

АДАПТИВНАЯ НАСТРОЙКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

С. В. БЫСТРОВ¹, В. В. ГРИГОРЬЕВ¹, О. К. МАНСУРОВА²,
И. М. ПЕРШИН³, М. И. ПЕРШИН⁴

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: grigvv@yandex.ru

²Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, Россия

³Филиал Северо-Кавказского федерального университета, 357501, Пятигорск, Россия

⁴Южный федеральный университет, 344006, Ростов-на-Дону, Россия

Рассмотрены процедура синтеза системы управления температурным полем коаксиальной нагревательной камеры и методика адаптивной настройки распределенного регулятора, спроектированного с помощью набора нестандартных аппроксимирующих звеньев. Используется принцип модульного построения нагревательной камеры. Рассматриваемая адаптивная настройка реализована в программном продукте и может быть использована для построения распределенных систем управления сложными распределенными процессами различной физической природы.

Ключевые слова: *распределенная система управления, нагревательная камера, нестандартные аппроксимирующие звенья, распределенный регулятор*

Введение. Постановка задачи. Использование принципа модульного построения нагревательных камер позволяет сформировать камеру непосредственно для заданного технологического процесса. При этом число модулей, из которых формируется нагревательная камера, зависит от требуемой точности реализации рассматриваемого технологического процесса по пространственным координатам. Модули (крышки и секции), из которых может быть сформирована коаксиальная нагревательная камера, показаны на рис. 1. Чем больше число используемых секционных нагревателей, тем точнее может быть реализовано заданное температурное поле по длине камеры.

Задача, рассматриваемая в настоящей статье, заключается в разработке математической модели распределенного объекта управления, в качестве которого рассматривается печь для термической обработки заготовок. Для системы управления указанным объектом требуется синтезировать распределенный регулятор, реализующий пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления.

Математическая модель объекта управления. Общая структурная схема рассматриваемой коаксиальной камеры приведена на рис. 2. В структурную схему включен блок адаптивной настройки параметров распределенного регулятора, который в реальных системах реализуется с использованием микропроцессорной техники.

При термической обработке заготовки, перемещающейся по длине нагревательной камеры с заданной скоростью, диаметр заготовки R_3 может изменяться. При изменении диамет-

ра заготовки требуется настройка регулятора на новый технологический режим. Распределенная система управления (СУ) работает следующим образом: рассогласование между заданным режимом обработки заготовки и текущим состоянием температурного поля (измеряемым с помощью пяти измерителей температуры) подается на вход регулятора. На выходе регулятора формируется управляющее воздействие (тепловой поток) на каждую из пяти секций нагревателя, которое может быть реализовано с помощью локальных систем управления, например, с использованием тиристорных регуляторов мощности.

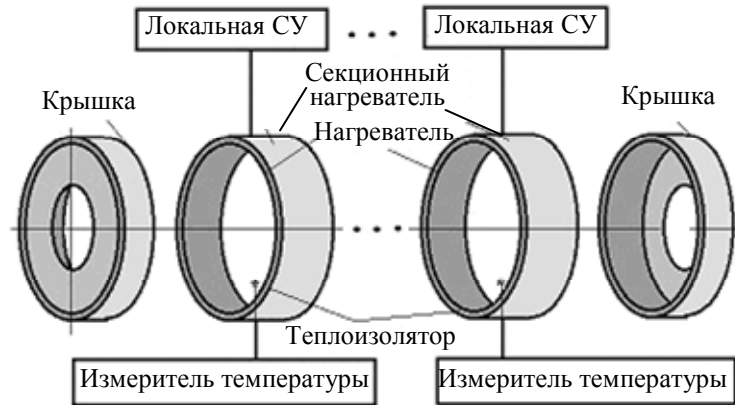


Рис. 1

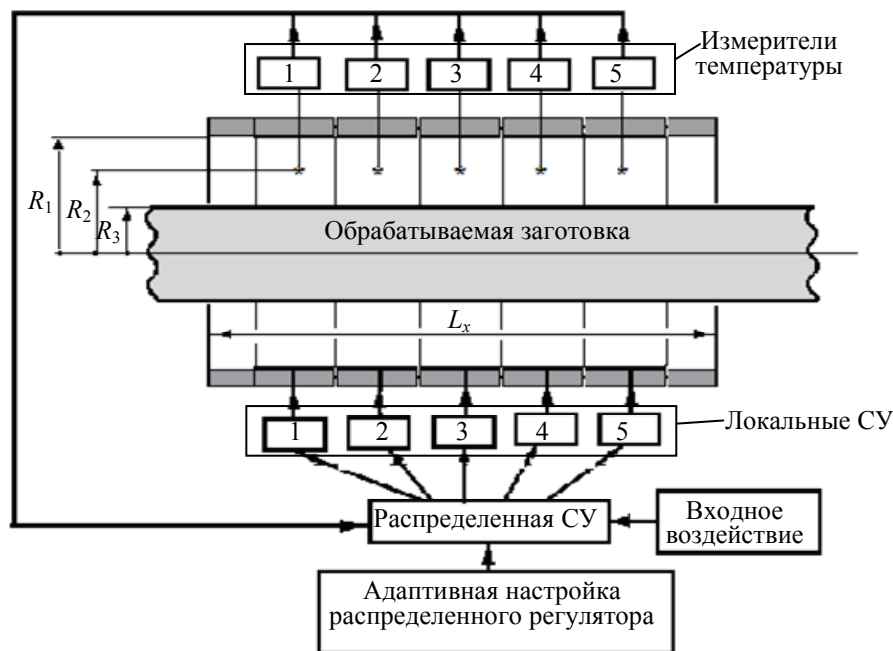


Рис. 2

Для составления математической модели рассматриваемого объекта управления введем следующие допущения:

- входное воздействие (тепловой поток) реализуется с помощью секционных нагревателей;
- датчики измерения температуры расположены внутри печи (см. рис. 1, 2);
- боковая поверхность нагревательной камеры теплоизолирована;
- температура стенок крышек поддерживается постоянной;
- скорость движения заготовок не учитывается из-за ее малости (0,016 м/ч).

С учетом принятых допущений математическая модель нагревательной камеры имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T_1(x, r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1(x, r, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(x, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(x, r, \tau)}{\partial r^2} \right),$$

$$R_3 < r < R_1, \quad 0 < x < L_x;$$

$$\frac{\partial T_2(x, r, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2(x, r, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(x, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(x, r, \tau)}{\partial r^2} \right),$$

$$0 < r < R_3, \quad 0 < x < L_x,$$

где $T_1(x, r, \tau)$, $T_2(x, r, \tau)$ — температурное поле в зазоре между нагревателем и заготовкой соответственно; a_1 — коэффициент теплопроводности воздуха; a_2 — коэффициент теплопроводности материала заготовки; x, r — пространственные координаты; τ — время.

Граничные условия для объекта управления задаются соотношениями:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, R_3, \tau)}{\partial r} = Q(\dot{x}, \tau), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(x, R_3, \tau)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, R_3, \tau)}{\partial r};$$

$$T_1(x, R_3, \tau) = T_2(x, R_3, \tau), \quad \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad 0 < x < L_x;$$

$$T_1(0, r, \tau) = T_1(L_x, r, \tau) = 0, \quad R_1 < r < R_3;$$

$$T_2(0, r, \tau) = T_2(L_x, r, \tau) = 0, \quad 0 < r < R_3,$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности воздуха; λ_2 — коэффициент теплопроводности материала заготовки.

Начальные условия полагаются нулевыми.

Конструктивные параметры нагревательной камеры (см. рис. 2) следующие: $L = 0,6$ м, $R_1 = 0,15$ м, $R_2 = 0,1$ м, $R_3 = 0,05$ м. В дальнейших расчетах использованы следующие теплофизические параметры: $a_1 = 0,000004$ м²/с; $a_2 = 0,000019$ м²/с; $\lambda_1 = 0,059$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 2,14$ Вт/(м·К).

Синтез системы управления. Процедура синтеза системы управления распределенным объектом управления включает следующие этапы (рис. 3).



Рис. 3

1. Для заданного объекта, у которого распределенное входное воздействие реализуется с помощью n дискретных воздействий (в рассматриваемом случае таких воздействий 5), а распределенная функция выхода измеряется с помощью n датчиков (в рассматриваемом случае пяти датчиков), определяются матрица комплексных передаточных функций объекта управления (при этом объект рассматривается как многомерный сосредоточенный), ее собственные значения и собственные векторы (статические коэффициенты передачи). Если собственные вектора передаточной матрицы представляются дискретными аналогами пространственных мод, то распределенный объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных [1, 2].

2. Определяются реакция распределенного объекта на выбранные пространственные моды и статические коэффициенты передачи по выбранным пространственным модам, а также сдвиг по фазе для первой пространственной моды (f).

3. С использованием данных, полученных в п.2, определяются параметры аппроксимирующего звена.

4. Осуществляется синтез распределенного регулятора с использованием частотной методики синтеза.

5. Производится анализ замкнутой системы управления.

Применительно к рассматриваемому объекту (см. рис. 2) процедура синтеза системы управления может быть представлена следующим образом.

1. В работах [1, 2] получена дискретная форма записи условия пространственной инвариантности объекта управления. Пусть задана матрица комплексных передаточных коэффициентов объекта, связывающая ξ -й вход с m -м выходом (объект рассматривается как многомерный сосредоточенный):

$$W(j\omega) = [W_{m,\xi}], \quad m, \xi = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Рассматриваемая матрица может быть получена с использованием либо результатов экспериментальных исследований объекта управления, либо численной модели объекта управления.

Поскольку выше описана математическая модель объекта управления, для которой решение, при квазистационарном входном воздействии, распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта, то рассматриваемые собственные вектор-функции в соответствии с граничными условиями могут быть представлены как $\sin(\Psi_i x)$, где $\Psi_i = \pi i / L_x$, i — номер пространственной моды [3, 4]. В работе [1] приведено аналитическое исследование цилиндрической камеры, аналогичной рассматриваемой (см. рис. 2), и показано, что данный объект управления принадлежит к классу пространственно-инвариантных.

2. Представим входное воздействие на объект управления выражением

$$Q(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} Q_i, \quad Q_i = A_i \cdot \sin(\Psi_i \cdot x),$$

где A_i — амплитуда.

Используя математическую модель объекта управления, составим численную модель и определим реакцию объекта на выбранные пространственные моды:

$$Q_1(x, \tau) = 100 \cdot \sin(\Psi_1 \cdot x), \quad Q_2(x, \tau) = 100 \cdot \sin(\Psi_3 \cdot x), \quad Q_3(x, \tau) = 100 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\Psi_1 \cdot x).$$

По результатам численных исследований объекта управления построены графики изменения выходной переменной (T) в точке расположения третьего датчика (рис. 4).

По результатам вычислений определим статические коэффициенты передачи по выбранным пространственным модам: $K_1 = 328,3/100 = 3,283$, $K_3 = -74,27/(-100) = 0,7427$, а также сдвиг по фазе для первой пространственной моды: $f = -2\pi \cdot 21,87/104,79 = -1,311$.

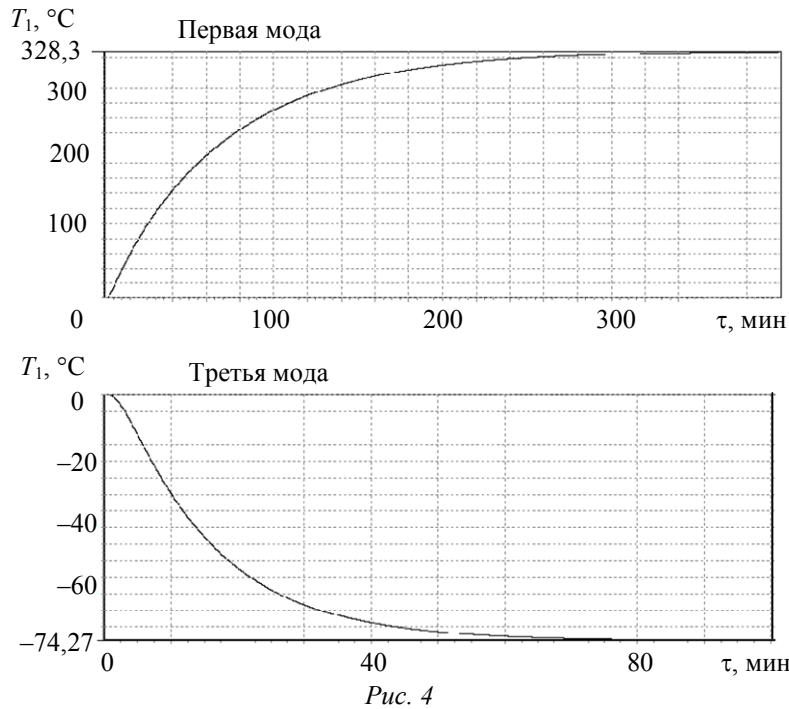


Рис. 4

3. Определим параметры аппроксимирующего звена. Структура и методика определения параметров нестандартных аппроксимирующих звеньев для объектов с распределенными параметрами приведены в работах [5, 6]. Показано, что нестандартные аппроксимирующие звенья наиболее точно описывают динамические характеристики рассматриваемых объектов. Для исследуемого объекта передаточная функция нестандартного аппроксимирующего звена имеет вид

$$W_{a,i}(s) = \frac{k}{\beta_i} \cdot \exp(-\beta_i \Delta z), \quad \beta_i = \left(\frac{s}{\alpha} + \Psi_i^2 \right)^{1/2}, \quad i = \overline{1, \infty}, \quad (2)$$

где s — оператор Лапласа; k , Δz , α — параметры аппроксимирующего звена.

Методика определения параметров содержит следующие этапы.

А. Определим значения k и Δz для рассматриваемого аппроксимирующего звена. Приравняв статический коэффициент передачи звена (1) ($s \rightarrow 0$) к статическим коэффициентам передачи по выбранным пространственным модам ($K_1=3,283$, $K_3=0,7427$), получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{k}{\beta_{1,1}} \cdot \exp(-\beta_{1,1} \Delta z); \\ K_3 &= \frac{k}{\beta_{3,2}} \cdot \exp(-\beta_{3,2} \Delta z), \end{aligned} \right\}$$

где $\beta_1 = (\Psi_1^2)^{1/2}$, $\beta_3 = (\Psi_3^2)^{1/2}$.

Преобразуя, получаем

$$\left. \begin{aligned} K_1 \cdot \beta_1 &= k \cdot \exp(-\beta_1 \Delta z), \\ K_3 \cdot \beta_3 &= k \cdot \exp(-\beta_3 \Delta z). \end{aligned} \right\}$$

Поделив второе уравнение последней системы на первое, придем к следующему результату:

$$\Delta z = \frac{\ln(K_3 \cdot \beta_3 / (K_1 \cdot \beta_1))}{-\beta_3 + \beta_1},$$

а подставив вычисленное значение Δz в первое уравнение системы, в результате преобразования получим

$$k = K_1 \cdot \beta_1 / \exp(-\beta_1 \Delta z).$$

Б. Определим значение параметра α , для чего воспользуемся вычисленным значением $f = -1,311$. Запишем передаточную функцию аппроксимирующего звена по первой пространственной моде:

$$W_{a,1}(s) = \frac{k}{\beta_1} \cdot \exp(-\beta_1 \Delta z), \quad \beta_1 = \left(\frac{s}{\alpha} + \Psi_1^2 \right)^{1/2}.$$

Полагая $s = j\omega$ ($\omega = \omega_1$), запишем соотношение для определения фазы аппроксимирующей функции

$$\varphi = -\Delta z \cdot \text{Im}(\beta_1) - \arctg(\omega / (\alpha \cdot (\Psi_1^2))).$$

Вычислим значение параметра α , для которого выполняется условие $\varphi = f$. По результатам вычислений построен график, приведенный на рис. 5.

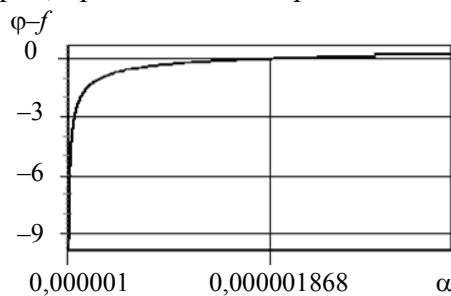


Рис. 5

Таким образом, согласно приведенному алгоритму, передаточная функция нестандартного аппроксимирующего звена для рассматриваемого распределенного объекта имеет следующий вид:

$$W_{a,i}(s) = \frac{20,8659}{\beta_i} \cdot \exp(-\beta_i \cdot 0.037), \quad \beta_i = \left(\frac{s}{0,000001868} + \Psi_i^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

4. Рассмотрим процесс синтеза распределенного регулятора. Особенности систем с распределенными параметрами приведены в работах [7—11]. В работах [1, 2] представлен специальный набор распределенных звеньев, из которых формируются структуры распределенных регуляторов; аналогично сосредоточенным системам сформирована структура распределенного регулятора, реализующего пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления. Передаточная функция такого регулятора для рассматриваемой системы управления (сформированная из пространственно-усилительного, пространственно-интегрирующего и пространственно-дифференцирующего звеньев) определяется выражением

$$W(x, s) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] s, \quad (4)$$

где E_γ , $\gamma = 1, 2, 4$, — общие коэффициенты усиления; ∇^2 — лапласиан; n_γ — весовые коэффициенты ($n_\gamma \geq 1$).

Значения E_γ и n_γ определяются в процессе синтеза распределенного регулятора. Записывая передаточную функцию (4) с использованием обобщенной координаты [1, 2], получаем

$$W(G_i, s) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_i \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G_i \right] \frac{1}{s} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} G_i \right] s, \quad G_i = \Psi_i^2.$$

При этом на запас устойчивости разомкнутой системы и на параметр Δ , компенсирующий параметрические возмущения объекта управления [2], наложены следующие ограничения: запас по фазе $\Delta\varphi(G_i) \geq \Delta\varphi_3$; параметр $\Delta = \Delta_3$, где $\Delta\varphi_3$, Δ_3 — заданные величины.

Методика синтеза рассматриваемого регулятора, приведенная в [2, 12, 13], включает следующие этапы.

1. Для двух выбранных пространственных мод ($G_1 = \Psi_1^2$ и $G_3 = \Psi_3^2$) определим желаемые точки среза модуля разомкнутой системы; при этом положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю [1, 12]:

$$-\pi + \Delta\varphi = \arctg \left[\frac{\operatorname{Im}(W(G_i, j\omega))}{\operatorname{Re}(W(G_i, j\omega))} \right], \quad (5)$$

где $W(G_i, j\omega)$ — комплексный передаточный коэффициент объекта управления (3).

Используя уравнение (5), для выбранных пространственных мод (например, G_1 и G_3) определим значения желаемых частот ω_1 , ω_3 среза модуля разомкнутой системы. Подставив в (5) $\Delta\varphi = \pi/4$ и с учетом выражения (3), получим

$$\omega_1 = 0,00767 \text{ с}^{-1}, \quad \omega_3 = 0,0083603 \text{ с}^{-1}.$$

2. Определим параметры пространственно-усилительного звена. Подставив $\omega = \omega_1$, $\omega = \omega_3$ в соотношение

$$M(G_i) = \left[(\operatorname{Im}(W(G_i, j\omega)))^2 + (\operatorname{Re}(W(G_i, j\omega)))^2 \right]^{1/2},$$

определим значения модуля объекта управления для выбранных пространственных мод. Так как ω_1 , ω_3 — частоты среза модуля разомкнутой системы, то коэффициенты усиления регулятора при этих частотах равны [1, 12, 13]

$$\bar{M}_1 = (M_1)^{-1}, \quad \bar{M}_3 = (M_3)^{-1},$$

а их вычисленные значения — $\bar{M}_1 = 14,13587$, $\bar{M}_3 = 16,5829$.

Для определения параметров E_1 , n_1 в работе [1] получена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_1 &= E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right], \\ \bar{M}_3 &= E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_3}{n_1} \right]. \end{aligned} \right\}$$

Поделив второе уравнение на первое, получим

$$n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1}, \quad \Delta M = \bar{M}_3 / \bar{M}_1,$$

при этом $n_1 \geq 1$ [2]. Подставляя вычисленное значение n_1 в первое уравнение и преобразуя, получаем

$$E_1 = \bar{M}_1 / \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right].$$

Таким образом,

$$E_1 = 13,841155; \quad n_1 = 1240,5665.$$

3. Определим параметры пространственно-интегрирующего и пространственно-дифференцирующего звеньев исходя из условия, что значения частот ω_1 , ω_3 принадлежат линии перегиба [1, 2]. Для этих частот фазовый сдвиг $\Delta\varphi = 0$. Подставив $\omega = \omega_1$, $\omega = \omega_3$ в уравнение линии перегиба, получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \lg \omega_1 &= 0,5 \lg \left(E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G_1}{n_4} \right] \right) - 0,5 \lg \left(E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G_1}{n_2} \right] \right), \\ \lg \omega_3 &= 0,5 \lg \left(E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G_3}{n_4} \right] \right) - 0,5 \lg \left(E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G_3}{n_2} \right] \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Добавим к системе уравнений (6) соотношения, описывающие взаимосвязь параметров регулятора с параметром Δ :

$$\Delta(G_1) = \lg \omega_1 - \lg \omega_2, \quad \lg \omega_1 = \lg(1/K_2(G_1)), \quad \lg \omega_2 = \lg(K_4(G_1)), \quad (7)$$

где $K_i(G) = E_i \left[\frac{n_i - 1}{n_i} + \frac{1}{n_i} G_i \right]$, $i = 2, 4$.

Посредством решения системы (6) совместно с (7) в работе [2] получены соотношения для вычисления параметров распределенного регулятора для рассматриваемого объекта управления (в данном случае $\Delta \omega^2 = \frac{\omega_3^2}{\omega_1^2} > 1$):

$$E_2 = \left(\frac{1}{((n_2 - 1)/n_2 + G_1/n_2)^2 \cdot 10^\Delta \cdot \omega_1^2} \right)^{0,5}, \quad E_4 = \left(\frac{\omega_1^2}{((n_4 - 1)/n_4 + G_1/n_4)^2 \cdot 10^\Delta} \right)^{0,5},$$

$$n_4 = (\Delta \omega^2 - 1 + G_3 - \Delta \omega^2 G_1) / (\Delta \omega^2 - 1), \quad n_2 \rightarrow \infty.$$

На основе приведенных соотношений вычислены значения параметров пространственно-интегрирующего и пространственно-дифференцирующего звеньев:

$$E_2 = 184,38; \quad n_2 \rightarrow \infty; \quad E_4 = 0,0106; \quad n_4 = 1139,58.$$

Полагая $(1240,5665 - 1)/1240,5665 \approx 1$ и $(1139,58 - 1)/1139,58 \approx 1$, передаточную функцию синтезированного регулятора можно представить как

$$W(x, s) = 13,841155 \left[1 - \frac{1}{1240,5665} \nabla^2 \right] + 0,0106 \left[1 - \frac{1}{1139,58} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 184,38s.$$

Моделирование работы замкнутой системы управления осуществлялось при следующих условиях: максимальное значение Q для каждой секции нагревателя равно 500 Вт, вначале система была выведена на заданный режим, соответствующий в точках установки термодпар температуре 200 °С, впоследствии входное воздействие скачкообразно изменено на 10 °С. По результатам моделирования построены графики переходных процессов в точках установки измерителей температуры (рис. 6) и на выходе локальных систем управления 1—5 (рис. 7).

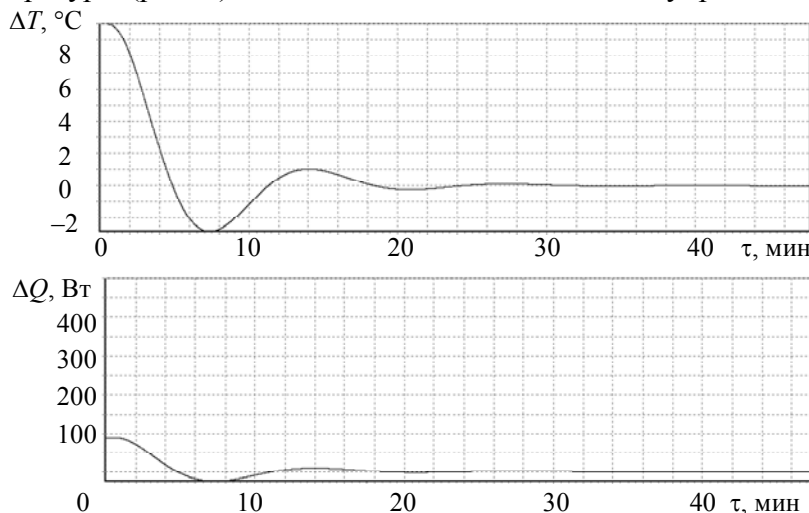


Рис. 6

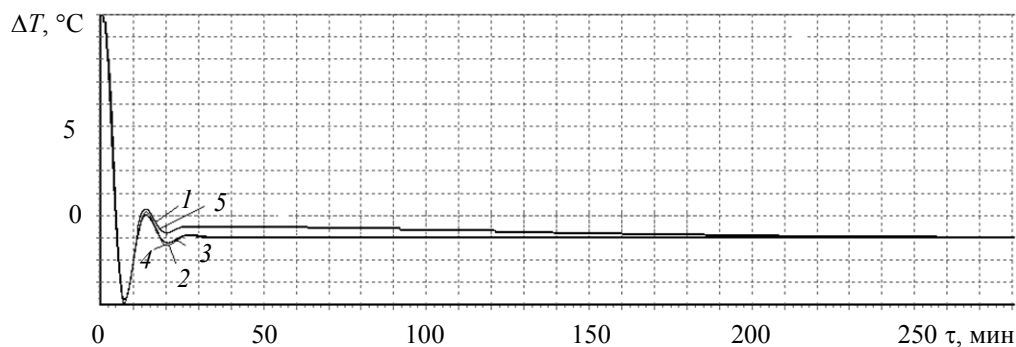


Рис. 7

Заключение. Разработана математическая модель коаксиальной нагревательной камеры, построенной по модульному принципу и состоящей из определенного числа секций. Предложена процедура синтеза распределенной системы управления температурным полем такого рода объектов. На конкретном примере показана методика синтеза распределенного регулятора с использованием специально разработанного набора нестандартных аппроксимирующих звеньев, реализующих различные законы управления (пропорциональный, пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный и др.). Численное моделирование системы распределенного управления нагревательной камерой с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором подтверждает работоспособность рассмотренного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во „РИА-КМВ“, 2007. 234 с.
2. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476 с.
3. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977. 320 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.
5. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. науч. тр. VII Всерос. науч. конф. 2015. С. 106—117.
6. Першин М. И. Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации // Современная наука и инновации. 2014. № 4(8). С. 46—50.
7. Першин М. И. Особенности распределенных объектов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. „Университетская наука — региону“. Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. Т. 1. С. 138—143.
8. Григорьев В. В., Быстров С. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Качественное распределение мод в системах с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 7. С. 12—18.
9. Григорьев В. В., Быстров С. В., Мансурова О. К., Першин И. М. Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 2—5.
10. Martirosyan A. V., Martirosyan K. V., Pershin I. M. Analysis of the Caucasus mineral waters' field's modeling // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, N 1. P. 204—210. (Published by Canadian Center of Science and Education.)
11. Chernyshev A. B., Martirosyan K. V. Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability // J. of Mathematics and Statistics. 2014. N 10 (3). P. 316—321.
12. Быстров С. В., Григорьев В. В., Першин И. М., Мансурова О. К., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидротермическими процессами // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 869—874.

13. Веселов Г. Е., Першин М. И. Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами // Изв. вузов. Геология и разведка. 2016. № 1. С. 99—105.

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Быстров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: sbystrov@mail.ru
- Валерий Владимирович Григорьев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: grigvv@yandex.ru
- Ольга Карибековна Мансурова** — канд. техн. наук, доцент; Горный университет; кафедра автоматизации технологических процессов и производств; E-mail: erke7@mail.ru
- Иван Митрофанович Першин** — д-р техн. наук, профессор; Филиал Северо-Кавказского федерального университета; E-mail: ivmp@yandex.ru
- Максим Иванович Першин** — аспирант; Южный федеральный университет; E-mail: Pershinmaksim1992@yandex.ru

Поступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Адаптивная настройка распределенных регуляторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 814—824.

ADAPTIVE ADJUSTMENT OF DISTRIBUTED REGULATORS

**S. V. Bystrov¹, V. V. Grigoriev¹, O. K. Mansurova²,
I. M. Pershin³, M. I. Pershin⁴**

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: grigvv@yandex.ru

²St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia

³Branch of North Caucasus Federal University,
357501, Pyatigorsk, Russia

⁴Southern Federal University, 344006, Rostov-on-Don, Russia

A procedure of synthesis of a control system of the temperature field in a coaxial heating chamber is described and a method of adaptive adjustment of the distributed controller designed with the use of non-standard approximating links is presented. The method employs the principle of modular construction of the heating chamber. The adaptive tuning is implemented as the software product and can be used in design of distributed control systems for complex distributed processes of various physical nature.

Keywords: distributed control system, heating chamber, non-standard approximating links, distributed controller

REFERENCES

- Pershin I.M. *Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami* (Analysis and Synthesis of Systems with Distributed Parameters), Pyatigorsk, 2007, 234 p. (in Russ.)
- Malkov A.V., Pershin I.M. *Sistemy s raspredelennymi parametrami. Analiz i sintez* (Systems with the Distributed Parameters. Analysis and Synthesis), Moscow, 2012, 476 p. (in Russ.)
- Butkovskiy A.G. *Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem* (Structural Theory of Distributed Systems), Moscow, 1977, 320 p. (in Russ.)
- Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Heat Conduction Theory), Moscow, 1967, 599 p. (in Russ.)
- Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I. *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika* (Systemic Synthesis and Applied Synergetics), Collection of papers of the VII All-Russian Scientific Conference, 2015, pp. 106–117. (in Russ.)
- Pershin M.I. *Sovremennaya nauka i innovatsii*, 2014, no. 4(8), pp. 46–50. (in Russ.)
- Pershin M.I. *Universitetskaya nauka – regionu* (University Science – to the Region), Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, April 3–21, Pyatigorsk, 2017, vol. 1, pp. 138–143.
- Grigor'yev V.V., Bystrov S.V., Mansurova O.K., Pershin I.M., Pershin M.I. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2016, no. 7, pp. 12–18. (in Russ.)
- Grigor'yev V.V., Bystrov S.V., Mansurova O.K., Pershin I.M. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2013, no. 9, pp. 2–5. (in Russ.)
- Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Pershin I.M. *Modern Applied Science*, 2015, no. 1(9), pp. 204–210. ISSN 1913-1844 E-ISSN 1913-1852.

11. Chernyshev A.B., Martirosyan K.V. *Journal of Mathematics and Statistics*, 2014, no. 3(10), pp. 316–321.
12. Bystrov S.V., Grigor'yev V.V., Pershin I.M., Mansurova O.K., Pershin M.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 9(60), pp. 869–874. (in Russ.)
13. Veselov G.E., Pershin M.I. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2016, no. 1, pp. 99–105. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|--|
| Sergey V. Bystrov | — | PhD, Associate Professor; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: sbystrov@mail.ru |
| Valery V. Grigoriev | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University; Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: grigvv@yandex.ru |
| Olga K. Mansurova | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University; Department of Technological Processes Automation and Production; E-mail: erke7@mail.ru |
| Ivan M. Pershin | — | Dr. Sci., Professor; North Caucasus Federal University; Pyatigorsk Branch; E-mail: ivmp@yandex.ru |
| Maxim I. Pershin | — | Post-Graduate Student; Southern Federal University; E-mail: Pershinmaksim1992@yandex.ru |

For citation: Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Mansurova O. K., Pershin I. M., Pershin M. I. Adaptive adjustment of distributed regulators. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 814–824 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-814-824