

УДК 681.51

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА\***

***И.С. Левин***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: levin\_ilja@yahoo.com

***Аннотация.*** Предлагается методика сравнительного анализа оптимальных систем управления распределенными объектами с детерминированным регулятором и с идентификатором неопределенных параметров объекта. Дается оценка точности приближения оптимального процесса в замкнутых системах управления, структура которых определена исследуемыми алгоритмами оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева с неполным измерением состояния и идентификацией в реальном масштабе времени неопределенных характеристик процесса, в качестве которых принимается начальная температура и уровень тепловых потерь, к детерминированным алгоритмам оптимизации в условиях полного объема информации о параметрах модели объекта.

***Ключевые слова:*** система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, сравнительный анализ.

Одной из наиболее сложных и актуальных задач в современной теории автоматического управления объектами с распределенными параметрами является синтез управляющих алгоритмов в условиях ограниченной (интервальной) неопределенности параметрических характеристик объекта, вся информация о которых исчерпывается заданными границами диапазона изменения их возможных значений.

В работах [1, 7, 8] предлагается метод решения указанной задачи структурно-параметрического синтеза замкнутых систем оптимального быстродействия для линейной модели объекта управления с распределенными параметрами параболического типа. Показано применение разработанной методики и алгоритмов управления для решения задач оптимального быстродействия применительно к процессам индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед обработкой давлением.

В данной статье предлагается методика сравнительного анализа систем управления с детерминированным регулятором и систем управления с автокоррекцией коэффициентов обратных связей, дается оценка эффективности полученных в [1, 8] замкнутых систем в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта, в качестве которых принимаются начальная температура

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-08-00048 и 18-08-00565).

Левин Илья Сергеевич (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

и коэффициент тепловых потерь, по сравнению с системой управления, синтезированной в условиях полной информации об объекте.

Температурное поле  $Q(x, t)$  в процессе индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения  $u(t)$  описывается в зависимости от времени  $t$  и радиальной координаты  $x$  в первом приближении линейным, неоднородным и пространственно-одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах следующего вида [2]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{1}{c\gamma} F_{b1} \left( \frac{x}{R}, v \right) u(t); \quad x \in [0, R], \quad t \in [0, T]; \quad (1)$$

с граничными условиями третьего рода и равномерным распределением начальной температуры  $Q_0$  по радиусу заготовки

$$Q(x, 0) = Q_0 = const; \quad \lambda \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} + \alpha Q(R, t) = \alpha Q_C(t); \quad \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

На управляющее воздействие  $u(t)$  накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, T], \quad u_{\max} = \frac{P_{0\max}}{R}. \quad (3)$$

Здесь  $R$  – радиус цилиндра;

$c, \gamma$  – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала;

$\alpha, \lambda$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи и теплопроводности;

$Q_C(t)$  – температура окружающей среды;

$P_{0\max}$  – максимальная поверхностная плотность мощности нагрева;

$F_{b1} \left( \frac{x}{R}, v \right)$  – функция пространственного распределения по радиусу цилиндра

внутренних электромагнитных источников тепла, определяемая путем решения уравнений электромагнитного поля индуктора по выражению [3]:

$$F_{b1}(l, v) = v \frac{\text{ber}'^2(vl) + \text{bei}'^2(vl)}{\text{ber } v \text{ber}' v + \text{bei } v \text{bei}' v}; \quad l = \frac{x}{R}; \quad v = R\sqrt{2\pi\mu_a f\sigma}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота питающего индуктор тока;

$\sigma$  – электропроводность нагреваемого материала;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала;

$\text{ber } z, \text{bei } z, \text{ber}' z, \text{bei}' z$  – функции Кельвина и их первые производные.

Для объекта (1), (2) рассматривается задача оптимального по быстродействию управления, когда  $T \rightarrow \min_{u \in U}$ , в условиях интервальной неопределенности начальной температуры  $Q_0$  и уровня тепловых потерь, оцениваемых по величине критерия Био  $Bi = \alpha R / \lambda$ :

$$y = (Q_0, Bi) \in Y = \left\{ y : Q_0 \in [Q_{0\min}, Q_{0\max}], Bi \in [Bi_{0\min}, Bi_{0\max}] \right\}, \quad (5)$$

при заданных типичных требованиях достижения в конечный момент времени

$t = T$  минимальной погрешности равномерного приближения  $Q(x, y, T)$  к заданной температуре  $Q^*$  для всех возможных величин неопределенных факторов  $y \in Y$

$$\max_{y \in Y} \left[ \max_{x \in [0, R]} [Q(x, y, T) - Q^*] \right] \leq \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 > 0 \quad (6)$$

с предельно достижимой величиной точности нагрева  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$  в классе оптимальных двухинтервальных управляющих воздействий (рис. 1), стесняемых ограничениями (3).

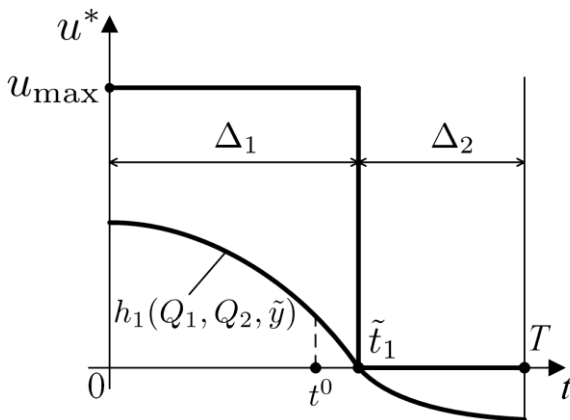


Рис. 1. Оптимальное по быстрдействию двухинтервальное управление по мощности внутренних источников тепла

Решение такой задачи для детерминированного объекта при фиксированном значении вектора неопределенных параметров  $y = \tilde{y}$  приводит к оптимальной программе релейной формы

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, & t \in (0, \Delta_1); \\ 0, & t \in (\Delta_1, \Delta_1 + \Delta_2). \end{cases} \quad (7)$$

Длительности первого ( $\Delta_1$ ) и второго ( $\Delta_2$ ) интервалов постоянства оптимального программного управления могут быть найдены известным альтернативным методом [3].

В соответствии с предлагаемой в [1, 7, 8] методикой синтеза замкнутых систем управления объектом (1), (2) получен следующий алгоритм оптимального управления  $u^*(Q_1, Q_2, y)$  с идентификацией параметрических характеристик объекта по неполному измерению состояния:

$$u^*(Q_1, Q_2, y) = \frac{u_{\max}}{2} [1 + \text{sign } h_1(Q_1, Q_2, y)] \quad (8)$$

Здесь  $h_1(Q_1, Q_2, y)$  — функция переключения оптимального управления (8), формируемая по измеряемым температурам  $Q_j(t)$  на поверхности  $Q_1(t) = Q(R, t)$

и в центре  $Q_2(t) = Q(0,t)$  нагреваемого изделия:

$$h_1(Q_1, Q_2, y) = \sum_{i=1}^2 \rho_i(y) (Q_i^T(y) - Q_i(t)), \quad (9)$$

где  $\rho_i(y)$  и  $Q_i^T(y), i=1,2$  – значения коэффициентов обратных связей и заданных конечных температурных состояний, определяемые согласно следующим зависимостям:

$$\rho_i(y) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij} (Q_j(t^0) - Q_{jH}), \quad i=1,2; \quad (10)$$

$$Q_i^T(y) = Q_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (Q_j(t^0) - Q_{jH}), \quad i=1,2. \quad (11)$$

Здесь  $Q_i^T(y_H) = Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)}, i=1,2$  – результирующие значения температур на поверхности и в центре нагреваемого изделия в конце оптимального процесса, рассчитанные в точке  $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$ ;  $\rho_i(y_H)$  – нетривиальные решения однородной системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^2 \rho_j(y_H) (Q_j^T(y_H) - Q_j(\tilde{t}_1)) = 0, \quad (12)$$

рассчитанные при  $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$ ;  $\tilde{t}_1$  – расчетный момент времени переключения оптимальной программы  $u^*(t)$ .

Далее в (10), (11)  $Q_j(t^0), j=1,2$  – наблюдаемые в заранее фиксируемые на протяжении первого ( $\Delta_1$ ) интервала постоянства управления моменты времени  $t^0$  при  $u(t) = u_{\max}$  значения температуры в точках  $x_1 = R$  и  $x_2 = 0$  при реализуемых значениях  $\tilde{y}$ . Значения  $Q_{jH} = Q_j(t^0), j=1,2$ , рассчитываются по формуле [3]

$$Q_{jH} = Q_{0H} + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bin}(\eta_n, \nu) \eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x_j}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi_H^2) J_0^2(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t^0}\right). \quad (13)$$

Здесь  $\bar{F}_{bin}(\eta_n, \nu) = \int_0^R F_{b1}\left(\frac{x}{R}, \nu\right) J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \frac{x}{R} dx, n=1,2,\dots$  – моды функции (4),

$J_0(\cdot)$  – функция Бесселя нулевого порядка;

$\eta_n, n=1,2,\dots$  – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения  $Bi J_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$ .

Параметры  $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$  в (10), (11) рассчитаны по предложенной в [1] методике:

$$\begin{aligned}\gamma_{ij}^* &= \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}; \\ \beta_{1i} &\cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta Q_0}; \beta_{2i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta B_i}; \beta_{1i}^* \cong \frac{\Delta Q_i^T}{\Delta Q_0}; \beta_{2i}^* \cong \frac{\Delta Q_i^T}{\Delta B_i}; \\ \alpha_{11} &= \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial B_i}}{\frac{\partial Q_2}{\partial B_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial B_i}}; \alpha_{12} = \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial B_i}}{\frac{\partial Q_2}{\partial B_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial B_i}}; \alpha_{21} = -\alpha_{22} = -\frac{1}{\frac{\partial Q_2}{\partial B_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial B_i}},\end{aligned}\quad (14)$$

где  $\frac{\partial Q_1}{\partial B_i}$  и  $\frac{\partial Q_2}{\partial B_i}$  находятся путем дифференцирования выражения (13).

Рассматриваемая задача была дополнена типовым для технологических процессов нагрева металла ограничением на максимальное значение температуры  $Q_{\max}(t)$  в процессе нагрева, которое не должно превышать заданного допустимого уровня  $Q_{\text{доп}}$  [4,5]:

$$Q_{\max}(t) = \max\{Q(x, t) : x \in [0, R]\} \leq Q_{\text{доп}}, Q_{\text{доп}} \geq Q^*. \quad (15)$$

В этом случае оптимальное по быстродействию программное управление  $u^*(t)$  для детерминированного объекта дополняется участком управления  $u^Q(t)$  движением по ограничению после достижения равенства  $Q_{\max}(t_Q) = Q_{\text{доп}}$  в момент  $t = t_Q$ :

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, t \in (0, t_Q); \\ u^Q(t), t \in [t_Q, \Delta_1^0]; \\ 0, t \in (\Delta_1^0, \Delta_1^0 + \Delta_2^0). \end{cases} \quad (16)$$

В первом приближении управление  $u^Q(t)$  описывается известной зависимостью экспоненциального характера [4, 5], что позволяет определить отличные от  $\Delta_1, \Delta_2$  в (7) значения длительностей  $\Delta_1^0, \Delta_2^0$  интервалов программы (16) по схеме альтернативного метода [3].

В итоге алгоритм  $u^*(Q_1, Q_2, y)$  синтеза замкнутой системы оптимального по быстродействию управления с учетом фазового ограничения (15) дополняется промежутком  $(t_Q, \Delta_1^0)$  поддержания  $Q_{\max} = Q_1$  на предельно допустимом уровне  $Q_{\text{доп}}$  и принимает следующий вид [3]:

$$u^*(Q_1, Q_2, y) = \begin{cases} \frac{u_{\max}}{2} [1 + \text{sign} h_1(Q_1, Q_2, y)] = u_{\max} \quad \forall Q_1, Q_2 : h_1(\cdot) > 0; Q_1 < Q_{\text{доп}}; \\ u^Q(t) \quad \forall Q_1, Q_2 : h_1(\cdot) > 0; Q_1 = Q_{\text{доп}}; \\ \frac{u_{\max}}{2} [1 + \text{sign} h_1(Q_1, Q_2, y)] = 0 \quad \forall Q_1, Q_2 : h_1(\cdot) \leq 0; Q_1 < Q_{\text{доп}}; \end{cases} \quad (17)$$

Здесь  $h_1(Q_1, Q_2, y)$  сохраняется в форме (9) и остаются справедливыми вы-

ражения (10) и (11) для линейных приближений  $\rho_i(y)$ ,  $Q_i^T(y), i=1,2$  с новыми значениями  $\rho_i(y_H)$ ,  $Q_i^T(y_H), i=1,2$ , рассчитываемыми по известным параметрам оптимальной программы (16). Поддержание температуры на специальном участке в структуре замкнутой системы реализуется с использованием задержанной обратной связи по температуре на поверхности заготовки  $Q_1(t)$  с заранее рассчитанным коэффициентом передачи  $\rho_3$ , обеспечивающим требуемую точность поддержания равенства  $Q_{\max} = Q_1$  [2].

В целях апробации полученных алгоритмов было выполнено компьютерное моделирование соответствующих им замкнутых структур, где объект представлен в форме 30 параллельно соединенных апериодических звеньев с предварительно рассчитанными коэффициентами передачи и постоянными времени [6, 8].

Сравнительный анализ результатов работы алгоритмов оптимального управления с автокоррекцией коэффициентов обратных связей (8), (17) и детерминированного оптимального программного управления (6), (17) предлагается провести в соответствии со следующим алгоритмом [8].

1. Для каждого из фиксируемых значений  $Q_0, Bi$  в заданном диапазоне их изменения (5) решается задача оптимального по быстродействию программного управления объектом (1), (3) по методике в [3] и строятся результирующие распределения температур  $Q(x, T) - Q^*$  по радиусу слитка в конце оптимального процесса. Найденные указанным путем характеристики оптимальных процессов будем считать эталонными.

2. Производится расчет параметров модели объекта при фиксированных номинальных значениях неопределенных параметров  $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$ . Полученная модель объекта затем используется в замкнутой системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева не полностью определенными моделями с идентификацией неопределенных параметров.

3. По результатам компьютерного моделирования строятся результирующие распределения температур для всех значений неопределенных параметров  $Q_0, Bi$ , отличных от номинальных  $Q_{0H}, Bi_H$ .

4. Производится оценка эффективности замкнутой системы управления с идентификатором путем сравнения полученных результатов с эталонными характеристиками по степени сокращения длительности интервала выравнивания температур  $\Delta_2, \Delta_2^0$  и точности равномерного приближения результирующих температурных распределений по радиусу цилиндра  $\epsilon_{\min}^{(2)}$ .

Для исходных номинальных данных объекта (1), (2), отвечающих процессу индукционного нагрева цилиндрических слитков из титановых сплавов диаметром 0,54 м перед последующей операцией горячего прессования [4, 5]

$$\lambda = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{С}}, a = 4.34 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \nu = 4, Bi = 0.7, Q_0 = 30^\circ \text{С}, Q^* = 1050^\circ \text{С}, Q_{\text{доп}} = 1100^\circ \text{С},$$

$P_{0\max} = 106 \cdot 10^3 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ , получены следующие значения параметров идентификатора (14) и функции переключения оптимального регулятора (9) в задаче без учета фазовых ограничений:

$$\alpha_{11} = -0.19; \alpha_{12} = 1.19; \alpha_{21} = -0.06; \alpha_{22} = 0.06; \beta_{11} = \beta_{21} = 0; \beta_{12} = -0.002; \beta_{22} = 2.07;$$

$$\beta_{11}^* = \beta_{12}^* = 0.04; \beta_{21}^* = \beta_{22}^* = -48.33; \gamma_{11} = \gamma_{12} = 0; \gamma_{21} = -0.12; \gamma_{22} = 0.12; \gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 2.88;$$

$$\gamma_{12}^* = \gamma_{22}^* = -2.86; \rho_1 = 1; \rho_2 = 1.796; Q_1^T = Q_2^T = 997.9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В задаче с учетом фазовых ограничений (15):

$$\alpha_{11} = 0.1; \alpha_{12} = 0.9; \alpha_{21} = -0.1; \alpha_{22} = 0.1; \beta_{11} = \beta_{21} = 0; \beta_{12} = -0.01; \beta_{22} = 3.55;$$

$$\beta_{11}^* = \beta_{12}^* = 0.001; \beta_{21}^* = \beta_{22}^* = -43.8; \gamma_{11} = \gamma_{12} = 0; \gamma_{21} = -0.22; \gamma_{22} = 0.21; \gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 2.7;$$

$$\gamma_{12}^* = \gamma_{22}^* = -2.7; \rho_1 = 1; \rho_2 = 1.850; \rho_3 = 14693; Q_1^T = Q_2^T = 999 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Полученные в результате выполнения сравнительного анализа данные (рис. 2, 3) свидетельствуют об удовлетворительной точности приближения оптимального процесса в замкнутом контуре с идентификатором (14) в характерном для типовых ситуаций широком диапазоне изменения значения  $Bi \in [0.42, 0.98]$  и  $Q_0 \in [9, 51], ^\circ\text{C}$  к детерминированному оптимальному программному алгоритму управления (6), полученному в условиях полной информации об объекте при соответствующих заранее фиксируемых значениях  $Bi \in \{0.42, 0.56, 0.98\}$  и  $Q_0 \in \{9, 51\}, ^\circ\text{C}$ .

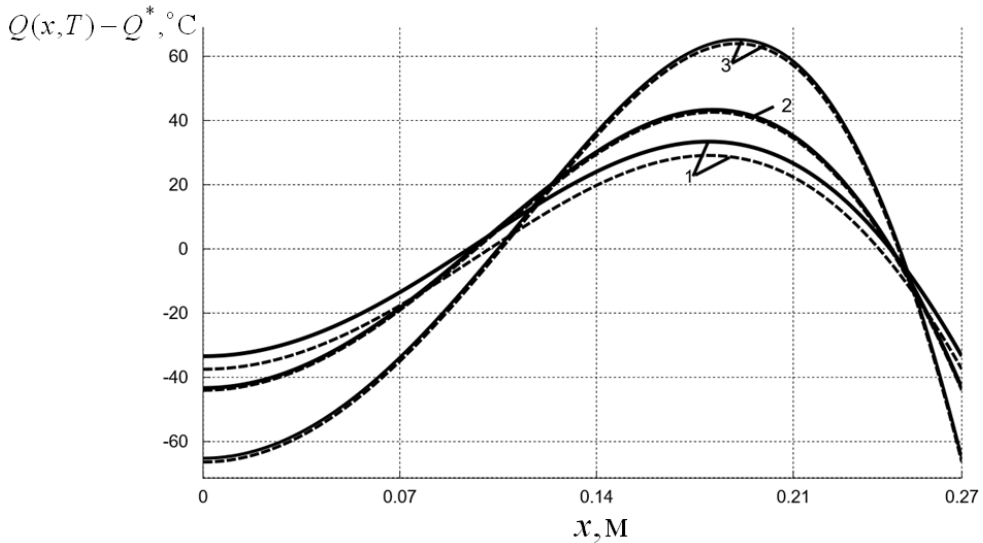


Рис. 2. Результирующее распределение температур  $Q(x, T) - Q^*$  по радиусу слитка при  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$  в оптимальном по быстродействию процессе с двухинтервальным управлением  $u^*(t)$  (сплошные линии) и в системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева для не полностью определенных (пунктир) моделей ОРП при  $Q_0 = Q_H : 1 - Bi = 0.42, 2 - Bi = 0.56, 3 - Bi = 0.98$

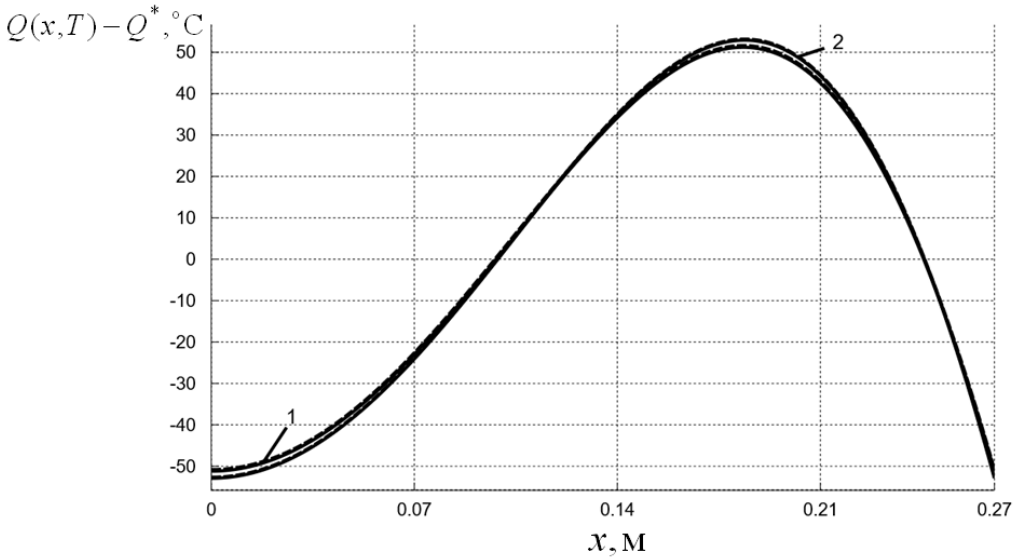


Рис. 3. Результирующее распределение температур  $Q(x, T) - Q^*$  по радиусу слитка при  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$  в оптимальном по быстродействию процессе с двухинтервальным управлением  $u^*(t)$  (сплошные линии) и в системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева для не полностью определенных (пунктир) моделей ОРП при  $Bi = Bi_H$ : 1 -  $Q_0 = 9, ^\circ\text{C}$ ; 2 -  $Q_0 = 51, ^\circ\text{C}$

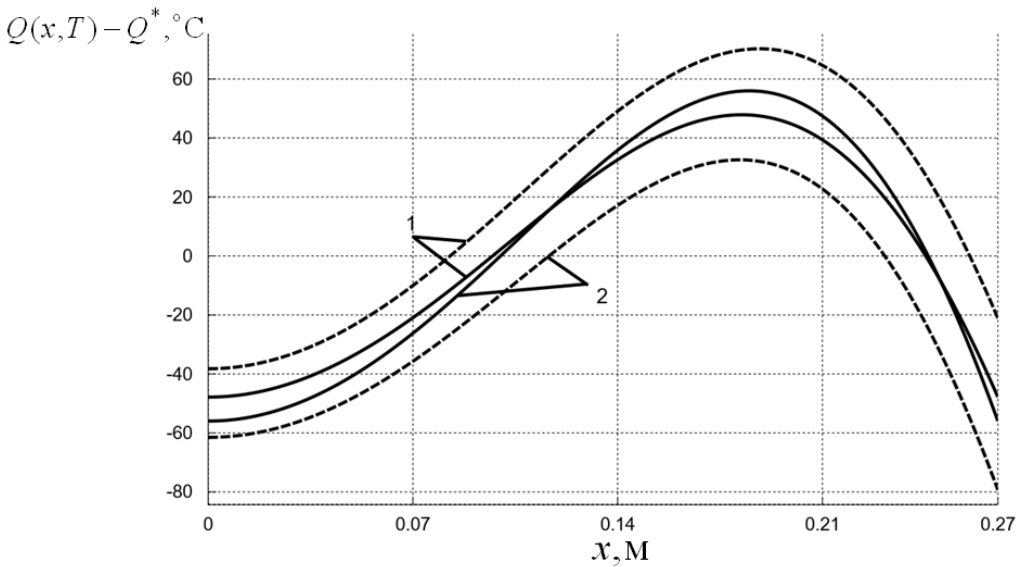


Рис. 4. Результирующее распределение температур  $Q(x, T) - Q^*$  по радиусу слитка при  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$  в оптимальном по быстродействию процессе с двухинтервальным управлением  $u^*(t)$  (сплошные линии) с учетом фазовых ограничений и в системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева для не полностью определенных (пунктир) моделей ОРП при  $Q_0 = Q_H$ : 1 -  $Bi = 0.63$ , 2 -  $Bi = 0.77$



Аналогичным образом, сопоставлены результаты моделирования (рис. 4, 5) замкнутой системы управления с идентификатором (17) в случае учета фазового ограничения (15) при заданном диапазоне изменения значения  $Bi \in [0.63, 0.77]$  и  $Q_0 \in [9, 51], ^\circ\text{C}$  с результатами моделирования детерминированного оптимального программного управления (16) с участком стабилизации температуры на допустимом уровне  $Q_{\text{доп}}$  для зафиксированных значений  $Bi \in \{0.63, 0.77\}$  и  $Q_0 \in \{9, 51\}, ^\circ\text{C}$ .

В замкнутой системе с идентификатором достигается существенный выигрыш по точности приближения к требуемому конечному температурному состоянию (до 40 %), а также сокращение длительности интервала выравнивания температур (до 70 %) по сравнению с программным управлением по принципу гарантированного результата в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта, предельные возможности которого ограничиваются достижением наилучших показателей по критерию оптимальности при наиболее неблагоприятном сочетании неопределенных факторов в (5).

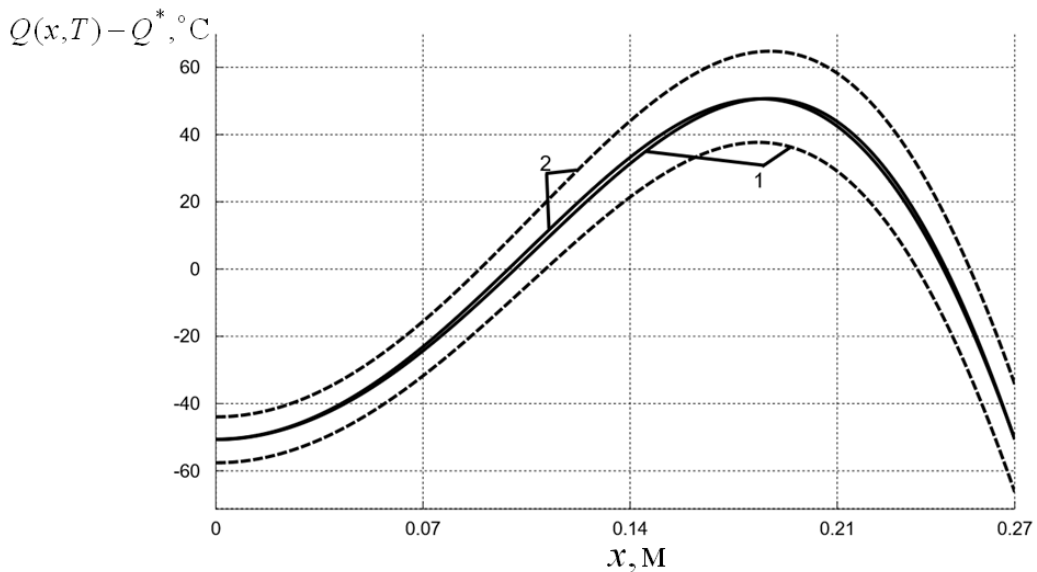


Рис. 5. Результирующее распределение температур  $Q(x, T) - Q^*$  по радиусу слитка при  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$  в оптимальном по быстродействию процессе с двухинтервальным управлением  $u^*(t)$  (сплошные линии) с учетом фазовых ограничений и в системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева для не полностью определенных (пунктир) моделей ОРП при  $Bi = Bi_H$ : 1 –  $Q_0 = 9, ^\circ\text{C}$ ; 2 –  $Q_0 = 51, ^\circ\text{C}$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о преимуществах предлагаемого метода по сравнению с программным управлением ансамблем траекторий по принципу гарантированного результата.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Левин И.С. Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 5. – С. 3–16.
2. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
3. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
4. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
5. Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
6. Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (39). – С. 167–174.
7. Левин И.С. Синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 20 с.
8. Левин И.С. Синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта: Дис. ... канд. техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 144 с.

*Статья поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.*

## EFFICIENCY ANALYSIS OF CLOSED LOOP CONTROL SYSTEMS FOR DISTRIBUTED PARAMETER OBJECTS WITH INTERVAL UNCERTAINTY OF THE PLANT CHARACTERISTICS

*I.S. Levin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: levin\_ilja@yahoo.com

**Abstract.** *This paper devoted to a comparative analysis between two optimal distributed parameter control systems that are based on deterministic control algorithms and algorithms with the identifier of the parameters of the plant. The accuracy of the approximation of optimal processes in closed loop systems towards deterministic algorithms of optimization according to the time-optimal criterion in the presence of complete data on the values of plant's parameters was estimated. The structures of these closed-loop systems are determined by time-optimal algorithms of controlling of the process of induction heating with incomplete measurement of the state of the plant and real-time identification of uncertain characteristics of the process which are the initial temperature and heat losses.*

**Keywords:** *distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of the plant characteristics, comparative analysis.*