

УДК 681.51

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
С ФАЗОВЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА***

И.С. Левин, Э.Я. Рапопорт

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: levin_ilja@yahoo.com; rapoport@samgtu.ru

Рассмотрена задача синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта с учетом фазового ограничения на максимальную температуру. Полученный оптимальный алгоритм управления с обратными связями дополнен специальным участком поддержания максимальной температуры на предельно допустимом уровне. Приведены выражения для расчета коэффициентов обратных связей и представлена структура полученной замкнутой системы. Для взятых в качестве примера исходных данных процесса индукционного нагрева рассчитаны численные значения коэффициентов обратных связей, построены графики управляющего воздействия и температурного поля.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, синтез оптимального регулятора, фазовые ограничения.

В реальных производственных условиях помимо учета ограничения на управляющее воздействие, определяемое энергетическими возможностями индукционной нагревательной установки, необходим учет дополнительного ограничения на величину максимальной температуры $\theta_{\max}(t)$ в процессе нагрева, которая не должна превышать предельно допустимого значения $\theta_{\text{доп}}$ [1].

В качестве объекта управления рассматривается процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения $u(t)$, который можно в линейном приближении описать бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, t)$ разложения температурного поля $\theta(x, t)$ в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ радиальной координаты $x \in [0, R]$ [2]:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта №1271).

Илья Сергеевич Левин, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

$$\frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{\theta}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{c\gamma} \bar{F}_{b1n}(\mu_n, \nu) u(t) + d_{1n} \theta_C(t), t \in [0, t_1], n = 1, 2, \dots; \quad (1)$$

$$\bar{\theta}_n(\mu_n, 0) = \bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n).$$

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

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, t_1] \quad (2)$$

Здесь R – радиус цилиндра;

c, γ – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала;

$\bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n)$ – моды разложения заданного равномерного начального распределения температуры $\theta(x, 0) = \theta_0 = \text{const}$ в бесконечный ряд по системе собственных функций;

$$\mu_n^2 = \frac{a\eta_n^2}{R^2} \text{ – собственные числа;}$$

$\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения $BiJ_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$;

Bi – безразмерный критерий Био, характеризующий уровень тепловых потерь с поверхности цилиндра в процессе нагрева;

$J_i(\eta), i = 0, 1$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка;

d_{1n} – известные коэффициенты;

$\theta_C(t)$ – температура окружающей среды;

$\theta(x, t)$ – температурное поле нагреваемого металлического изделия, изменяющееся во времени t и по радиальной координате x , которое описывается следующим выражением:

$$\theta(x, t) = \theta_0 + \frac{1}{c\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, \nu) \eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \int_0^{t_1} e^{-\mu_n^2(t-\tau)} u(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

$\bar{F}_{b1n}(\eta_n, \nu)$ – моды функции пространственного распределения по радиусу цилиндра внутренних источников тепла, определяемые по формуле

$$\bar{F}_{b1n}(\eta_n, \nu) = \int_0^1 F_{b1}(l, \nu) J_0(\eta_n l) l dl, n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Здесь

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

f – частота питающего индуктор тока;

σ – электропроводность нагреваемого материала;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала;

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

Постановка задачи синтеза оптимальной по быстродействию системы автоматического управления (САУ) процессом индукционного нагрева металличе-

ских полуфабрикатов цилиндрической формы под обработку давлением в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта без учета дополнительных фазовых ограничений и ее решение рассмотрены в [3]. Полученный в результате решения этой задачи алгоритм управления с обратной связью $u^*(\theta)$ имеет вид

$$u^*(\theta) = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign } h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) \right] = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \sum_{j=1}^2 \rho_j(\tilde{y}) (\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j) \right], \quad (5)$$

где $\tilde{y} = (\theta_0, Bi)$ – вектор неопределенных характеристик объекта, в качестве которых приняты начальная температура $\theta_0 \in [\theta_{0\min}, \theta_{0\max}]$ и безразмерный критерий Био $Bi \in [Bi_{\min}, Bi_{\max}]$;

$h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ – функция переключения оптимального управления u^* , формируемая по измеряемым температурам θ_j на поверхности $\theta_1 = \theta(R, t)$ и в центре $\theta_2 = \theta(0, t)$ нагреваемого изделия;

$\rho_j(\tilde{y})$ и $\theta_j^T(\tilde{y}), i=1,2$ – значения коэффициентов обратных связей и заданных конечных температурных состояний, определяемые согласно следующим зависимостям:

$$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij} (\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})) - \theta_{jH}); i=1,2; \quad (6)$$

$$\theta_i^T(\tilde{y}) = \theta_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})) - \theta_{jH}); i=1,2; \quad (7)$$

Здесь $\theta_j^T(y_H) = \theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)}, j=1,2$ – результирующие значения температур на поверхности и в центре нагреваемого изделия в конце оптимального процесса, рассчитанные в окрестности номинальной точки $y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$, где $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ – предельно достижимая точность равномерного приближения к требуемой конечной температуре $\theta^{**} = \text{const}$ в классе управлений (5) с двумя интервалами постоянства;

$\rho_i(y_H)$ – нетривиальные решения однородной системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^2 \rho_j(y_H) (\theta_j^T(y_H) - \theta_j(\tilde{t}_m(y_H))) = 0, m=1,2,$$

рассчитанные при $\tilde{y} = y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$, где $\tilde{t}_m(y_H), m=1,2$ – расчетные моменты времени переключения оптимальной программы $u^*(t)$ при $\tilde{y} = y_H$.

Далее в (6), (7) $\theta_j(t_\Phi(\tilde{y})), j=1,2$ – наблюдаемые и заранее фиксируемые на протяжении первого интервала постоянства управления моменты времени t_Φ при $u(t) = u_{\max}$ значения температуры в точках $x_1 = R$ и $x_2 = 0$ при реализуемых значениях \tilde{y} .

Значения $\theta_{jH} = \theta_j(t_\Phi(y_H)), j=1,2$ в (6), (7) рассчитываются по формулам [2]:

$$\theta_{1H} = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t \Phi}\right); \quad (8)$$

$$\theta_{2H} = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t \Phi}\right); \quad (9)$$

при $\theta_0 = \theta_0^*$, $Bi = Bi^*$.

Параметры $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$ в (6), (7) рассчитаны по предложенной в [3] методике:

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}^* &= \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}; \\ \beta_{1i} &\cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \theta_0}; \beta_{2i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta Bi}; \beta_{1i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \theta_0}; \beta_{2i}^* \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta Bi}; \\ \alpha_{11} &= \frac{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}; \alpha_{12} = \frac{\frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}; \alpha_{21} = -\alpha_{22} = -\frac{1}{\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\frac{\partial \theta_1}{\partial Bi}$ и $\frac{\partial \theta_2}{\partial Bi}$ находятся путем дифференцирования выражений (8), (9).

Учет фазового ограничения на максимальную температуру $\theta_{\max}(t)$, ограниченную заданным допустимым пределом $\theta_{\text{доп}}$, приводит к необходимости обеспечения на всем протяжении процесса управления соотношения

$$\theta_{\max}(t) = \max_{x \in [0, R]} \theta(x, t) \leq \theta_{\text{доп}}, \quad 0 < t \leq t_1. \quad (11)$$

В соответствии с принципом максимума Понтрягина [4] в этом случае оптимальное программное управление $u^*(t)$ в каждый момент времени либо принимает одно из двух своих предельно допустимых значений u_{\max} и $u_{\min} = 0$, либо определяется из условий поддержания на предельно допустимом уровне $\theta_{\text{доп}}$ максимальной температуры θ_{\max} , что для рассматриваемого случая с двухинтервальным управлением в условиях обеспечения предельно достижимой точности $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ равномерного приближения к заданному конечному температурному состоянию $\theta(x, t_1) = \theta^{**} = \text{const}$ приводит к оптимальному программному алгоритму управления следующего вида (рис. 1) [2]:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, & 0 < t < t_{\theta}; \\ u^{\theta}(t), & t_{\theta} \leq t < \Delta_1^0; \\ 0, & \Delta_1^0 < t < \Delta_1^0 + \Delta_2^0. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь t_{θ} – момент достижения равенства $\theta_{\max}(t_{\theta}) = \theta_{\text{доп}}$, $u^{\theta}(t)$ – управление на участке (t_{θ}, Δ_1^0) движения по ограничению с поддержанием равенства $\theta_{\max}(t) = \theta_{\text{доп}}$, $t \in (t_{\theta}, \Delta_1^0)$.

Часто в реальных ситуациях за θ_{\max} можно принять с допустимой погрешностью температуру поверхности $\theta(x_{\max}, t) = \theta(R, t) = \theta_1(t)$ нагреваемого металлического изделия для всех $t \in (0, \Delta_1^0)$. Тогда, если пренебречь смещением во времени точки температурного максимума, при сравнительно малой длительности участка поддержания θ_{\max} на $\theta_{\text{доп}}$ равенство $\theta_{\max}(t) = \theta_{\text{доп}}$ определяет с достаточной точностью управление $u^\theta(t)$ в экспоненциальной форме [5]:

$$u^\theta(t) = u_{\max} \left(a_\theta + b_\theta e^{-\beta_\theta(t-t_\theta)} \right), t \in (t_\theta, \Delta_1^0), \quad (13)$$

где коэффициенты $a_\theta, b_\theta, \beta_\theta$ определяются по следующим выражениям:

$$a_\theta = \frac{L_1 \eta_2^2 + L_2 \eta_1^2}{E_1 \eta_2^2 + L_2 \eta_1^2}; b_\theta = \frac{(\eta_2^2 - \eta_1^2)(E_1 L_2 - E_2 L_1)}{(E_1 + E_2)(E_1 \eta_2^2 + E_2 \eta_1^2)}; \beta_\theta = \frac{a(E_1 \eta_2^2 + E_2 \eta_1^2)}{R^2(E_1 + E_2)}. \quad (14)$$

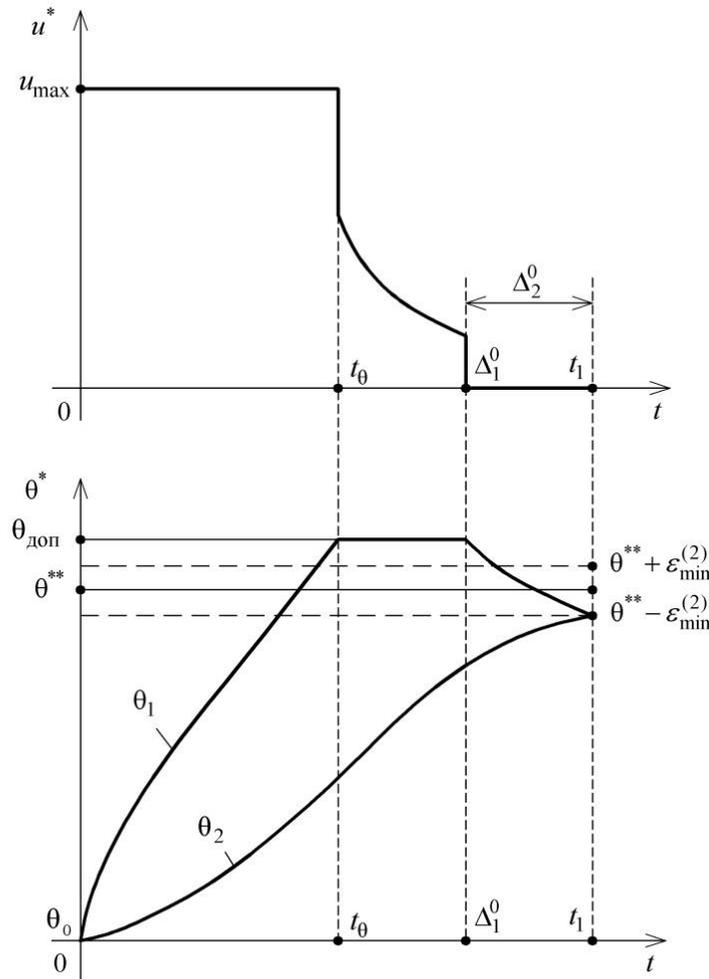


Рис. 1. Управляющее воздействие и температурное поле в оптимальном по быстрдействию процессе нагрева с ограничением на максимальную температуру

Здесь $L_n = A_n^\theta \bar{\theta}_n^\theta \eta_n^2$; $E_n = A_n^\theta \bar{F}_{b1n}(\eta_n, \nu)$, $n = 1, 2$;

$$A_n^\theta = \frac{2\eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x_{\max}}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)}; \bar{\theta}_n^\theta = \int_0^1 \theta(l, t_\theta) \cdot l \cdot J_0(\eta_n l) dl.$$

Подставив управление (12) в формулу (3), получим для $t = \sum_{i=1}^2 \Delta_i^0$ следующее выражение для конечного распределения температур $\theta(x, \Delta_1^0, \Delta_2^0)$ с учетом фазового ограничения на θ_{\max} :

$$\theta(x, \Delta_1^0, \Delta_2^0) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} M_n;$$

$$M_n = \left[e^{\mu_n^2 t_\theta} - 1 + a_\theta \left(e^{\mu_n^2 \Delta_1^0} - e^{\mu_n^2 t_\theta} \right) + \frac{b_\theta \eta_n^2}{\eta_n^2 - \frac{\beta_\theta R^2}{a}} \left(e^{\mu_n^2 \Delta_1^0 - \beta_\theta (\Delta_1^0 - t_\theta)} - e^{\mu_n^2 t_\theta} \right) \right] e^{\mu_n^2 (\Delta_1^0 + \Delta_2^0)}.$$

(15)

Таким образом, для автоматической отработки оптимальной программы (12) в рассматриваемой замкнутой системе необходимо учитывать соотношение между θ_{\max} и $\theta_{\text{доп}}$ наряду со знаком функции переключения $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$, что приводит к следующему алгоритму управления с обратными связями вместо (5):

$$u^* = \begin{cases} u_{\max} & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) > 0; \theta_1 < \theta_{\text{доп}}; \\ u^\theta(t) & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) > 0; \theta_1 = \theta_{\text{доп}}; \\ 0 & \forall \theta_1, \theta_2 : h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y}) < 0; \theta_1 < \theta_{\text{доп}}; \end{cases} \quad (16)$$

Алгоритм управления (16) будет в любой момент времени соответствовать оптимальному по быстродействию режиму нагрева, если функция переключения $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ меняет знак в расчетный момент времени Δ_1^0 . Моменты времени Δ_1^0, Δ_2^0 , а также величина $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ должны быть предварительно найдены альтернативным методом [1, 2] с учетом ограничения на максимальную температуру.

Требуемое поведение $h_1(\theta_1, \theta_2, \tilde{y})$ обеспечивается выбором измененных по сравнению с прежними и рассчитываемых аналогичным способом коэффициентов $\rho_i(\tilde{y})$ в (6) с учетом новых значений $\theta_j^T(y_H), \theta_j(\tilde{t}_m(y_H))$ и \tilde{t}_m , соответствующих алгоритму управления (12) и конечному состоянию объекта, описываемого выражением (15).

Теперь структура замкнутой системы (рис. 2) по сравнению с исходной в [3] дополняется в соответствии с новым алгоритмом управления (16) задержанной обратной связью по $\theta_1(t)$, обеспечивающей поддержание θ_1 на уровне $\theta_{\text{доп}}$ с требуемой точностью, определяемой выбором величины ρ_3 . Задержанный характер дополнительной обратной связи по θ_1 обеспечивается нелинейным эле-

ментом НЭ с зоной нечувствительности, отсекающим ее воздействие при $\theta_1 < \theta_{\text{доп}}$.

Определим значение коэффициента ρ_3 по следующей методике. Рассмотрим контур задержанной обратной связи в режиме поддержания равенства $\theta_{\text{max}} \equiv \theta_{\text{доп}}$ (рис. 3), предварительно выполнив соответствующие преобразования структурной схемы по правилам эквивалентных преобразований.

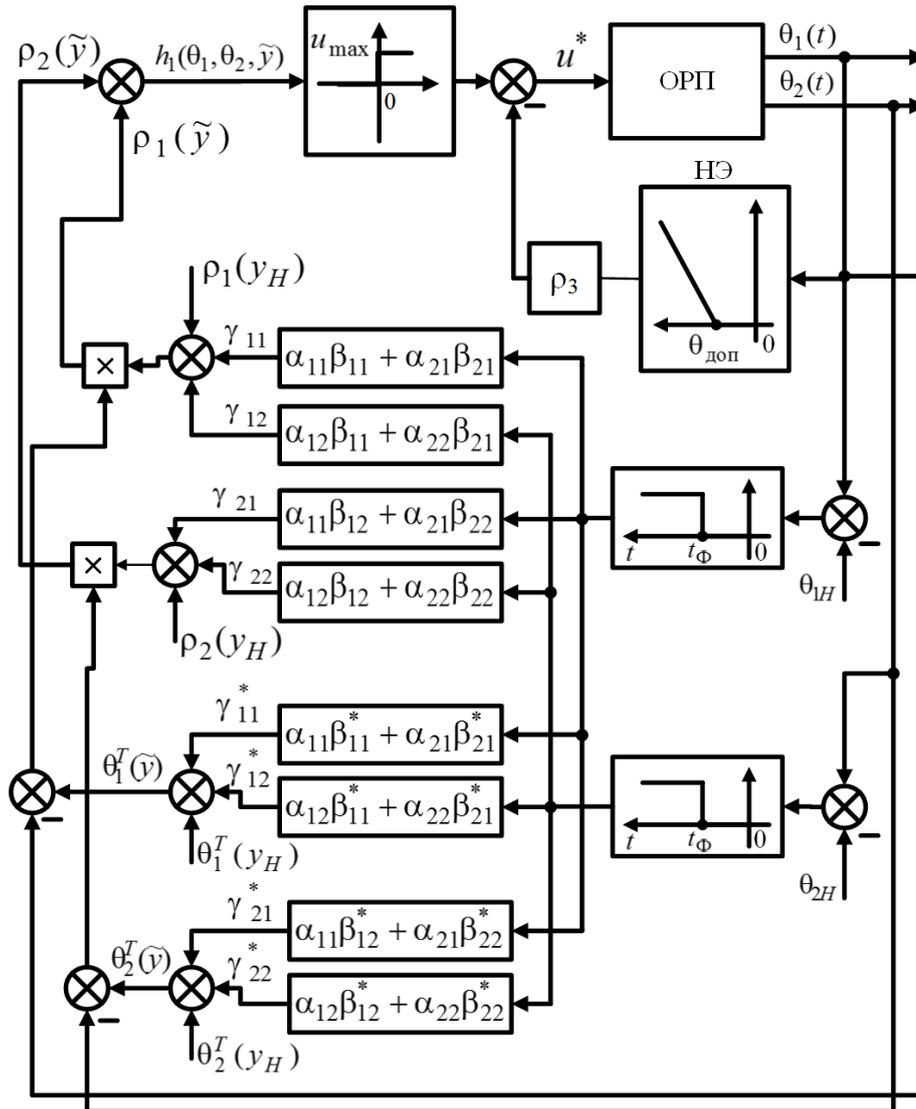


Рис. 2. Структура оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности с учетом фазового ограничения на максимальную температуру

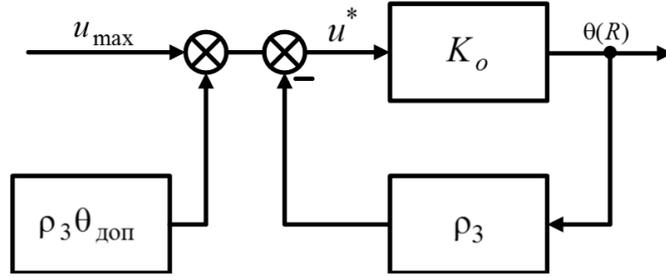


Рис. 3. Контур задержанной обратной связи в статике

В статическом режиме поведение объекта (1)-(3), передаточная функция которого $W_{OPII}(x, p)$ представлена параллельно соединенными аperiодическими звеньями [6], будет характеризоваться только суммарным коэффициентом усиления:

$$W_{OPII}(x, 0) = \sum_1^{\infty} \frac{2}{c\gamma R^2} \cdot \frac{K_n}{T_n p + 1} = \sum_1^{\infty} \frac{2K_n}{c\gamma R^2} = K_o, \quad (17)$$

$$\text{где } K_n = \frac{1}{\mu_n^2} \cdot \frac{\eta_n^2 J_0 \left(\eta_n \frac{x}{R} \right) \left(\int_0^R \xi J_0 \left(\eta_n \frac{\xi}{R} \right) F_{b1} \left(\frac{\xi}{R}, v \right) d\xi \right)}{J_0^2(\eta_n) (\eta_n^2 + Bi^2)}; T_n = \frac{1}{\mu_n^2}.$$

Тогда для замкнутого контура с отрицательной обратной связью можно записать следующее соотношение между входом и выходом структуры (см. рис. 3):

$$\theta_1(R) = (u_{\max} + \beta_3 \theta_{\text{доп}}) \frac{K_o}{1 + \beta_3 K_o}. \quad (18)$$

Задаваясь допустимой погрешностью Ω поддержания θ_{\max} на уровне $\theta_{\text{доп}}$ в замкнутом контуре задержанной обратной связи согласно равенству

$$\theta_1(R) = \theta_{\text{доп}} (1 + \Omega), \quad (19)$$

получим, приравнявая правые части выражений (18) и (19), следующее выражение для коэффициента обратной связи ρ_3 :

$$\rho_3 = \frac{u_{\max} K_o - \theta_{\text{доп}} (1 + \Omega)}{\Omega K_o \theta_{\text{доп}}}. \quad (20)$$

Для исходных данных рассматриваемого процесса индукционного нагрева цилиндрических слитков, представленных в таблице, были получены следующие значения коэффициентов в (6), (7), (10), (20): $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 1.042$, $\rho_3 = 9.7 \cdot 10^4$; $\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0$, $\gamma_{21} = -1.77$, $\gamma_{22} = 1.77$, $\gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 9.25$, $\gamma_{12}^* = \gamma_{22}^* = -9.24$.

На рис. 4 представлены вид управляющего воздействия (а) и температурное поле (б) для рассматриваемого примера в замкнутой системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева.

Исходные данные для процесса индукционного нагрева

Параметр	Значение
$2R$, толщина заготовки, м	0,48
λ , коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)	130
γ , плотность материала, кг/м ³	2800
c , теплоемкость, Дж/(кг · °С)	922
a , коэффициент температуропроводности, м ² /с	49×10^6
ν , характерный параметр	15
Bi , критерий Био	0,05
θ_0 , начальная температура, °С	15
θ^{**} , конечная температура, °С	460
$P_{0\max}$, максимальная поверхностная плотность мощности нагрева, кВт/м ²	130

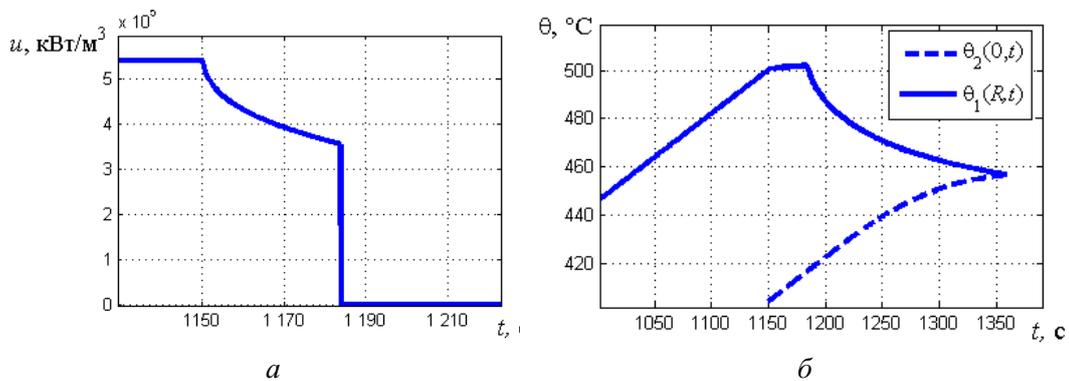


Рис. 4. Управляющее воздействие (а) и температурное поле (б) в замкнутой системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Левин И.С. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металла под обработку давлением в условиях ограниченной неопределенности характеристик объекта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI Международной конференции. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 86-94.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983.
5. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgy, 1993. – 279 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.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2014 г.

SYNTHESIS OF TIME-OPTIMAL CONTROL SYSTEM OF THE STATE-CONSTRAINED INDUCTION HEATING PROCESSES WITH INTERVAL OF UNCERTAINTY CHARACTERISTICS OF THE OBJECT

I.S. Levin, E.Ya. Rapoport

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

This paper presents the problem of synthesis of the time-optimal system to control the process of induction heating of a workpiece for further chipless shaping with partial condition testing in conditions of the interval indeterminacy of the object characteristics considering the constraint on the state of maximum temperature. The obtained optimal algorithm of control with feedbacks is completed with special section on which the maximum temperature is maintained on the lowest acceptable level. Equations for the feedback coefficient calculation are shown and the structure of obtained closed-loop system is given. Numerical values of the feedback coefficients are calculated for the basic data of the induction heating process given as example, graphs of control input and temperature pattern are constructed.

Keywords: *distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of characteristics of the object, the synthesis of an optimal control, constraints on the state.*

*Ilya S. Levin, Assistant.
Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*