

УДК 519.6+620.179

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ

© 2013 В. А. Медникова

Самарский государственный технический университет

В статье рассмотрена задача оптимизации проходных индукционных нагревательных установок (ИНУ) с непрерывной выдачей металлических полуфабрикатов для последующей обработки давлением. Сформулированы и решены задачи оптимального проектирования односекционного и двухсекционного нагревателя минимальной длины.

*Индукционная нагревательная установка, оптимальное проектирование, стационарные режимы работы, альтернативный метод, температурное распределение, точность нагрева, нелинейная численная модель.*

### Введение

В настоящее время для нагрева чёрных и цветных металлов перед операциями пластического деформирования широкое применение находят индукционные нагреватели периодического и непрерывного действия, отвечающие требованиям производства по совокупности основных технико-экономических показателей. На практике широкое применение нашли индукционные нагревательные установки непрерывного действия с постоянной скоростью  $V$  перемещения заготовок в индукторе (рис.1). Как правило, величина  $V$  заранее фиксируется требуемой производительностью технологического комплекса «нагрев – обработка давлением».

Основной особенностью управляющих воздействий в задачах оптимального управления непрерывными процессами индукционного нагрева металла по сравнению с периодическими ПИНМ, применительно к движению потока нагреваемо-

го металла с постоянной скоростью, является их неизменность во времени. Такие воздействия можно трактовать либо как развёртки по длине индуктора оптимальных программ изменения во времени соответствующих управлений процессом непрерывного нагрева, либо как некоторый набор постоянных значений параметров нагревательной установки. Они представляют собой проектные решения ИНУ, реализуемые на объекте до начала его функционирования и не меняющиеся в процессе его работы [6]. Для ИНУ заданного конструктивного исполнения управление осуществляется путём выбора мощности нагрева (напряжения, тока источника питания) для отдельных секций. Для ИНУ на стадии проектирования в качестве управляющих воздействий могут быть выбраны такие элементы проектных решений, как число витков и размеры секций нагревателя [6].

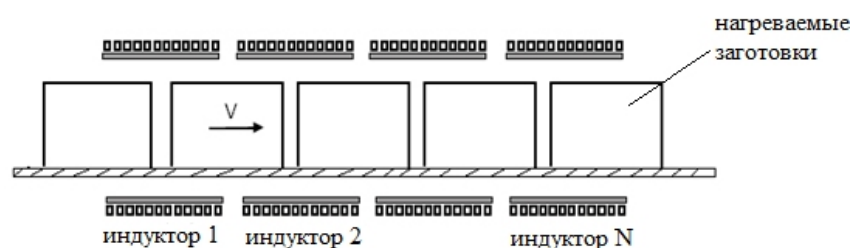


Рис. 1. ИНУ непрерывного действия

При решении задачи оптимизации стационарных режимов непрерывного индукционного нагрева использовалась численная нелинейная модель взаимосвязанных нелинейных процессов в электромагнитных и тепловых полях, описывающая поведение температурного поля и позволяющая учесть все основные особенности реальных объектов. Численная модель реализована на базе конечно-элементного программного пакета ANSYS. Алгоритм моделирования разработан в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (Германия, г. Ганновер). В статье рассматриваются задачи проектирования нагревателя минимальной длины, которые сводятся к выбору числа, размеров и мощностей управляемых секций индуктора в идеализированных условиях возможности равномерного распределения максимальной интенсивности тепловыделения по длине каждой из секций.

### 1. Математическая модель процесса индукционного нагрева

В общем случае пространственно-временное распределение температуры по объёму металлического изделия в процессе индукционного нагрева описывается системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей [1, 2]. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля внутри проводящего материала могут быть представлены в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = 0, \quad (4)$$

где  $\bar{H}$  – вектор напряжённости магнитного поля;  $\bar{J}$  – плотность тока проводимости;  $\bar{D}$  – вектор электрической индукции (электрического смещения);  $t$

– время;  $\bar{E}$  – вектор напряжённости электрического поля. Для получения решения представленной системы (1)-(4) относительно всех неизвестных, число которых превышает число уравнений, необходимо дополнить её следующими базовыми соотношениями, выполняющимися в линейных изотропных средах [3]:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}; \quad (5)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}; \quad (6)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}. \quad (7)$$

Принимая во внимание (5) и (7), уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E} + \frac{\partial(\epsilon \bar{E})}{\partial t}. \quad (8)$$

При индукционном нагреве металлических заготовок с частотой питающего тока меньше, чем 100 МГц, как правило, плотность индуцированного тока проводимости намного больше плотности тока смещения. Поэтому вторым слагаемым в правой части равенства (8) можно пренебречь. Таким образом, уравнение (8) принимает вид:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E}. \quad (9)$$

Уравнение Фурье, описывающее в общем виде температурное поле в нагреваемой заготовке, имеет вид:

$$c(t)g(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(I(t) \operatorname{grad} T) + c(t)g(t)V \operatorname{grad} T = -\operatorname{div}[EH]. \quad (10)$$

Здесь  $c(t), g(t), I(t)$  – соответственно удельная теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла;  $V$  – вектор скорости перемещения заготовки;  $t$  – время.

Для осесимметричной нелинейной двумерной модели взаимосвязанных

электромагнитного и температурного полей в процессе непрерывного индукционного нагрева заготовки цилиндрической формы конечной длины температурное поле определяется уравнением:

$$c(T)g(T)V\frac{\partial T(l,y)}{\partial l} = \frac{1}{l}\frac{\partial}{\partial l}\left(I(T)l\frac{\partial T(l,y)}{\partial l}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(I(T)\frac{\partial T(l,y)}{\partial y}\right) + W(l,y); \quad (11)$$

$$0 < l < R, 0 < y < L$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial T(0,y)}{\partial l} = 0; I(T)\frac{\partial T(R,y)}{\partial l} = a(T_c - T(R,y));$$

$$-I(T)\frac{\partial T(l,0)}{\partial y} = a(T_c - T(l,0)); \quad (12)$$

$$I(T)\frac{\partial T(l,L)}{\partial y} = a(T_c - T(l,L)).$$

Здесь  $l, y$  – радиальная и осевая пространственные координаты соответственно;  $L$  – длина цилиндра;  $R$  – радиус;  $c(T), \gamma(T), \lambda(T)$  – соответственно удельная теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла;  $a(T)$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;  $T_c$  – температура окружающей среды.

Решение нелинейных систем уравнений (1)-(10) может быть получено численными методами.

На базе конечно-элементного универсального программного пакета ANSYS разработана численная двумерная модель процесса индукционного нагрева цилиндрической заготовки в ИНУ непрерывного действия. Алгоритм моделирования позволяет осуществлять совместное решение электромагнитной и тепловой задач с учётом температурной зависимости теплофизических свойств материала в процессе нагрева при наличии тепловых потерь за счёт конвекции и излучения. Разработанная модель позволяет исследовать физические

закономерности температурных полей в переходных и стационарных режимах нагрева заготовок. Результаты, полученные при моделировании в программном пакете ANSYS, сравнивались с расчётами модели, реализованной в специализированном программном пакете FLUX [5]. Результаты исследования и верификации модели показали, что на всех этапах численного анализа температурное распределение качественно совпадает на всём протяжении процесса при незначительном количественном различии. Таким образом, модель может быть использована в оптимизационных процедурах как для решения задач оптимального управления многомерными температурными полями в процессе непрерывного индукционного нагрева, так и для оптимального проектирования ИНУ.

## 2. Постановка задачи минимизации длины проходного нагревателя

Как показано в [7], задача обеспечения заданной точности нагрева на выходе проходной ИНУ минимально возможной длины в условиях принятых ограничений является аналогом задачи оптимального по быстрдействию управления непрерывным процессом индукционного нагрева заготовки с той же точностью. Таким образом, основная задача на минимум времени нагрева заготовки до требуемой температуры с заданной точностью сводится в данном случае к проектированию индуктора минимальной длины. Входным параметром численной модели электромагнитных и тепловых процессов является ток источника питания, который однозначно связан с распределением мощности нагрева по длине ИНУ и поэтому может рассматриваться в качестве управляющего воздействия. Ограничение на пространственное управление может быть представлено в форме:

$$0 \leq I(y) \leq I_{\max}, 0 < y \leq L. \quad (13)$$

Условие достижения требуемой конечной температуры  $T^* = const$  на выходе из нагревателя с заданной точностью нагрева  $e_0$  может быть записано в виде:

$$\max_{l \in [0; R]} |T(l, L) - T^*| \leq e_0. \quad (14)$$

Можно сформулировать следующую задачу на минимум длины индуктора, которая является аналогом задачи оптимального по быстродействию управления непрерывным процессом нагрева. Задача оптимального управления процессом непрерывного индукционного нагрева сводится к поиску такого переменного по длине индуктора управляющего воздействия  $I(y) = I_{opt}(y)$ , при котором требование (14) для конечного распределения температуры, описываемого уравнением (11) с граничными условиями (12), выполняется при минимально возможной в условиях (13) длине индуктора  $L$ . Как показано в [6-8], оптимальное управляющее воздействие для рассматриваемого класса многомерных нелинейных моделей представляет собой релейную функцию, которая может быть записана в следующем виде:

$$I_{opt}(y) = \frac{I_{max}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], \sum_{i=1}^{j-1} \Delta_i < y < \sum_{i=1}^j \Delta_i, \quad j = \overline{1, N}. \quad (15)$$

Оптимальное управление представляет собой чередующиеся по длине нагревателя участки с максимальным значением тока и его отсутствием протяжённостью  $\Delta_j = y_j - y_{j-1}, j = \overline{1, N}$ . В рамках рассматриваемых здесь модельных постановок задачи оптимизации это означает, что нагреватель оптимального конструктивного исполнения следует спроектировать в виде последовательно расположенных по направлению движения заготовок чередующихся друг с другом отдельных секций с максимальной

интенсивностью нагрева и полным его отсутствием. В итоге, согласно алгоритму (15),  $I_{opt}(y)$  задаётся с точностью до числа  $N$  и значений параметров  $\Delta_j$ , по существу являющихся длинами соответствующих секций ИНУ. Это означает, что оптимальная конструкция нагревателя заведомо задаётся с точностью до числа  $N$  и протяжённостей (размеров)  $\Delta_j, j = \overline{1, N}$  таких секций, к определению которых и сводится в результате рассматриваемая задача. Учитывая параметрическое представление управляющего воздействия в виде (15), общая длина проектируемого нагревателя представляет собой сумму искомых параметров:  $L = \sum_{j=1}^N \Delta_j$ . При этом температурное поле также может быть представлено в виде параметрической зависимости  $T(l, L, \Delta)$ . Тогда задача оптимального проектирования редуцируется к специальной задаче математического программирования вида [7]:

$$\begin{cases} I(\Delta) = \sum_{j=1}^N \Delta_j \rightarrow \min_{\Delta}; \Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N); & (16) \\ \Phi(\Delta) = \max_{\substack{l \in [0, R] \\ y \in [0, L]}} |T(l, L, \Delta) - T^*| \leq e_0 & (17) \end{cases}$$

на минимум функции (16)  $N$  переменных  $\Delta_j$  с ограничениями, порождаемыми требованием (14) обеспечения заданной точности нагрева  $e_0$  для всех  $l \in [0, R], y \in [0, L]$  и заменяемыми одним условием (17), сформулированным для максимума отклонения радиального распределения температуры  $T(l, y, \Delta)$  от  $T^*$  на выходе из индуктора при  $y = L$ . При этом температурное распределение  $T(l, y, \Delta)$  находится с помощью описанной выше численной ANSYS-модели процесса индукционного нагрева. Аналогии с закономерностями температурного распределения в процессах оптимального по

быстродействию индукционного нагрева приводят к сохранению в рассматриваемой задаче (16), (17) соответствующей этим процессам оптимальной формы кривой радиального распределения температур на выходе нагревателя и его альтернансных свойств. Это означает, что решение задачи полубесконечной оптимизации (16), (17) относительно всех характеристик оптимального процесса, включая число  $N$  и величины  $\Delta_j$ ,  $j=1, \overline{N}$ , составляющих вектора параметров  $\Lambda = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$ , однозначно определяющего искомое управляющее воздействие, может быть получено альтернансным методом [7].

### 3. Решение задачи проектирования проходного нагревателя минимальной длины

Альтернансный метод решения сформулированной задачи параметрической оптимизации базируется на специальных альтернансных свойствах вектора  $\Lambda^{(N)}$  оптимальных решений задачи полубесконечной оптимизации (16), (17), являющихся аналогом известных условий экстремума в теории нелинейных чебышевских приближений и дополнительной информации о конфигурации пространственного распределения результирующего температурного поля  $T(l, y, \Lambda^{(N)})$  в конце оптимального процесса нагрева управляемой величины [7]. Оптимальный по быстродействию процесс индукционного нагрева сводится, согласно (15), к совокупности  $N$  чередующихся интервалов нагрева с максимально допустимой интенсивностью и последующего выравнивания температур. При этом число  $N$  таких интервалов заранее не известно и должно быть найдено вместе с их длительностями в зависимости от требуемой точности  $\epsilon_0$  приближения к заданной конечной температуре. Условие (14), накладываемое на распределение температуры  $T(l, L, \Lambda^0)$ , означает, что абсолютное от-

клонение  $|T(l, L, \Lambda^0) - T^*|$  конечной температуры оптимального процесса от требуемой не должны превышать заданной величины  $\epsilon_0$  для всех значений пространственных координат  $l \in [0; R]$ . Основное свойство результирующего радиального температурного распределения  $T(l, L, \Lambda^0)$  состоит в том, что число таких точек в поперечном сечении нагреваемой заготовки на выходе индуктора, в которых достигаются предельные допустимые абсолютные отклонения  $\epsilon_0$  конечной температуры от требуемой, всегда оказывается не меньшим числа искомых параметров оптимального процесса [7]. Метод позволяет сконструировать систему уравнений, замкнутую относительно всех неизвестных параметров оптимального процесса. Решение данной системы приводит к решению рассматриваемой задачи оптимизации. Алгоритмы и правила конструирования расчётных систем рассмотрены в работах [7, 9, 10].

#### 3.1 Проектирование односекционного нагревателя минимальной длины

Рассмотрим решение задачи минимизации длины индукционного нагревателя, состоящего из одной активной секции. Исходные данные по конструктивным характеристикам нагревателя приведены в табл. 1. Теплофизические параметры заготовки и теплоизоляции задавались как известные функции от температуры, характеризующие типовые свойства стали С 40.

Основываясь на альтернансных свойствах температурных полей в конце процессов нагрева, при максимально достижимой точности нагрева  $\epsilon_{\min}^{(1)}$  в классе однопараметрических управляющих воздействий, можно установить форму кривой распределения температуры по радиусу цилиндрической заготовки на выходе из нагревателя  $y = L$  [7], которая будет иметь вид, представленный на рис.2.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

|   |       |
|---|-------|
| Материал заготовки  | Сталь |
| Диаметр заготовки, мм   | 100   |
| Заданная температура заготовки, °C                                | 1250  |
| Начальная температура заготовки, °C                               | 20    |
| Температура окружающей среды, °C                                  | 20    |
| Скорость движения заготовки в стационарном режиме нагрева, мм/сек | 5,67  |
| Производительность, кг/ч  | 1250  |
| Частота питающего тока, Гц  | 1000  |
| Внутренний диаметр катушки индуктора, мм                          | 180   |

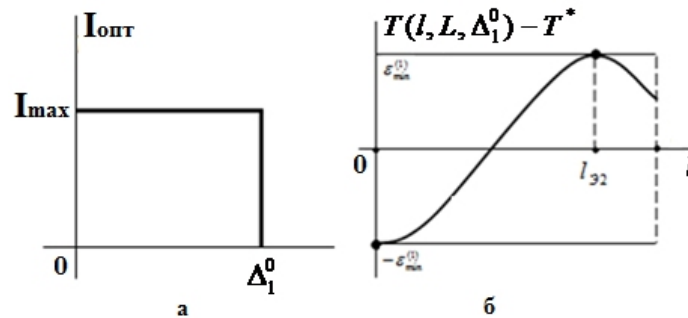


Рис. 2. Оптимальное управление (а) и форма кривой  $T(l, L, \Delta_1^0) - T^*$  результирующего распределения температуры (б) при  $e_0 = e_{\min}^{(1)}$

Тогда соответствующая расчётная система уравнений может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} T(0, L, \Delta_1^0) - T^* = -e_{\min}^{(1)}; \\ T(l_{32}, L, \Delta_1^0) - T^* = +e_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(l_{32}, L, \Delta_1^0)}{\partial l} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Решение этой системы относительно всех искомым параметров, в роли которых выступают оптимальная длина индуктора, равная  $\Delta_1^0$ , минимакс  $e_{\min}^{(1)}$  и координата точки температурного максимума  $l_{32}$  позволяет получить решение исходной задачи. Система (18) решалась для ряда максимальных значений тока индуктора  $I_{\max}$  в ограничении (13): 4071, 4368, 4761, 5302, 6114 А. На рис. 3 представлена зависимость минимальной длины индуктора  $\Delta_1^0$  от максимально допустимого уровня тока  $I_{\max}$ . На рис. 4 показано влияние величины максимального значения тока на величину  $e_{\min}^{(1)}$ . Рис. 5 иллюстрирует зависимость максимального значения темпе-

ратуры заготовки в процессе нагрева от величины оптимальной длины индуктора.

Как видно из представленных результатов, наибольшему значению максимального тока на индукторе соответствует наименьшее значение оптимальной длины индуктора. В то же время при минимальных длинах активной секции индуктора наблюдается сильный перегрев заготовок до 122 °C ( $\Delta_1^0 = 0.9\text{м}$ ,  $I_{\max} = 4070.6\text{А}$ ), что недопустимо по технологии. Из приведённых результатов следует, что увеличение значения тока питания приводит к уменьшению длины односекционного нагревателя, но при этом существенно падает точность нагрева. Получаем, что в односекционном нагревателе точность нагрева 10-30 °C, отвечающая типовым технологическим требованиям, диктуемым последующими стадиями пластической деформации металла, может быть достигнута далеко не во всех случаях. Поэтому для повышения точности нагрева необходимо использовать нагреватели более сложной конструкции, реализующие многоинтервальные алгоритмы управления.

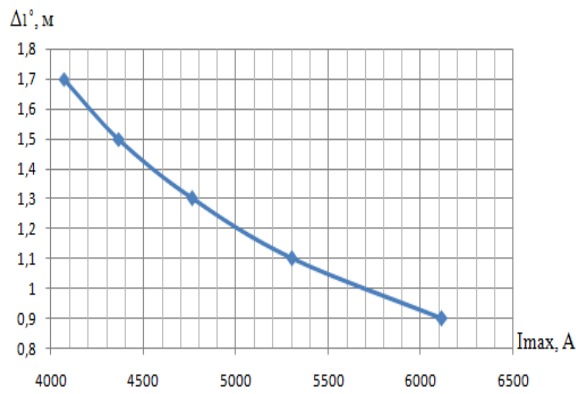


Рис. 3. Зависимость минимальной длины односекционной индукционной установки от максимальной величины питающего тока для случая  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(1)}$

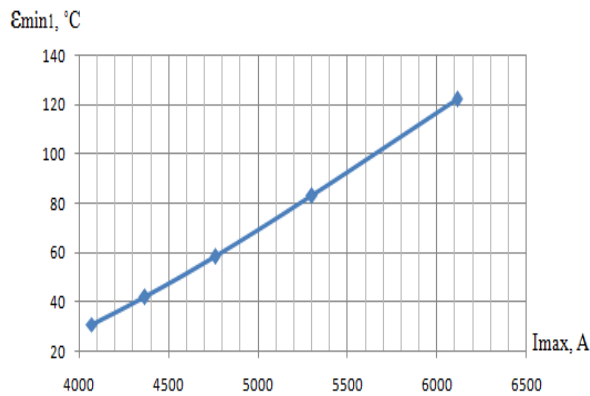


Рис. 4. Зависимость максимально достижимой точности нагрева  $\epsilon_{\min}^{(1)}$  от максимальной величины питающего тока

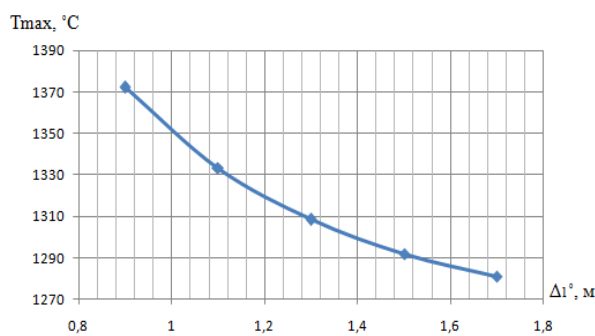


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры  $T_{\max}, ^\circ\text{C}$ , достигнутой в процессе нагрева, от минимальной длины односекционной индукционной установки для случая  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(1)}$

### 3.2 Проектирование двухсекционного нагревателя минимальной длины

В случае, если индукционная нагревательная установка состоит из двух секций, то, согласно алгоритму (15), в первой по ходу движения секции нагрев должен осуществляться при значении тока индуктора  $I_{\max}$ , а во второй должно происходить выравнивание температур при  $I(y) = 0$  (рис. 6). Вторая секция индуктора в данных условиях представляет собой «термостат», где осуществлять нагрев не требуется. Длина индуктора ограничивается размерами первой секции и задача сводится к минимизации длины всей нагревательной установки. Как и для случая одноинтервального управления, в качестве управляющего воздействия выбираем ток источника питания, стеснённый ограничением (13). В данном случае двухпараметрическое управление имеет вид (15) при значении  $N=2$ . В качестве оптимизируемых параметров  $\Delta^0 = (\Delta_1^0, \Delta_2^0)$  выступают длины активной и пассивной секций, а минимально достижимое в данном классе управлений абсолютное отклонение распределения температуры в поперечном сечении заготовки от заданного значения представляет собой мини-макс  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$  [4]. Согласно альтернативным свойствам температурных полей в конце оптимальных процессов нагрева при  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$  [7] форма кривой распределения температуры по радиусу цилиндрической заготовки на выходе из нагревателя будет иметь вид, представленный на рис. 6.

Для случая  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$  получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} T(0, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -e_{\min}^{(2)}; \\ T(l_{\text{э}2}, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = e_{\min}^{(2)}; \\ T(R, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -e_{\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial T(l_{\text{э}2}, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial l} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Решение системы (19) относительно всех неизвестных, в роли которых высту-

пают оптимальные длины секций индуктора  $\Delta_1^0$  и  $\Delta_2^0$ , минимум  $e_{\min}^{(2)}$  и промежу-

точная неизвестная  $l_{32}$ , позволяет решить ранее поставленную задачу [4].

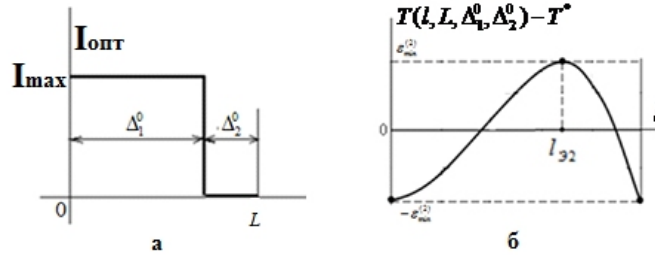


Рис. 6. Оптимальное управление (а) и форма кривой  $T(l, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^*$  результирующего распределения температуры (б) при максимальной точности нагрева  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$  в классе двухпараметрических управляющих воздействий

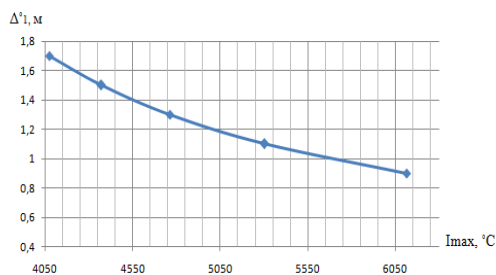


Рис. 7. Зависимость длины  $\Delta_1^0$  активной секции двухсекционного нагревателя от величины максимального тока источника питания  $I_{\max}$  для случая  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$

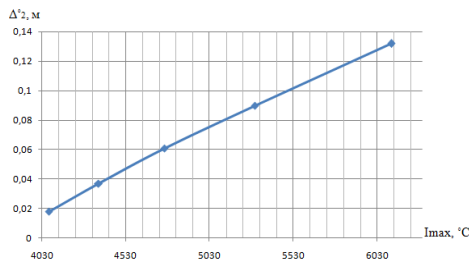


Рис. 8. Зависимость длины  $\Delta_2^0$  пассивной секции двухсекционного нагревателя от величины максимального тока источника питания  $I_{\max}$  для случая  $e_0 = e_{\min}^{(2)}$

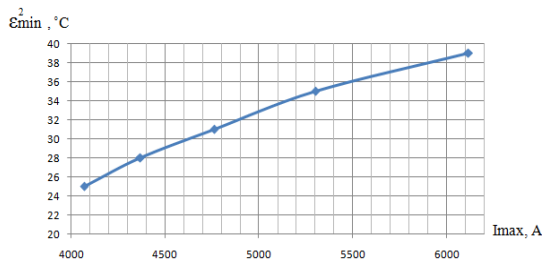


Рис.9. Зависимость максимально достижимой точности нагрева  $e_{\min}^{(2)}$  от максимальной величины питающего тока

На рис. 7–9 представлены результаты серии расчётов для ряда максимальных значений тока  $I_{\max} = 4071, 4368, 4761, 5302, 6114$  А в ограничении (13).

Из представленных зависимостей видно, что минимальная длина активной секции с максимальным значением тока на индукторе  $I_{\max}$  возрастает от 0,9 м (для  $I_{\max} = 6114$  А) до 1,7 м (для  $I_{\max} = 4071$  А). При этом минимальная длина пассивной зоны, в которой происходит выравнивание температур, соответственно убывает от 0,132 до 0,018 м. При двухинтервальном управлении удалось существенно повысить точность нагрева. Сравнительные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение результатов расчётов при одно- и двухинтервальном управлении

| Длина активной секции, м | $e_{\min}^{(1)}, ^\circ\text{C}$ | $e_{\min}^{(2)}, ^\circ\text{C}$ |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0,9 м                    | 122                              | 39                               |
| 1,1 м                    | 83                               | 35                               |
| 1,3 м                    | 58                               | 31                               |
| 1,5 м                    | 42                               | 28                               |
| 1,7 м                    | 31                               | 25                               |

Представленные результаты показывают значительное увеличение точности нагрева в двухсекционном нагревателе за счёт выравнивания температуры в пассивной секции во всех рассмотренных случаях.



**Библиографический список**

1. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи [Текст] / А.М. Вайнберг. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
3. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева [Текст] / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
4. Плешивцева, Ю.Э. Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Ю. Э. Плешивцева. – Самара, 2009. – 416 с.
5. Плешивцева, Ю.Э. Сравнительный анализ программных продуктов ANSYS и Cedrat FLUX на примере моделирования проходной индукционной нагревательной установки [Текст] / Ю.Э. Плешивцева, О.Ю. Шарапова, В.А. Медникова // XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» – Самара, 2011. – С. 78-84.
6. Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева [Текст] / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева – М.: Наука, 2012. – 309 с.
7. Рапопорт, Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла [Текст] / Э.Я.Рапопорт. – М.: Metallurgia, 1993. – 309 с.
8. Шарапова, О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / О. Ю. Шарапова. – Самара, 2011. – 178 с.
9. Rapoport E.Ya. Optimal Control of Nonlinear Objects of Engineering Thermophysics [Text] / E.Ya. Rapoport, Yu.E.Pleshivtseva. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing – 2012. – Vol. 48. – No 5. – P. 429-437.
10. Рапопорт, Э.Я. Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами [Текст] / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева // Автометрия. – 2009. – Т.45. – №5. – С. 103-112.

**OPTIMAL DESIGN OF AN INDUCTION HEATER OF MINIMUM LENGTH**

© 2013 V. A. Mednikova

Samara State Technical University

The paper presents the task of optimization of through-type induction heating installations (IHI) with a continuous delivery of metal semi-finished products for further plastic working. The task of optimal design of one-section and two-section heaters of minimum length has been formulated and solved.

*Induction heating installation, optimal design, stationary modes, alternance method, temperature distribution, heating accuracy, nonlinear numerical model.*

**Информация об авторе**

**Медникова Вероника Александровна**, аспирант, Самарский государственный технический университет. E-mail: [kotlveronika@yandex.ru](mailto:kotlveronika@yandex.ru). Область научных интересов: моделирование электротехнологических процессов, оптимальное управление системами с распределенными параметрами, оптимизация процессов индукционного нагрева.

**Mednikova Veronika Alexandrovna**, postgraduate student, Samara State Technical University. E-mail: [kotlveronika@yandex.ru](mailto:kotlveronika@yandex.ru). Area of research: modeling of electro-technological processes, optimal control of distributed parameter systems, optimization of induction heating processes.