»;  $k_{ШП}$  (кг) — коэффициент усиления передаточной функции шнекового питателя (ШП) вихревой сушилки по каналу «частота вращения шнека — расход влажного топлива»;  $k_M$  — коэффициент передачи редуктора привода ШП;  $T_M$  (с) — обобщённая постоянная времени элементов механической системы привода ШП;  $T_{ЧРП}$  (с) — постоянная времени ЧРП электропривода ШП.

Коэффициент усиления  $k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  и постоянная времени  $T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  передаточной функции (1) изменяются в зависимости от значений параметров  $x_1$  (исходная влажность топлива (%)),  $x_2$  (влажность топлива после сушки (%)),  $\Theta_1$  (температура влажного топлива на входе в сушилку (°С)),  $\Theta_2$  (температура влажного топлива на выходе из сушилки (°С)) [6]. Для разных режимов работы установки, её нагрузок и видов топлив  $k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  и  $T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  изменяются в диапазонах

$$400 = k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}^{(-)} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}^{(+)} = 6 \cdot 10^3, \quad (2)$$

$$4 = T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}^{(-)} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}^{(+)} = 12. \quad (3)$$

В процессе работы установки возмущения по каналам  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $G_1$  (расход влажного топлива на сушку (кг/с)) являются неконтролируемыми.

Коэффициент  $k_{ШП}$  зависит от насыпной плотности подаваемых топлив или их смеси [7]. Определено экспериментально, что насыпная плотность неконтролируемо изменяется в процессе работы установки, что, в свою очередь, приводит к неконтролируемому изменению коэффициента  $k_{ШП}$  в диапазоне

$$2 = k_{ШП}^{(-)} \leq k_{ШП} \leq k_{ШП}^{(+)} = 4,2. \quad (4)$$

В связи с этим возникает потребность синтеза адаптивного регулятора — стабилизатора температуры дымовых газов за сушилкой.

Для опытно-промышленного образца установки принимаем числовые значения других параметров, входящих в передаточную функцию (1):  $k_M = 0,03$ ,  $T_M = 0,3$  с,  $T_{ЧРП} = 2$  с [7].

**Синтез контура управления производительностью вихревой сушилки.** Управление производительностью вихревой сушилки осуществляется автоматической системой регулирования, которая выполняет задачу стабилизации температуры дымовых газов на выходе сушилки  $t_{г. ДС}$  [8].

Динамические характеристики ОР (1) существенно зависят от режима работы установки, точно неизвестны (априорно определены по результатам моделирования) и нестационарны, учёт их изменений невозможен. Это обуславливает применение адаптивных

алгоритмов управления производительностью вихревой сушилки. Недопустимость вывода объекта регулирования на границу устойчивости, невозможность подачи тестовых ступенчатых или импульсных воздействий по технологическим причинам определяют выбор типа адаптивного алгоритма управления. Для решения задачи синтеза адаптивной системы в классе беспойсковых самонастраивающихся систем применяется подход, базирующийся на декомпозиции системы. При этом выделяются задачи синтеза основного контура (ОК) и контура адаптации. Решая задачу синтеза ОК при выбранном критерии качества, можно определить желаемые законы настройки корректирующего устройства (КУ) [9]. Синтез адаптивной системы выполнен без использования производных от регулируемого параметра. Для этого в контуре адаптации применено адаптивное наблюдающее устройство [10, 11] (алгоритм идентификации с неявной настраиваемой моделью).

В процессе работы выполнен синтез КУ автоматической системы управления производительностью сушилки. Желаемый вид переходного процесса задан характеристическим полиномом [10]

$$H(s) = s^3 + \sigma_1 s^2 + \sigma_2 s + \sigma_3 = s^3 + 10s^2 + 18s + 16 = 0. \quad (5)$$

Матричная форма записи передаточной функции ОР (1) [10] имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{t}_{г. ДС} \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 1 \\ a_2 & -\lambda_2 & 0 \\ a_3 & 0 & -\lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{г. ДС} \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} G_1, \quad (6)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}. \quad (7)$$

Здесь

$$a_1 = \lambda_2 + \lambda_3 - T_1, \quad T_1 = \frac{T_{ЧРП} T_M + T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}} (T_M + T_{ЧРП})}{T_{ЧРП} T_M T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}};$$

$$a_2 = \frac{\lambda_2^3 - T_1 \lambda_2^2 - T_3 + T_2 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2}, \quad T_2 = \frac{T_{ЧРП} + T_M + T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}}{T_{ЧРП} T_M T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}}, \quad T_3 = \frac{1}{T_{ЧРП} T_M T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}};$$

$$a_3 = \frac{T_3 - \lambda_3^3 - T_2 \lambda_3 + T_1 \lambda_3^2}{\lambda_3 - \lambda_2},$$

$$b_1 = 0; \quad b_2 = \frac{k_1}{\lambda_3 - \lambda_2}, \quad k_1 = \frac{k_M k_{ШП} k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}}{T_{ЧРП} T_M T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}}; \quad b_3 = -b_2.$$

Рассматривая вектор состояния  $\mathbf{X}$  как выход, а скалярный сигнал  $G_1$  как вход ОР и учитывая уравнения (6), (7), запишем передаточную функцию ОР (1) в виде [10]

$$W_{ОР}(s) = (sI - A)^{-1} b = g(s)/F(s).$$

Характеристическое уравнение корректирующего контура имеет вид

$$F(s) + pg(s) = 0, \quad (8)$$

где  $p = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \end{bmatrix}$  — матрица КУ.

Из уравнений (5) и (8) получим

$$pg(s) = H(s) - F(s). \quad (9)$$

По формуле (9) найдём выражения для расчёта параметров настройки КУ регулятора производительности сушилки:

$$p_1 = \frac{T_1\sigma_1 - \sigma_2}{T_3k_1}, \quad p_2 = \frac{T_2\sigma_1 - \sigma_3}{T_3k_1}, \quad p_3 = \frac{\sigma_1}{k_1}, \quad T_1 = \lambda_2 + \lambda_3 - a_1,$$

$$T_2 = \lambda_2\lambda_3 - a_1(\lambda_2 + \lambda_3) - a_2 - a_3, \quad T_3 = -(a_1\lambda_2\lambda_3 + a_2\lambda_3 + a_3\lambda_2), \quad k_1 = b_2(\lambda_3 - \lambda_2).$$

Определение параметров настройки корректирующего устройства осуществляется в вычислительном устройстве (рис. 1). Константы  $\lambda_2, \lambda_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  известны. Параметры ОР  $a_1, a_2, a_3, b_2, b_3$ , как и сигналы  $x_2, x_3$ , формируются наблюдающим устройством. Таким образом, уравнение КУ (см. рис. 1) имеет вид [10]

$$u = (\hat{p}_4/s)\varepsilon_{КУ} - \hat{p}_1y - \hat{p}_2\hat{x}_2 - \hat{p}_3\hat{x}_3 + u_3(t), \quad (10)$$

где  $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3$  определяются при замене  $a_1, a_2, a_3, b_2, b_3$  оценками  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{b}_2, \hat{b}_3$ , снимаемыми с наблюдающего устройства;  $\varepsilon_{КУ} = t_{г.ДС}^3 - t_{г.ДС}$  (°C) — рассогласование на входе КУ

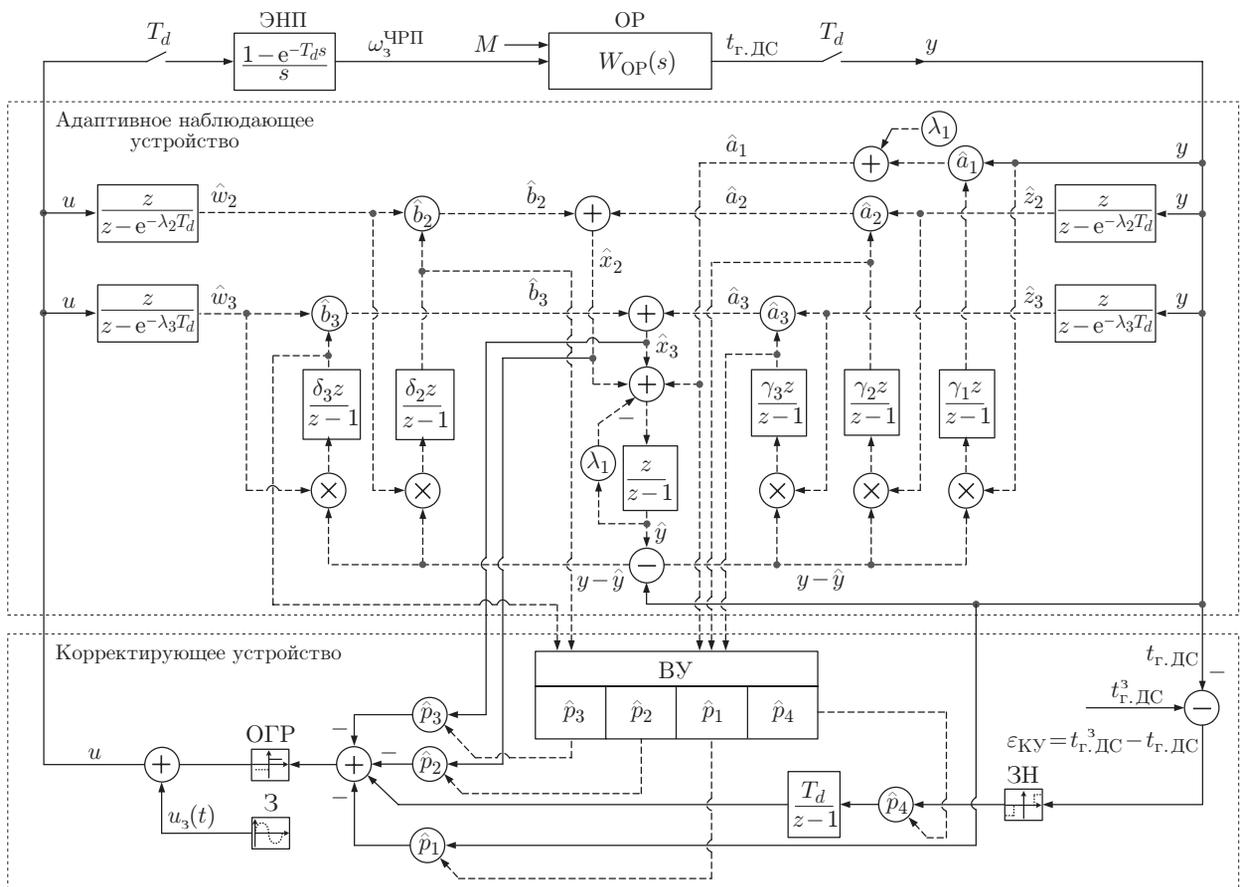


Рис. 1. Структурная схема регулятора производительности сушилки для цифровой формы реализации [12]: ЭНП — экстраполятор нулевого порядка; ВУ — вычислительное устройство; ЗН — зона нечувствительности; З — сигнал задающего воздействия для идентификации параметров ОР; ОГР — ограничение задающего воздействия;  $M$  — возмущение;  $T_d$  (с) — время дискретизации

( $t_{г.ДС}^3$  (°C) — задание температуры дымовых газов на выходе вихревой сушилки (перед дымососом));  $u_3(t)$  (кг/с) — сигнал задающего воздействия для инициирования процессов идентификации параметров ОР (см. рис. 1).

Для выполнения требования нулевой статической ошибки при протекании переходных процессов в замкнутом контуре регулятора производительности сушилки в алгоритм КУ (10) вводится интегратор [13] с коэффициентом усиления  $p_4$ .

В процессе работы проведён синтез адаптивного наблюдателя для контура адаптации регулятора производительности сушилки. Адаптивное наблюдающее устройство предназначено для идентификации параметров ОР (при недостаточной текущей информации о его состоянии) и оценивания его состояния (при недостаточной априорной информации о его параметрах) [9]. Для инициирования процессов идентификации параметров ОР в систему введён сигнал задающего воздействия [11]

$$u_3(t) = \frac{1}{k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}} k_M k_{ШП}} (\sin(t) + \sin(5t) + \sin(11t)). \quad (11)$$

Исключение влияния контура адаптации на основной контур осуществляется введением зоны нечувствительности  $\pm(2-3$  °C) для КУ (10). Алгоритм определения величины зоны нечувствительности приведён в [3].

Величина задающего воздействия  $u_3(t)$  автоматически корректируется в процессе работы за счёт введения в формулу (11) оценок коэффициентов  $k_{ШП}$ ,  $k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$  и  $k_M$  передаточной функции (1) так, чтобы  $u_3(t)$  не превышало зону нечувствительности и было достаточным для работы адаптивного наблюдателя [9]. Сигнал  $u_3(t)$  приводит к изменению  $t_{г.ДС}$  на  $\pm 1$  °C.

Уравнения, описывающие адаптивное наблюдающее устройство, имеют вид алгоритмов скоростного градиента [9, 10]. Коэффициенты усиления  $\gamma_i$  и  $\delta_i$  цепей адаптации определяют скорость идентификации параметров  $\hat{a}_i$  и  $\hat{b}_i$ . Для нашей системы управления выбраны коэффициенты  $\gamma_i$  и  $\delta_i$  [11]:  $\gamma_1 = 500$ ,  $\gamma_2 = 200$ ,  $\gamma_3 = 80$ ,  $\delta_2 = 10$ ,  $\delta_3 = 10$ . При этом  $\lambda_1 = 100$ ,  $\lambda_2 = 3$ ,  $\lambda_3 = 6$ .

В процессе исследования выполнено моделирование регулятора производительности сушилки. Осуществлена проверка его работоспособности при изменении  $t_{г.ДС}^3$  и при максимальном ступенчатом возмущении, вызванном резким изменением характеристик топлива, подаваемого в сушилку опытно-промышленного образца установки. Полученные переходные процессы представлены на рис. 2. Изменение температуры дымовых газов за сушилкой  $t_{г.ДС}$  при ступенчатом изменении задания  $t_{г.ДС}^3$  со 150 до 160 °C в момент времени  $t = 5$  с показано на рис. 2, а. Переходные процессы 1, 2, 3 получены соответственно для минимальных, средних и максимальных значений параметров ОР  $k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $k_{ШП}$  (неравенства (2)–(4)). На рис. 2, б продемонстрировано изменение температуры дымовых газов за сушилкой  $t_{г.ДС}$  при ступенчатом изменении в момент времени  $t = 5$  с параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $k_{ШП}$  с их минимальных значений на максимальные, а в момент времени  $t = 85$  с — с их максимальных значений на минимальные.

Из рис. 2 видно, что переходные процессы в замкнутом контуре регулятора производительности сушилки устойчивы. Регулятор с нулевой статической ошибкой отрабатывает изменение  $t_{г.ДС}^3$  и действие возмущений. В обоих случаях переходные процессы в системе являются апериодическими. Длительности переходных процессов при изменении  $t_{г.ДС}^3$  для минимальных, средних, максимальных значений параметров ОР  $k_{ШП}$ ,  $k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$  составили 8, 20, 35 с соответственно. При изменении параметров ОР  $k_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{г.ДС}}$ ,  $k_{ШП}$  с их минимальных значений на максимальные отклонение регулируемо-

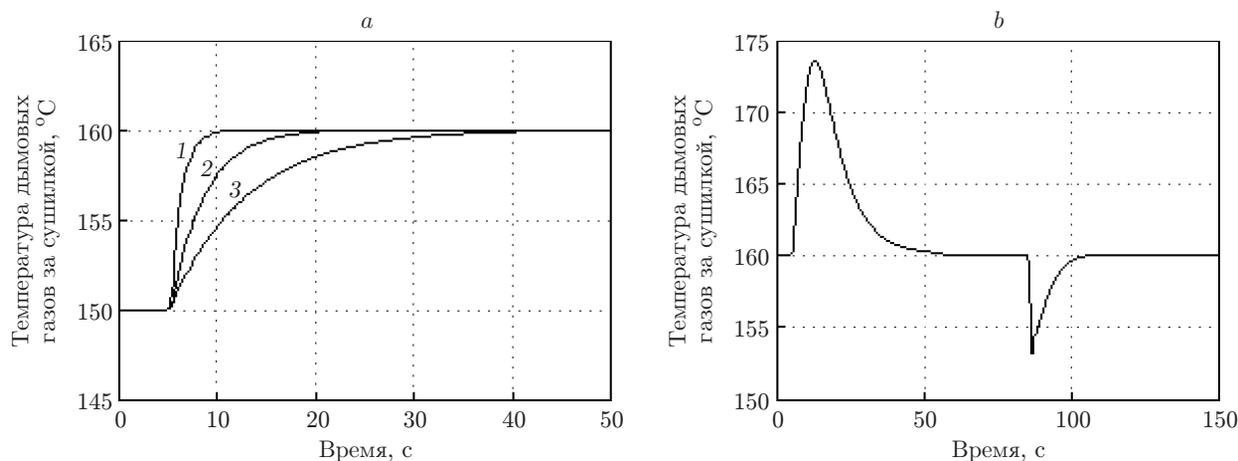


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутом контуре регулятора производительности сушилки, полученные при моделировании

го параметра  $t_{г. ДС}$  от задания составило  $1,3\epsilon_{КУ}$  и длительность переходного процесса — 50 с, при изменениях с максимальных значений на минимальные соответственно —  $0,7\epsilon_{КУ}$  и 20 с (на рис. 2, *b* графики показаны для  $\epsilon_{КУ} = 10^\circ\text{C}$ ). Длительность переходных процессов и максимальные отклонения регулируемой величины от задания при параметрических возмущениях определяются величиной изменений параметров ОР  $a_1, a_2, a_3, b_2, b_3$  и скоростью их идентификации. На практике по результатам испытаний [4, 5] установлено, что изменения этих параметров происходят с меньшей скоростью и величиной, что будет приводить к отклонению регулируемого параметра  $t_{г. ДС}$  от задания на меньшие величины, чем на рис. 2, *b*.

**Заключение.** Показаны нестационарность, существенная зависимость от режима работы установки, априорная неопределённость и невозможность учёта изменений динамических характеристик ОР (1), что обуславливает необходимость применения адаптивного алгоритма управления. В контуре самонастройки регулятора используется адаптивный наблюдатель с настраиваемой моделью, с помощью которой определяются параметры ОР и восстанавливаются его переменные состояния. Замкнутую систему можно рассматривать как самонастраивающуюся на заданное протекание переходного процесса. Моделирование выполнено для цифровой формы реализации КУ регулятора производительности сушилки.

Представлена реализация адаптивного алгоритма функционирования регулятора производительности, который обеспечивает работоспособность замкнутого контура регулирования производительности сушилки для рассмотренных воздействий по заданию и возмущению. По результатам моделирования определено, что максимальное изменение параметров ОР  $k_{ШП}, k_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}, T_{G_1 \rightarrow t_{г. ДС}}$  приводит к незначительному отклонению значения регулируемого параметра от задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2364451 РФ. Универсальный способ переработки материалов в секционном аппарате барабанного типа с проходными отверстиями в перегородках между секциями и устройство для его осуществления /С. Ю. Вильчек. Опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
2. Вильчек С. Ю., Гаркуша В. В., Квашнин А. Г. и др. Компоненты автоматизированной системы управления процессами переработки биомассы в тепло и энергоносители во вращающемся термохимическом реакторе // Вычислительные технологии. 2013. 18, Спец. вып. С. 145–149.

3. **Jumah R. Y., Mujumdar A. S., Raghavan V. G. S.** Control of Industrial Dryers. Handbook of Industrial Drying. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. P. 1161–1179.
4. **Гаркуша В. В., Квашнин А. Г., Мишнев А. С. и др.** Контроль и корректировка работы автоматизированной системы управления технологическими процессами во время высокотемпературных испытаний: Отчёт о выполнении НИОКР /КТИ ВТ СО РАН; Рег. № НИОКР 115120210006. Новосибирск, 2016. 60 с. URL: <https://rosrid.ru/ikrbs/downloadFullText/OA5QAF74AHCFDCNPIONYNETE> (дата обращения: 02.04.2018).
5. **Вильчек С. Ю., Квашнин А. Г., Сафронов А. В., Сторожев Ф. Н.** Проблемы создания адаптивной системы управления энергетическим комплексом по переработке углеродосодержащих отходов // Индустриальные информационные системы (ИИС-2015): Сб. тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием. Новосибирск: КТИ ВТ СО РАН, 2015. С. 15–16.
6. **Лебедев В. В.** Сушка зернистых материалов в аппарате с модифицированным вихревым слоем: Дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2007. 121 с.
7. **Шадрин Г. К., Аринова Н. В.** Математическая модель процесса дозирования компонентов силикатной смеси // Вестн. ВКГТУ. Сер. Технические науки. 2009. № 3. С. 96–102.
8. **Sharma K. R.** Continuous Process Dynamics, Stability, Control & Automation. N. Y.: Nova Science Publishers Inc., 2015. 511 p.
9. **Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. С.-Пб.: Наука, 1999. 467 с.
10. **Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления** /Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 744 с.
11. **Александров А. Г.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш. шк., 1989. 263 с.
12. **Чостковский Б. К., Митрошин В. Н.** Автоматизация процесса экструзии пористой кабельной продукции на основе цифрового регулятора // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 74–83.
13. **Востриков А. С., Французова Г. А.** Теория автоматического регулирования. М.: Высш. шк., 2004. 365 с.

*Поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.*