

УДК 517.977.5

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ТОЧНОСТИ НАГРЕВА

**Ю.А. Тычинина**

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

**Аннотация.** Рассматривается задача оптимального управления процессом индукционного нагрева металлических заготовок перед операцией пластической деформации. Предлагается постановка и метод решения задачи оптимального управления режимом первоначального запуска индукционной нагревательной установки по критерию максимальной точности нагрева. Приводятся полученные результаты применительно к нагреву стальных заготовок и их анализ для исследуемых моделей процесса индукционного нагрева. Показано, что оптимальное управление по критерию точности нагрева сходится к управлению в установившемся режиме работы. Приводится анализ температурного поля по объему нагреваемой заготовки в процессе оптимального управления ее средней температурой при первоначальном запуске индукционного нагревателя по найденным выше алгоритмам.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, индукционный нагрев, деформация, переходный режим, типовой критерий качества, максимальная точность нагрева, объект с распределенными параметрами, равномерность нагрева.

### Введение

В настоящее время в металлургической промышленности находят все большее применение индукционные нагревательные установки (ИНУ) благодаря их надежности, компактности, сравнительно невысоким эксплуатационным затратам, обеспечению высокой скорости и точности нагрева заготовок.

Для эффективного функционирования технологического комплекса «нагрев – деформация» необходимо с помощью набора реализуемых управляющих воздействий решить центральную проблему организации режимов работы ИНУ, обеспечивающих достижение требуемых конечных температурных условий нагреваемых изделий с предельно возможными в условиях заданных ограничений технико-экономическими показателями.

Оптимизации работы ИНУ в установившемся режиме посвящено множество работ [1–12], между тем технология нагрева и обработки металла давлением в большинстве реальных ситуаций характеризуется существенной долей переходных процессов в общем балансе рабочего времени, связанных со сменой номенклатуры обрабатываемых изделий, изменением производительности комплекса, технологическими перерывами в его работе и т. д. В переходных режимах работы ИНУ, например в режимах первоначального запуска, запуска после технологического перерыва, смены производительности установки, смены номенклатуры нагреваемых изделий, неизбежно возникают экономические потери за счет отклонений всех характеристик в переходном процессе от характеристик

оптимальных установившихся режимов, поэтому управление работой ИНУ в нестационарных стадиях должно осуществляться с учетом минимизации этих отклонений. Специфические проблемы здесь возникают прежде всего для ИНУ непрерывного действия, так как их конструктивное исполнение предусматривает реализацию общего управляющего воздействия для всех заготовок, одновременно размещаемых в одной секции индуктора.

В связи со сказанным становится актуальной задача оптимальной организации неуставившихся стадий работы ИНУ.

### Критерий оптимальности

Критерий оптимальности в общем случае может быть представлен в виде (1), где  $\tau_r^*$ ,  $\tau_{nr}$ ,  $t_r$  – соответственно темп выдачи, конечный момент процесса нагрева и температурное поле  $r$ -ой заготовки в переходном процессе;  $\tau^*$ ,  $t^*$  – темп выдачи и конечное температурное состояние заготовок в оптимальном установившемся режиме работы комплекса;  $Z_{gr}$  – эксплуатационные затраты на нагрев и деформацию  $r$ -ой заготовки;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  – стоимостные коэффициенты;  $B_1$  – общее число заготовок в рассматриваемой партии потока нагреваемого металла. Первое слагаемое учитывает суммарную потерю производительности ИНУ в переходной стадии (суммарная «потеря темпа») за счет отклонения темпа выдачи от оптимального; второе – отклонения  $t_r$  от  $t^*$  по заданным оценкам для всех  $B_1$  заготовок; третье – себестоимость процесса обработки всей партии заготовок в переходном процессе [1]:

$$I_{H.П.} = \beta_1 \sum_{r=1}^{B_1} |\tau_r^* - \tau^*| + \beta_2 \sum_{r=1}^{B_1} \|t_r(x, y, z, \tau_{nr}) - t^*(x, y, z)\| + \beta_3 \sum_{r=1}^{B_1} Z_{gr} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Стоимость суммарной потери темпа и отклонения температурных кондиций заготовок от требуемых на выходе из индуктора обычно значительно превышает регулярные затраты, и тогда можно принять  $\beta_3 = 0$ . В установках, где регулирование темпа выдачи  $\tau^*$  нежелательно или невозможно ввиду конструктивных особенностей, следует принять  $\beta_1 = 0$ , и тогда задача сводится к задаче на максимум точности нагрева.

### Математическая модель объекта

Базовая модель температурного поля в процессе индукционного нагрева тел простейшей формы описывается линейным одномерным неоднородным уравнением теплопроводности следующего вида [1]:

$$\frac{\partial \theta(l, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \theta(l, \varphi)}{\partial l^2} + \frac{\Gamma}{l} \frac{\partial \theta(l, \varphi)}{\partial l} + W(\xi, l) u(\varphi), \quad (2)$$

$$l \in [0, 1]; \quad \varphi \in [0, \varphi^0]$$

при условиях однозначности:

$$\frac{\partial \theta(l, \varphi)}{\partial \varphi} = q(\varphi) < 0; \frac{\partial \theta(0, \varphi)}{\partial \varphi} = 0; \theta(l, 0) = \theta_0(l). \quad (3)$$

В частном случае краевых условий 3-го рода, моделирующих теплоотдачу в окружающую среду по закону конвекции, в (3) следует принять

$$q(\varphi) = Bi(\theta_C(\varphi) - \theta(1, \varphi)). \quad (4)$$

Здесь относительные значения  $\theta(l, \varphi)$ ,  $\theta_0(l)$ ,  $\theta_C(\varphi)$ ,  $q(\varphi)$  и  $u(\varphi)$  соответственно для температурного поля  $t(x, \tau)$ , начального распределения температур  $t(x, 0)$ , температуры окружающей среды  $t_C(\tau)$ , потока  $Q_{II}(\tau)$  тепловых потерь на поверхности тела и управляющего воздействия  $P(\tau)$  вводятся согласно соотношениям:

$$\begin{aligned} \theta(l, \varphi) &= \frac{t(x, \tau) - t_\delta}{P_{\max} X^2} \lambda; \quad \theta_C(\varphi) = \frac{t_c(\tau) - t_\delta}{P_{\max} X^2} \lambda; \\ q(\varphi) &= \frac{Q_{II}(\varphi)}{P_{\max} X}; \quad u(\varphi) = \frac{P(\tau)}{P_{\max}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (2)–(5) для цилиндра  $\Gamma = 1$ ;  $X$  – радиус цилиндрической заготовки;  $l$  – относительная координата по радиусу цилиндра ( $l = x / X$ );  $W(\xi, l)$  – функция, характеризующая внутренние источники тепла, которая определяется по (6) [1];  $\varphi = a\tau / X^2$  – число Фурье;  $\varphi^0$  – длительность процесса нагрева;  $Bi = \frac{\alpha X}{\lambda}$  – критерий Био;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $t_\delta$  – базовая температура;  $P_{\max}$  – максимальная мощность нагрева при полном напряжении на индукторе.

$$W(\xi, l) = \xi \frac{ber'^2(\xi \cdot l) + bei'^2(\xi \cdot l)}{ber\xi \cdot ber'\xi + bei\xi \cdot bei'\xi}. \quad (6)$$

Здесь  $ber(z)$ ,  $bei(z)$ ,  $ber'(z)$ ,  $bei'(z)$  – функции Кельвина и их первые производные;  $\xi$  – характерный параметр, определяемый как

$$\xi = X \sqrt{2} / \delta_\omega; \quad \delta_\omega = \sqrt{2 / (\mu_a \omega \sigma)}, \quad (7)$$

где  $\delta_\omega$  – глубина проникновения тока в металл;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость вещества;  $\sigma$  – удельная проводимость;  $\omega$  – циклическая частота питающего тока индуктора [1].

Можно показать [1], что общее решение уравнений теплопроводности (2)–(4) относительно температурного поля может быть представлено в виде (8)–(10):

$$\theta(l, \varphi) = \Phi(l, \varphi) + \int_0^\varphi \frac{\partial \Lambda(l, \varphi - \tau)}{\partial \varphi} u(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Здесь  $\Phi(l, \varphi)$  и переходная функция  $\Lambda(l, \varphi)$ , являющаяся реакцией объекта управления на ступенчатое единичное воздействие, для граничных условий 3-го рода принимают вид (9), (10):

$$\Phi_3(l, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi^2 K(\mu_n l) e^{-\mu_n^2 \varphi}}{(\mu_n^2 + Bi^2 + (1-\Gamma)Bi) K_1^2(\mu_n)} \left[ \theta_{0n} + \mu_n K_1(\mu_n) \int_0^{\varphi} \theta_c(\tau) e^{\mu_n^2 \tau} d\tau \right]; \quad (9)$$

$$\Lambda_3(l, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2W_n(\xi) K(\mu_n l)}{(\mu_n^2 + Bi^2 + (1-\Gamma)Bi) K^2(\mu_n)} (1 - e^{-\mu_n^2 \varphi}), \quad (10)$$

где  $W_n(\xi)$ ,  $\theta_{0n}$  – коэффициенты разложения в ряд по собственным функциям  $K(\mu_n l)$  функций  $W(\xi, l)$  в (2) и  $\theta_0(l)$  в (3).

Собственные функции находятся по формулам

$$K(\mu_n l)_{\Gamma=1} = J_0(\mu_n l); \quad K_1(\mu_n)_{\Gamma=1} = J_1(\mu_n). \quad (11)$$

В выражениях (9)–(11)  $J_0$  и  $J_1$  – соответственно функции Бесселя нулевого и первого порядка, а собственные числа  $\mu_n$  есть корни уравнения

$$BiK(\mu) - \mu K_1(\mu) = 0. \quad (12)$$

Выражения (8)–(12) позволяют вычислить температурное поле при любом допустимом управлении  $u(\varphi)$  в любой момент времени  $\varphi$  в каждой точке  $l \in [0, 1]$  по объему нагреваемого тела.

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу при первоначальном запуске нагревателя непрерывного действия применительно к типовой ситуации, при которой требуемой точности нагрева в стационарном режиме работы ИНУ отвечает неизменное во времени напряжение на индукторе. Тогда температурные перепады по объему нагреваемых заготовок обычно не превышают допустимых значений на протяжении переходных процессов при любом способе изменения управляющего воздействия с ограничением на его максимальную величину, выбираемую из условия обеспечения требуемой равномерности нагрева в стационарном режиме или определяемую предельными возможностями источника питания. В таком случае температурное поле каждой заготовки в нестационарной стадии работы ИНУ достаточно полно характеризуется в первом приближении соответствующим значением средней температуры [13].

В качестве объекта управления будем рассматривать партию, состоящую из достаточно большого числа  $B_1 > B$  одинаковых заготовок, где  $B > 1$  – число заготовок, одновременно размещающихся в индукторе методического действия (рис. 1). Для линейных или кусочно-линейных моделей температурных полей с управляющим воздействием по мощности нагрева получим в соответствии с (8) следующее описание для средней температуры  $\theta_n(\varphi)$  каждой  $n$ -й заготовки [1]:

$$\theta_n(\varphi) = F_n(\varphi - \varphi_n) + \int_{\varphi_{nn}}^{\varphi} S(\varphi - \tau) \cdot h_n(\tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau;$$

$$\varphi \in [\varphi_{nn}, \varphi_{kn}]; \quad n = \overline{1, B_1} \quad (13)$$

$$F_n(\varphi - \varphi_n) = \int_V \Phi(x, \varphi - \varphi_{nn}) dV; \quad S(\varphi) = \int_V \frac{\partial \Lambda(x, \varphi)}{\partial \varphi} dV. \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) получены на основе базовой математической модели индукционного нагрева (2)–(7) и записаны в безразмерных единицах, что существенно упрощает расчеты.

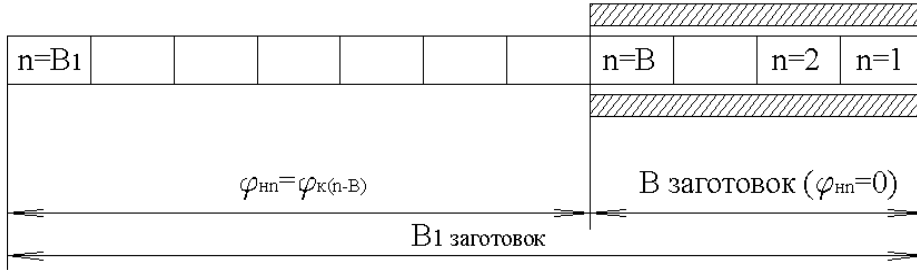


Рис. 1. Индукционная нагревательная установка методического действия

Здесь  $\varphi_{нп}, \varphi_{кп}$  – соответственно начальный и конечный моменты нагрева  $n$ -й заготовки в процессе ее перемещения через индуктор; кусочно-постоянная функция  $h_n(\tau)$  учитывает неравномерность распределения мощности по длине нагревательной установки при расчете температурного поля;  $x$  – вектор пространственных координат; интегрирование в (14) выполняется по объему  $V$  нагреваемого тела;  $\frac{\partial \Lambda(x, \varphi)}{\partial \varphi}$  – функция Грина рассматриваемого объекта с распределенными параметрами;  $\Phi(x, \varphi - \varphi_{нп})$  – функция, зависящая от начального температурного состояния загрузки. Для граничных условий третьего рода  $\Phi(x, \varphi - \varphi_{нп})$  и  $\frac{\partial \Lambda(x, \varphi)}{\partial \varphi}$  находятся по формулам (9), (10).

С учетом дискретного характера перемещения нагреваемых изделий и общего управляющего воздействия  $u(\varphi)$  на всю загрузку заготовок значения  $\varphi_{нп}$  и  $\varphi_{кп}$  связываются соотношениями

$$\varphi_{нп} = \begin{cases} 0, n = \overline{1, B}; \\ \varphi_{к(n-B)}, n > B; \end{cases} \quad \varphi_{кп} = \begin{cases} \varphi_{нп} + \sum_{m=1}^n \varphi_m^*, n = \overline{1, B}; \\ \varphi_{нп} + \sum_{m=n-B+1}^n \varphi_m^*, n > B; \end{cases} \quad (15)$$

$$\varphi_n^* = \varphi_{кп} - \varphi_{к(m-n)}, \quad (16)$$

где  $\varphi_n^*$  – темп выдачи  $n$ -й заготовки в рассматриваемом переходном процессе.

Предполагается, что в начальный момент времени индуктор заполняют  $B$  заготовок, первая из которых находится на выходе из ИНУ и будет выдана из нагревателя в конце первого шага.

В качестве управляющего воздействия будем рассматривать мощность нагрева  $u(\varphi)$ , стесненную ограничением

$$0 \leq u(\varphi) \leq u_{\max}, \quad u_{\max} \geq u_{уст}. \quad (17)$$

Величина  $u_{уст} = const$  в (17) отвечает стационарному режиму работы ИНУ для заготовок рассматриваемой партии. Поскольку в ИНУ предусматривается нагрев изделий различной номенклатуры с разной производительностью, что требует увеличения напряжения на индукторе по сравнению с  $u_{уст}$ , то, как правило, существует резерв по управляющему воздействию  $u_{\max} > u_{уст}$ .

В рамках модели (13)–(16) нагреваемые заготовки в различных переходных режимах работы отличаются от установившихся режимов начальными температурными состояниями

$$\theta_n(\varphi_{nn}) = \theta_{nn} = F_n(0), \quad n = \overline{1, B_1}, \quad (18)$$

не совпадающими для первых  $B$  заготовок с распределением температур по длине нагревателя в последующем стационарном режиме работы установки.

Для представления модели по средней температуре можно воспользоваться удовлетворительной аппроксимацией (17):

$$F_n(\varphi - \varphi_{nn}) = \theta_{nn} e^{-b_2(\varphi - \varphi_{nn})}, \quad S(\varphi) = b_1 b_2 e^{-b_2 \varphi}, \quad (19)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – коэффициенты аппроксимации [1].

Можно показать, что решением задачи на максимум точности нагрева является локально-оптимальный алгоритм управления (ЛОУ), выбираемый на каждом  $n$ -м шаге процесса из условия минимизации отклонения средней температуры заготовки на выходе из ИНУ от заданной температуры в стационарном режиме. Таким образом, ЛОУ оптимизирует процесс нагрева каждой заготовки на последнем шаге ее пребывания в индукторе независимо от влияния такого управляющего воздействия на другие заготовки, размещающиеся в ИНУ на этом шаге [1]. Будем считать, что в общем алгоритме ЛОУ можно ограничиться поиском управляющего воздействия в классе кусочно-постоянных функций  $u_n = const, \varphi \in (\varphi_{k(n-1)}, \varphi_{kn})$ .

С учетом упрощенного описания модели объекта по средней температуре критерий оптимальности (1) в задаче на максимум точности нагрева в условиях  $\varphi_n^* = \varphi^*, \forall n = \overline{1, B_1}$  принимает вид

$$I = \sum_{n=1}^{B_1} (\theta_n(\varphi_{kn}) - \theta_{зад})^v, \quad v = const > 1, \quad (20)$$

где величина  $v$  соответствует выбираемому способу оценки точности нагрева.

Процессу первоначального запуска нагревателя, загруженного холодными заготовками, соответствует в (16) начальное состояние

$$\theta_{nn} = 0, \quad n = \overline{1, B_1}. \quad (21)$$

Таким образом, задача на максимум точности нагрева в режиме первоначального запуска ИНУ сводится к поиску управления объектом (13), (14), (18),

(19) в условиях, обеспечивающих минимальное значение критерия оптимальности (20) с учетом ограничений (17) [14–16].

Применяя принцип максимума Понтрягина, можно показать [1], что  $u_{onm}(\varphi)$  «сшивается» в общем случае из особых участков, где  $u_{onm}(\varphi) = u_{oc}(\varphi)$ , и участков, на которых  $u_{onm}(\varphi) \equiv u_{\max}$  либо  $u_{onm}(\varphi) \equiv 0$ , причем для каждой конкретной задачи форма  $u_{onm}(\varphi)$  должна быть установлена из дополнительных соображений, связанных с особенностями рассматриваемого вида переходного режима. На особых участках заготовки в большинстве случаев достигают требуемых температурных кондиций на выходе из ИНУ.

Для переходного режима первоначального запуска с начальным состоянием (21) оптимальное управление имеет

$$u_{onm}(\varphi) = \begin{cases} u_{\max}, \varphi \in (0, \varphi_{\kappa(j-1)}); \\ u_{oc}(\varphi), \varphi > \varphi_{\kappa(j-1)}. \end{cases} \quad (22)$$

Здесь на первых  $j-1$  шагах при максимальной мощности нагрева выдается с минимально возможным отклонением от требуемых кондиций минимальное количество некондиционных заготовок при  $\theta_n(\varphi_{\kappa n}) < \theta_{\text{зад}}$ , а на следующих шагах особое управление  $u_{oc}(\varphi)$  выбирается из условия выдачи всех остальных заготовок начиная с  $j$ -й с требуемой конечной температурой  $\theta_n(\varphi_{\kappa n}) = \theta_{\text{зад}}$ ,  $n \geq j$  [1].

Тогда, полагая оптимальное управление постоянным в пределах каждого шага и используя формулы для суммы геометрической прогрессии, можно получить замкнутое выражение для  $u_{onm}(\varphi)$  в виде [1]

$$\begin{aligned} u_{onm}(\varphi) &= u^{(n)} = \text{const}, \varphi_{\kappa(n-1)} < \varphi < \varphi_{\kappa n}, \forall n = \overline{1, B_1}; \varphi_{\kappa 0} = 0; \\ u^{(n)} &= u_{\max}, n = \overline{1, j-1}; \\ u^{(j)} &= \frac{1}{b_1} [\theta_{\text{зад}} - b_1 u_{\max} (1 - e^{-b_2(j-1)\varphi^*}) e^{-b_2\varphi^*}] (1 - e^{-b_2\varphi^*})^{-1}; \\ u^{(n)} &= \frac{1}{b_1} \theta_{\text{зад}}, n = \overline{j+1, B}; \\ u^{(rB+j)} &= \frac{\theta_{\text{зад}}}{b_1 M} (1 - e^{-b_2 r B \varphi^*}) + u^{(j)} e^{-b_2 r B \varphi^*}, r = 0, 1, 2, \dots; \\ u^{(B+r)} &= \frac{\theta_{\text{зад}}}{b_1 M} (1 - e^{-b_2(\sigma+1)B\varphi^*}), r = (\sigma-1)B + j + 1, (\sigma-1)B + j + 2, \dots, \sigma B; \\ \sigma &= 1, 2, \dots; \\ u^{(B+r)} &= \frac{\theta_{\text{зад}}}{b_1 M} (1 - e^{-b_2(\sigma+1)B\varphi^*}) + u_{\max} e^{-b_2(\sigma+1)B\varphi^*}, \\ r &= \sigma B + 1, \sigma B + 2, \dots, \sigma B + j - 1; \sigma = 0, 1, 2, \dots; \\ M &= 1 - e^{-b_2 B \varphi^*}. \end{aligned} \quad (23)$$

### Решение задачи на максимум точности нагрева на примере нагрева стальных заготовок

Рассмотрим случай оптимизации процесса первоначального запуска ИНУ методического действия с постоянным темпом выдачи стальных цилиндрических заготовок по критерию максимальной точности нагрева при  $\theta_{зад} = 1.8$ ;  $u_{max} = 1$ ;  $B = 5$ ;  $b_1 = 10.098$ ;  $b_2 = 0.195$ ;  $\varphi^* = 0.395$ .

Характер ЛОУ и средняя температура первых нескольких заготовок на выходе из индуктора представлены на рис. 2, 3.

Как видно из рис. 2, оптимальное управление в переходном режиме работы сходится к управлению в установившемся режиме работы ИНУ. Как видно из рис. 3 для рассматриваемой ИНУ, только первые три заготовки оказываются в конечный момент нагрева некондиционными, а остальные соответствуют заданным температурным кондициям.

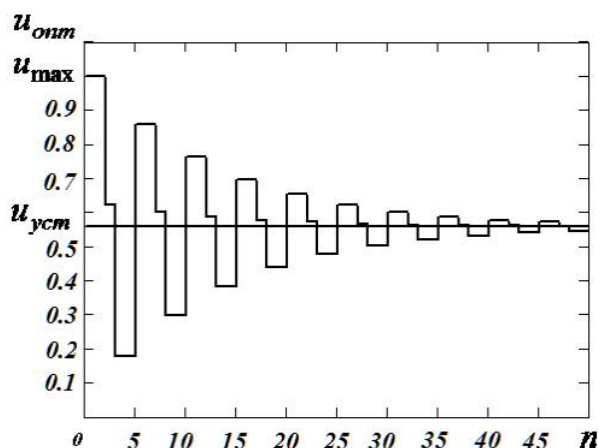


Рис. 2. Характер локально-оптимального управления в режиме первоначального запуска по критерию максимума точности нагрева

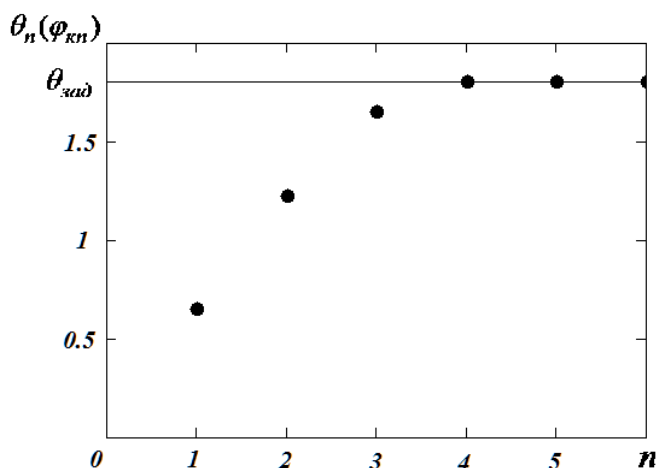


Рис. 3. Средняя температура на выходе из ИНУ первых  $n$  заготовок

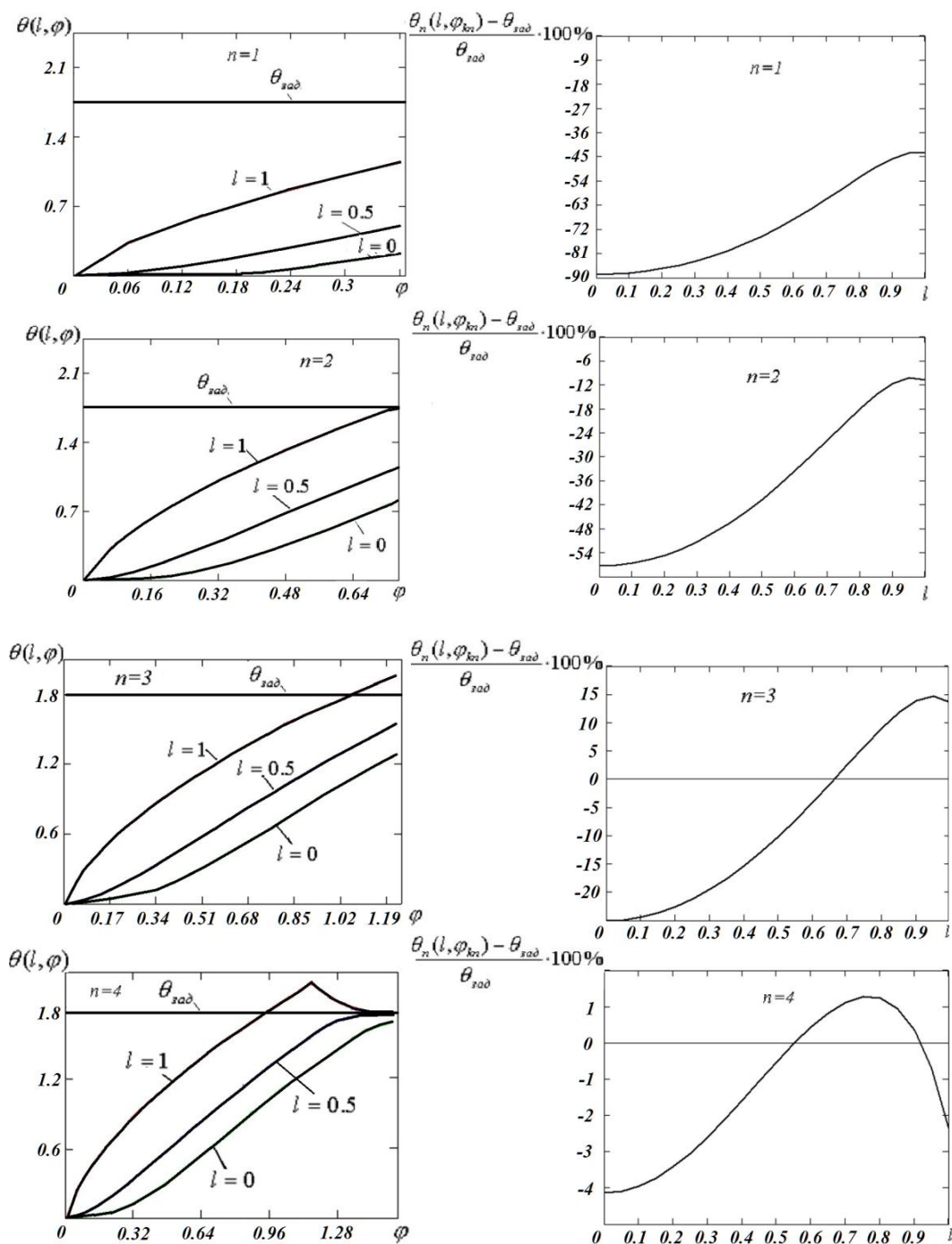


Рис. 4. Динамика изменения температур и относительная погрешность нагрева по радиусу для первых 4 заготовок

В работе проводился анализ температурного поля по объему нагреваемой заготовки в процессе оптимального управления ее средней температурой при первоначальном запуске ИНУ по найденным выше алгоритмам. Расчеты проводились для модели распределенного объекта (8)–(10). Рис. 4 иллюстрируют динамику изменения температуры во времени и относительную погрешность радиальной неравномерности нагрева для 1–4-й заготовок.

Как видно из рис. 4, наибольшие погрешности нагрева по радиусу возникают на первых некондиционных заготовках, погрешность нагрева остальных заготовок незначительна.

### Выводы

Полученные в работе результаты показывают, что для режимов первоначального запуска ИНУ локально-оптимальное управление по критерию максимума точности нагрева сходится к управлению в установившемся режиме работы. При оптимальном управлении по критерию максимальной точности нагрева выдача  $j$ -1 недогретых заготовок компенсируется уменьшением времени выхода на заданные параметры стационарного процесса.

Анализ точности нагрева в режиме первоначального запуска с учетом распределенного характера температурного поля нагреваемого объекта при оптимальном управлении средней температурой по критерию максимальной точности показал, что для первых  $j$ -1 заготовок необходимо ограничивать радиальный перепад температуры в процессе нагрева в переходном режиме работы ИНУ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
2. Артур М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3 (55). – С. 7–16.
3. Плешивецкая Ю.Э., Шарапова О.Ю. Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева состояния // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 4 (32). – С. 171–181.
4. Зимин Л.С., Леоненко А.С. Электромагнитные и тепловые эффекты при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – С. 162–166.
5. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 1 (53). – С. 179–182.
6. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 128–135.
7. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 203–208.
8. Афиногентов А.А., Деревянов М.Ю. Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 162–168.
9. Плешивецкая Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 47–58.

10. *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И.* Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 148–163.
11. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Induction Heating Processes. – London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2007.
12. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
13. *Плешивцева Ю.Э., Осипова Ю.А.* Оптимальное управление переходными режимами работы индукционных установок по экономическому критерию // Системный анализ в проектировании и управлении: Тр. X Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 71–72.
14. *Осипова Ю.А.* Оптимизация по комплексному критерию эффективности переходных режимов работы индукционной нагревательной установки методического действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – № 41. – С. 26–31.
15. *Рапопорт Э.Я., Осипова Ю.А.* Оптимизация режимов смены производительности и номенклатуры индукционной нагревательной установки методического действия по критерию суммарной потери тепла выдачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – № 42. – С. 166–170.
16. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э., Осипова Ю.А.* Локально-оптимальные алгоритмы управления переходными режимами работы индукционных нагревательных установок непрерывного действия // Мехатроника, автоматизация, управление: Тр. II Всеросс. науч.-техн. конф. Уфа, 2005. – С. 65–70.

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2019 г.*

## OPTIMAL CONTROL BY TRANSIENT MODE OF OPERATION OF INDUCTION HEATING INSTALLATIONS TO CRITERIA OF MAXIMUM HEATING ACCURACY

***Yu.A. Tychinina***

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

**Abstract.** This paper presents the problem of optimal control of induction heating process of the metal billets to the next operation of pressure treatment. Proposed formulation and the method of solution of the problem of optimal control of start induction heating installation by criteria of maximum heating accuracy. The results and their analysis for the investigated models of induction heating process are given. It is shown that optimal control by the criterion of accuracy of heating converges to control in the steady state. The analysis of the temperature field by the volume of the heated workpiece in the process of optimal control of its average temperature during the initial start of the induction heater according to the above algorithms is presented.

**Keywords:** optimal control, induction heating process, deformation, transient mode, typical quality criteria, maximum heating accuracy, object with distributed parameters, the uniformity of heating.

---

*Yu.A. Tychinina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

## REFERENCES

1. *Rapoport E.Ya.* Optimization of process induction heating of metals. – M.: Metallurgy, 1993. – 279 p. (In Russian).
2. *Artur M.H.* Synthesis of optimal control algorithms for process of induction heating of steel // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2017. – Vol. 3 (55). – pp. 7–16. (In Russian).
3. *Pleshivtseva Yu.E., Sharapova O.Yu.* Energy-saving algorithms of optimal control of induction heating processes // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2011. – Vol. 4 (32). – pp. 171–181. (In Russian).
4. *Zimin L.S., Leonenko A.S.* Electromagnetic and thermal effects induction heating // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2018. – Vol. 2 (58). – pp. 162–166. (In Russian).
5. *Zimin L.S., Yeghiazaryan A.S.* Key problems during use induction heaters // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2017. – Vol. 1 (53). – pp. 179–182. (In Russian).
6. *Zimin L.S., Yeghiazaryan A.S.* Features of induction heating for the deformation // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2015. – Vol. 3 (47). – pp. 128–135. (In Russian).
7. *Zimin L.S., Yeghiazaryan A.S.* Features of induction heating of aluminium alloys // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2016. – Vol. 2 (50). – pp. 203–208. (In Russian).
8. *Afinogentov A.A., Derevyanov M.Yu.* Efficient strategies for operation of production complex «induction heating – metal hot forming» // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2015. – Vol. 3 (47). – pp. 162–168. (In Russian).
9. *Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya., Nikanorov A.N., Nacke B., Popov A.V.* Induction heating installations design based on multi-criteria optimization // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2016. – Vol. 2 (50). – pp. 47–58. (In Russian).
10. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Dyakonov A.I.* Two-dimensional problem of optimal with respect to typical quality criteria control of through induction heating processes // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2014. – Vol. 2 (42). – pp. 148–163. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Induction Heating Processes. – London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2007.
12. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal control of temperature modes of induction heating processes. – M.: The science, 2012. – 309 p. (In Russian).
13. *Pleshivtseva Yu.E., Osipova Yu.A.* Optimal control of transient modes of induction heating processes by economic criteria // *System analysis in design and management. SpB.: Polytechnic University, 2006, pp. 71–72.* (In Russian).
14. *Osipova Yu.A.* Optimization with respect to quality complex-criteria by transient modes of induction heating installations methodical action // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2006. – Vol. 41. – pp. 26–31. (In Russian).
15. *Rapoport E.Ya., Osipova Yu.A.* Optimization of modes change capacity and nomenclature of induction heating installations methodical action respect to criteria loss rate // *Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences.* – 2006. – Vol. 42. – pp. 166–170. (In Russian).
16. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E., Osipova Yu. A.* Locally optimal control algorithms by transient modes of induction heating installations continuous action // *Mechatronics, automation, control, Ufa 2005, pp. 65–70.* (In Russian).