

Плешивцева Юлия Эдгаровна, Попов Антон Валерьевич, Дьяконов Артем Игоревич  
**ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ УПРАВЛЕНИЕ  
ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА**

Объектом исследования является процесс периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением. Построена двумерная численная модель процесса в конечно-элементном пакете FLUX для взаимосвязанного электромагнитного и теплового анализа. Сформулированы и решены задачи оптимального по критериям быстродействия и минимума расхода энергии управления. Решение задач проведено на базе альтернативного метода оптимизации, разработанного в Самарском государственном техническом университете.

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2013/2/38.html](http://www.gramota.net/materials/1/2013/2/38.html)

**Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.**

Источник

**Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2013. № 2 (69). С. 135-142. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2013/2/](http://www.gramota.net/materials/1/2013/2/)

**© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)  
Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

«Градостроительное нормирование в период...» (определяется студентом совместно с преподавателем, исходя из логики развития нормативного материала) требует подробного изучения и контент-анализа содержания ПСЗРИ, составления хронологических таблиц, затем выделения и характеристики на основе сделанного отбора нормативного материала, направлений градостроительной политики того или иного периода.

Подобные темы фактически исключают для студентов использование готовых аналитических материалов, компилятивность работ, знакомят студентов помимо собственно сути, содержания регулирующих норм, с исторической юридической техникой, эволюцией правовой системы России.

В связи с вышеизложенным, наиболее целесообразным для дальнейшего развития теоретической базы курса, практической методической работы по организации деятельности студентов считаю следующее:

- расширение в рамках курса времени, отводимого на лекционную форму работы;
- более широкое внедрение в преподавание таких нестандартных для высшей школы форм как экскурсия, знакомство с графическими материалами;
- проведение практической части курса в форме работы преподавателя и студента над индивидуальными отчетными проектами;
- разработка перечня тем студенческих проектов, сильнее связанных с регионалистикой, краеведением;
- разработка соответствующих учебных материалов (учебного пособия, хрестоматии, набора графических материалов).

#### Список литературы

1. Анисимов Ю. П., Юшкова Н. Г. Градостроительное право - новая отрасль в системе российского права // Право и политика. 2008. № 9. С. 2105-2113.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон № 191-ФЗ от 29.12.2004 г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Свод законов Российской империи. СПб., 1913. Т. XII. Уставы государственного благоустройства. Строительный устав. С. 254-302.

УДК 621.785; 669.14; 519.6

#### Технические науки

*Объектом исследования является процесс периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед обработкой давлением. Построена двумерная численная модель процесса в конечно-элементном пакете FLUX для взаимосвязанного электромагнитного и теплового анализа. Сформулированы и решены задачи оптимального по критериям быстродействия и минимума расхода энергии управления. Решение задач проведено на базе альтернативного метода оптимизации, разработанного в Самарском государственном техническом университете.*

*Ключевые слова и фразы:* периодический индукционный нагрев; оптимальное управление; быстродействие; минимальные энергозатраты; численная модель; альтернативный метод.

**Плешивцева Юлия Эдгаровна**, д. техн. н., доцент

**Попов Антон Валерьевич**

**Дьяконов Артем Игоревич**

Самарский государственный технический университет

yulia\_pl@mail.ru; antonsam93@mail.ru; dyakonovartem@yandex.ru

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА<sup>©</sup>

Актуальность решения задач оптимального управления процессами индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед обработкой давлением напрямую связана с постоянно возрастающей потребностью в повышении экономической эффективности производственных процессов. Проблема достижения предельных качественных показателей процессов нагрева может быть решена с помощью оптимизации режимов работы и конструктивных характеристик периодических индукционных нагревательных установок (ИНУ) по соответствующим критериям оптимальности. В статье формулируются задачи оптимального управления процессом периодического индукционного нагрева металла по критериям быстродействия и минимума расхода энергии. Данные задачи решаются на базе альтернативного метода оптимизации систем с распределенными параметрами. Процесс индукционного нагрева металла (ПИНМ) описывается численной двумерной математической моделью, разработанной в конечно-элементном пакете FLUX (CEDRAT).

Приводятся примеры расчета оптимальных по быстродействию и энергозатратам процессов сквозного нагрева стальных цилиндрических заготовок. Проводится сравнительный анализ полученных результатов.

### Математическая модель периодического процесса индукционного нагрева

При периодическом индукционном нагреве заготовка помещается в нагревательную установку на время, которое необходимо для достижения требуемых температурных кондиций перед дальнейшими технологическими операциями обработки давлением. Данный процесс повторяется с периодической выдачей нагретых изделий из индуктора.

Процесс периодического индукционного нагрева заготовки цилиндрической формы описывается взаимосвязанной нелинейной системой уравнений для электромагнитного и температурного полей [3]:

$$\frac{\partial(\mu_a(H(l, y, t), T)H(l, y, t))}{\partial t} - \frac{1}{l} \frac{\partial}{\partial l} \left( l \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(l, y, t)}{\partial l} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\sigma(T)} \frac{\partial H(l, y, t)}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$c(T)\gamma(T) \frac{\partial T(l, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{l} \frac{\partial}{\partial l} \left( \lambda(T)l \frac{\partial T(l, y, t)}{\partial l} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(l, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{1}{\sigma(T)} \left( \frac{\partial H(l, y, t)}{\partial l} \right)^2 \quad (2)$$

$$0 < l < R; 0 < y < L; 0 < t \leq t^0$$

дополняемой граничными условиями:

$$\frac{\partial H(0, y, t)}{\partial l} = 0; H(R, y, t) = H_L; H(l, 0, t) = H_{R1}; H(l, L, t) = H_{R2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial l} = 0; \lambda(T) \frac{\partial T(R, y, t)}{\partial l} = -\alpha(T)(T(R, y, t) - T_a) \quad (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(l, 0, t)}{\partial y} = \alpha(T)(T(l, 0, t) - T_a); \lambda(T) \frac{\partial T(l, L, t)}{\partial y} = -\alpha(T)(T(l, L, t) - T_a)$$

где  $l, y$  - радиальная и осевая пространственные координаты, соответственно;  $L$  - длина цилиндра,  $R$  - радиус,  $H(l, y, t)$  - напряженность магнитного поля;  $\mu_a(H, T)$  - абсолютная магнитная проницаемость;  $T(l, y, t)$  - пространственно-временное распределение температуры по объему заготовки,  $\sigma(T)$ ,  $c(T)$ ,  $\gamma(T)$ ,  $\lambda(T)$  - удельные значения электропроводности, теплоемкости, плотности и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла, соответственно;  $\alpha(T)$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;  $T_a$  - температура окружающей среды.

Решение сложной системы взаимосвязанных нелинейных двумерных уравнений (1)-(4) можно реализовать только численными методами. Для численного моделирования ИНУ используется конечно-элементный специализированный программный пакет FLUX, предназначенный для многопараметрического электромагнитного и теплового анализа. Алгоритм совместного решения электромагнитной и тепловой задач представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую гармонический электромагнитный анализ и переходный тепловой анализ (Рис. 1) [1; 6; 7].



Рис. 1. Алгоритм моделирования в пакете FLUX

### Постановка задач оптимального по энергозатратам и быстродействию управления ИНУ периодического действия

Для решения задачи оптимального управления (ЗОУ) нагревом металлических цилиндрических заготовок периодический процесс индукционного нагрева металла, описываемый уравнениями (1)-(2) с крайними условиями (3)-(4), рассматривается в качестве объекта управления с распределенными параметрами, состояние которого характеризуется пространственно-временным распределением температуры  $T(l, y, t)$  по объему

нагреваемого тела [2; 4]. В качестве сосредоточенного управляющего воздействия выступает напряжение индуктора  $u(t)$ , которое связано нелинейной функцией  $f(H(l, y, t), T(l, y, t))$  с напряженностью магнитного поля на поверхности нагреваемого тела и подчинено ограничению:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max}, t \in (0; t^0) \quad (5)$$

В качестве критерия оптимальности, обеспечивающего максимальную производительность ИНУ, может рассматриваться время процесса нагрева заготовок до требуемых температурных кондиций:

$$J_1 = \int_0^{t^0} t dt = t^0 \rightarrow \min \quad (6)$$

Во многих случаях основную статью в составе себестоимости процессов нагрева представляют энергетические затраты (расход энергии на нагрев), которые в этом случае и следует рассматривать в качестве критерия оптимальности:

$$J_2 = \int_0^{t^0} P(t) dt \rightarrow \min \quad (7)$$

где  $P(t)$  - закон изменения во времени потребляемой ИНУ мощности, связанной квадратичной зависимостью с напряжением на индукторе  $u(t)$ , что позволяет записать критерий (7) в виде:

$$J_3 = \int_0^{t^0} u^2(t) dt \rightarrow \min \quad (8)$$

В качестве начальных условий задается распределение температуры по объему цилиндра в момент времени  $t = 0$ :

$$T(l, y, t) = T(l, y, 0) = T_0(l, y), l \in [0, R]; y \in [0, L] \quad (9)$$

которое в простейшем случае можно принять равномерным:  $T_0(l, y) = const$ .

Точность приближения результирующего температурного распределения к требуемой температуре  $T^*$  оценивается по максимальной величине  $\varepsilon_0$  абсолютного температурного отклонения в пределах пространственной области, занимаемой объектом, т.е. в равномерной чебышевской метрике:

$$\max_{\substack{l \in [0; R] \\ y \in [0; L]}} |T(l, y, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0 \quad (10)$$

Задача оптимального по быстродействию управления ИНУ периодического действия сводится к задаче поиска такого переменного во времени управляющего воздействия  $u(t) = u_{\text{opt}}(t)$ , стесненного ограничением (5), которое обеспечивает перевод объекта (1)-(4) из начального состояния (9) в заданное целевое множество (10) при минимальном значении критерия оптимальности (6) [4].

Задача оптимального по энергозатратам управления ИНУ периодического действия формулируется аналогично задаче быстродействия применительно к критерию оптимальности (8).

#### Решение задач оптимального по быстродействию и энергозатратам управления ИНУ периодического действия

Для рассматриваемой нелинейной двумерной модели ПИНМ справедлив вывод о релейном характере изменения во времени оптимального по критериям (6) и (8) управления  $u_{\text{opt}}(t)$ , что позволяет записать его  $\Delta^{(N)}$  - параметризованное представление в виде кусочно-постоянной функции времени [2; 4; 6]:

$$u_{\text{opt}}(t) = \frac{u_{\max}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], \sum_{i=1}^{j-1} \Delta_i < t < \sum_{i=1}^j \Delta_i, j = \overline{1, N} \quad (11)$$

попеременно принимающей свои предельно допустимые, согласно (5), значения и однозначно задаваемой с точностью до числа  $N$  и длительностей  $\Delta_i, i = \overline{1, N}$  интервалов своего постоянства, выступающих в роли искоемых параметров, зависящих только от требуемой точности нагрева  $\varepsilon_0$  в (10).

При управляющем воздействии вида (11) температурное поле в конце процесса нагрева при  $t = t^0$  в любой точке  $(l, y), l \in [0; R], y \in [0; L]$  при заданной начальной температуре и известных тепловых потерях зависит только от величин  $\Delta_i, i = \overline{1, N}$ , т.е. описывается зависимостью  $T(l, y, \Delta)$ .

Для простоты решения оптимизационной задачи ограничимся на первом этапе заданием требования (10) к конечному температурному распределению в одном поперечном сечении, например, в центре заготовки ( $y = L/2$ ).

В этом случае задача оптимального управления по критерию быстродействия сводится к определению длительностей  $\Delta_i, i = \overline{1, N}$  чередующихся интервалов нагрева и выравнивания температур, которые обеспечивают выполнение условия

$$\Phi(\Delta) = \max_{\substack{l \in [0; R] \\ y \in [0; L]}} |T(l, \Delta) - T^*| \leq \varepsilon_0 \quad (12)$$

за минимально возможное время, очевидно, равно сумме всех  $\Delta_i$ . Тогда в роли критерия оптимальности выступает сумма:

$$\sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta} \quad (13)$$

В итоге проблема с формальной точки зрения сводится к задаче математического программирования на минимум целевой функции (13)  $N$  переменных  $\Delta_i$  с заданным ограничением на множество допустимых значений  $\Delta_i$  в форме неравенства (12).

Поскольку при управлении по напряжению энергопотребление происходит только на интервалах с максимально допустимым значением управляющего воздействия  $u_{omn}(t) = u_{max}$ , величина энергозатрат, описываемых критерием (8), может быть оценена эквивалентным критерием, представляющим собой сумму длительностей нечётных интервалов управляющего воздействия. Это позволяет произвести редукцию исходной ЗОУ к задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) на минимум функции

$$\sum_{i=1,3,5,\dots,N_1}^{N_1} \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta} \quad N_1 = N \text{ для нечётных } N, N_1 = N - 1 \text{ для чётных } N \quad (14)$$

конечного числа  $N$  переменных  $\Delta_i, i = \overline{1, N}$  с бесконечным числом ограничений, записываемых в форме требования (12), предъявляемого к конечному состоянию объекта.

Задачи полубесконечной оптимизации (13)-(12) и (14)-(12) могут быть решены с помощью альтернансного метода оптимизации систем с распределенными параметрами с учетом известных качественных характеристик температурных полей в конце оптимального процесса нагрева, рассчитываемых по численной двумерной электротепловой модели, разработанной в программном пакете FLUX при управлении вида (12).

Оптимальное управление  $\Delta^0 = (\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0)$ , являющееся решением рассматриваемой задачи быстрого действия (13)-(12), отличается от всех других  $N$ -интервальных управлений вполне определёнными длительностями  $\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0$  интервалов постоянства. Оптимальному значению  $\Delta^0$  вектора  $\Delta$  отвечает, в свою очередь, пространственное распределение температур  $T(l, \Delta^0)$  в конце оптимального процесса, удовлетворяющее ограничению (12).

Оказывается, что температурное распределение  $T(l, \Delta^0)$  отличается от всех других конечных состояний  $T(l, \Delta)$  при  $\Delta \neq \Delta^0$  рядом свойств, на которых и базируется альтернансный метод. Основное свойство результирующего распределения  $T(l, \Delta^0)$  состоит в том, что число  $K$  точек  $l_j^0$  по объёму нагреваемой заготовки (т.е. на отрезке  $[0, R] \ni l$  в рамках принятого допущения о пренебрежении неравномерностью температурного распределения по длине заготовки), в которых достигаются предельные допустимые абсолютные отклонения конечной температуры  $T(l, \Delta^0)$  от требуемой  $T^*$ , равные  $\varepsilon_0$ , всегда оказывается не меньшим числа  $N$  искомым параметров оптимального процесса. При этом максимально допустимые отклонения  $T(l_j^0, \Delta^0) - T^*$  конечной температуры от требуемой в (12) достигаются с разными знаками для каждой пары подряд расположенных точек  $l_j^0$ , т.е. эти отклонения оказываются знакопеременными в точках  $l_j^0$ , где  $0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq R$ , т.е. обладают альтернансным свойством.

Данные утверждения, доказанные в [3; 4], позволяют записать следующую систему соотношений:

$$\begin{cases} T(l_j^0, \Delta^0) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, j = 1, 2, \dots, K; \Delta^0 = (\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0), \psi = \pm 1 \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq R; K = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon_{min}^{(N)} < \varepsilon < \varepsilon_{min}^{(N-1)} \\ N + 1, \text{ если } \varepsilon = \varepsilon_{min}^{(N)} \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

Здесь  $\varepsilon_{min}^{(N)}$  - предельно достижимые отклонения результирующей температуры от заданной в классе управляющих воздействий с  $N$  интервалами постоянства, составляющие убывающий ряд неравенств:

$$\varepsilon_{min}^{(1)} > \varepsilon_{min}^{(2)} > \dots > \varepsilon_{min}^{(N)} > \varepsilon_{min}^{(N+1)} > \dots > \varepsilon_{min}^{(N^*)} = \varepsilon_{inf} \geq 0 \quad (16)$$

где  $\varepsilon_{inf}$  - предельно достижимая точность нагрева в классе кусочно-постоянных управлений вида (11) с любым числом интервалов постоянства.

Можно доказать [Там же], что для рассматриваемой модели процесса нагрева вида (1)-(4) число  $N$  интервалов постоянства  $u_{omn}(t)$  однозначным образом связывается с заданным значением  $\varepsilon_0$  следующим правилом:

$$N = S \text{ для всех } \varepsilon_0 : \varepsilon_{min}^{(S)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{min}^{(S-1)} \quad (17)$$

устанавливающим  $N$  по месту  $\varepsilon_0$  в последовательности неравенств (16).

Тогда на основе известных физических представлений о пространственной конфигурации температурного распределения  $T(l, \Delta^0)$  в конце оптимального по быстрдействию управления свойства (15) вместе с

условиями существования экстремумов разности  $T(I, \Delta^0) - T^*$  во всех точках, кроме граничных, могут быть записаны в виде системы уравнений. Эта система замкнута относительно всех неизвестных параметров оптимального процесса, и её решение является решением исходной задачи быстрогодействия.

Применение альтернансного метода в задаче на минимум расхода энергии в процессе нагрева отличается существенной спецификой [4]. В данной задаче остаются справедливыми базовые свойства результирующего температурного распределения в конце оптимального по энергозатратам процесса, характеризуемого вектором  $\Delta^0$  оптимальных решений ЗПО (14), (12), который в общем случае отличается от соответствующего вектора оптимальных решений в задаче быстрогодействия, редуцируемой к ЗПО (13), (12).

Однако в задаче на минимум расхода энергии уже не имеют место альтернансное свойство результирующего температурного распределения в конце оптимального процесса и установленное в альтернансом методе правило (17) выбора числа  $N$  интервалов постоянства оптимального по энергозатратам управления. Кроме того, известные выводы о пространственной конфигурации температурного распределения в конце оптимального по быстродействию управления и следующие из них обоснования для конструирования расчётных систем уравнений нельзя распространить на энергосберегающие алгоритмы управления [4; 6; 7].

#### Расчет оптимальных по быстродействию и энергозатратам процессов нагрева стальных цилиндрических слитков

В качестве конкретного примера рассмотрим процесс сквозного индукционного нагрева на частоте 2300 Гц стальных цилиндрических слитков диаметром 105 мм и длиной 900 мм до температуры  $1200^\circ\text{C}$ . Максимальное напряжение  $u_{\max} = 470\text{ V}$ . Электромагнитные и теплофизические параметры процесса задаются согласно следующим соотношениям:

$$B(H) = \mu_0 H + 2 \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 - 4H_a(1-0.4)}}{2(1-0.4)} T; \quad H_a = \mu_0 H \frac{600T - 1}{2} \quad (18)$$

$$\text{где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$\rho(T) = 2.5 \cdot 10^{-7} (1 + 0.004T) \quad (19)$$

$$\lambda(T) = 40(1 - 0.25 \cdot 10^{-3} T) \quad (20)$$

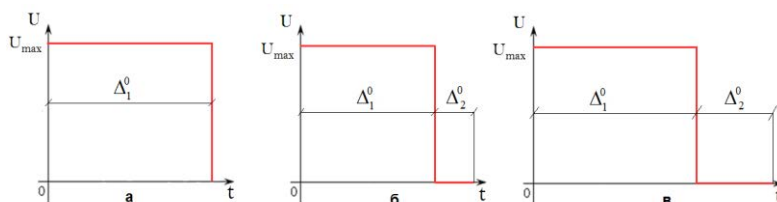
$$\rho C_p(T) = 0.468 \cdot 10^{-7} - 0.078 e^{-\frac{T}{500}} + 0.12 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1}{30\sqrt{2}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T-760}{30} \right)^2} \quad (21)$$

где  $B(H)$  - кривая намагничивания [Тл],  $\rho(T)$  - удельное сопротивление [Ом],  $\lambda(T)$  - теплопроводность  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ ,  $\rho C_p(T)$  - объемная плотность энергии  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$  [5].

Задача оптимального быстрогодействия была решена для трех различных значений точности нагрева:  $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{\min}^{(2)}$  и  $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ . Для точности нагрева, соответствующей  $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ , согласно альтернансному методу, оптимальное управление имеет один интервал нагрева с максимальным значением напряжения  $u_{\text{omm}}(t) = u_{\max}$  и длительностью  $\Delta_1^0$ . Для двух других случаев оптимальное управление является двухинтервальным, когда после первого интервала нагрева при  $u_{\text{omm}}(t) = u_{\max}$  следует интервал выравнивания температуры при  $u_{\text{omm}}(t) = 0$  длительностью  $\Delta_2^0$ . Соответствующие системы уравнений могут быть записаны в виде (22) для  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ , (23) - для  $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$  и (24) - для  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ . Общий вид алгоритмов управления представлен на Рис. 2, а типовые формы конечных радиальных температурных распределений показаны на Рис. 3.

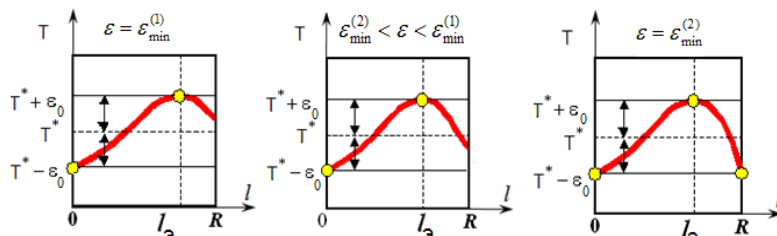
При решении ЗОУ по критерию минимума расхода энергии необходимо учитывать, что при точности нагрева  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$  алгоритм оптимального управления значительно отличается от оптимальных по быстродействию алгоритмов управления [4]. Вместо одноинтервального алгоритма в задаче быстрогодействия оптимальное по энергозатратам управление является двухинтервальным и представляет собой интервал нагрева длительностью  $\Delta_1^0$  при  $u_{\text{omm}}(t) = u_{\max}$  и интервал выравнивания температуры длительностью  $\Delta_2^0$  при  $u_{\text{omm}}(t) = 0$  (Рис. 4а). Можно показать, что в данном случае результирующее температурное распределение в конце процесса, оптимального по расходу энергии (Рис. 5а), характеризуется предельно допустимым недогревом в центре нагреваемой заготовки и на её поверхности. При этом максимальная конечная температура не достигает своего предельно допустимого значения [Там же]. Алгоритмы, оптимальные по быстродействию и энергозатратам, совпадают лишь при точности нагрева  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ , которой соответствует единственно возможная пространственная конфигурация результирующего температурного распределения (Рис. 5б), по-прежнему характеризуемая предельно допустимым недогревом в центре нагреваемой заготовки и на её поверхности. Однако при этом максимальная конечная температура, которая достигается в некоторой внутренней точке, достигает предельно допустимого значения [Там же]. Системы уравнений для каждого случая рассматриваемых значений точностей нагрева  $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$  и  $\varepsilon_{\min}^{(2)}$  записываются в виде (25), (26), (27), соответственно.

$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)} \\ T(l_3, \Delta_1^0) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(1)} \\ \frac{\partial T(l_3, \Delta_1^0)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (22)$$



**Рис. 2.** Алгоритмы управления в задаче оптимального быстрогодействия: а)  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ ; б)  $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ ; в)  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

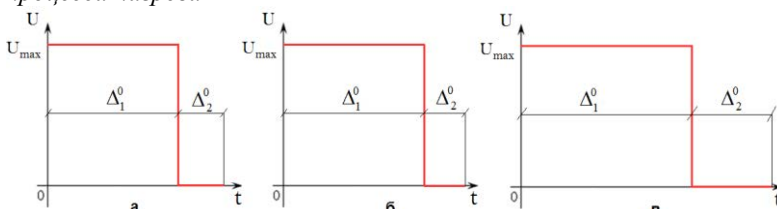
$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_0 \\ T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = \varepsilon_0 \\ \frac{\partial T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (23)$$



**Рис. 3.** Типовые формы радиального распределения температуры в конце оптимального по быстродействию процесса нагрева

$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)} \\ T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(2)} \\ T(1, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)} \\ \frac{\partial T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

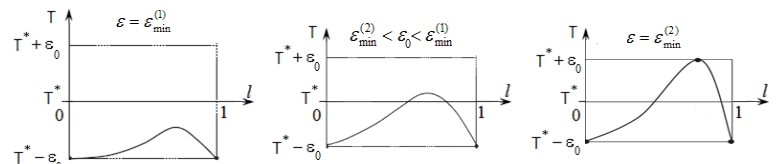
$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)} \\ T(1, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)} \end{cases} \quad (25)$$



**Рис. 4.** Алгоритмы управления в задаче оптимального по расходу энергии процесса нагрева: а)  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ ; б)  $\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$ ; в)  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_0 \\ T(1, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_0 \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} T(0, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)} \\ T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(2)} \\ T(1, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)} \\ \frac{\partial T(l_3, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (27)$$



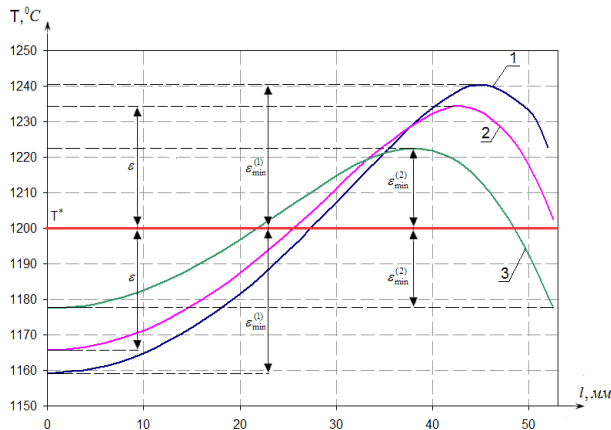
**Рис. 5.** Типовые формы радиального распределения температуры в конце оптимального по расходу энергии процесса нагрева

Результаты решения задач быстрогодействия (значения точности нагрева  $\varepsilon_0$ , длительности и интервалов нагрева  $\Delta_1^0$  и остывания  $\Delta_2^0$ ) и минимального энергопотребления (значения точности нагрева  $\varepsilon_0$ , длительности интервалов нагрева  $\Delta_1^0$  и остывания  $\Delta_2^0$ , значение индуцируемой в заготовке мощности  $E_{инд.}$ ), полученные с помощью численной модели, представлены в Таблице 1.

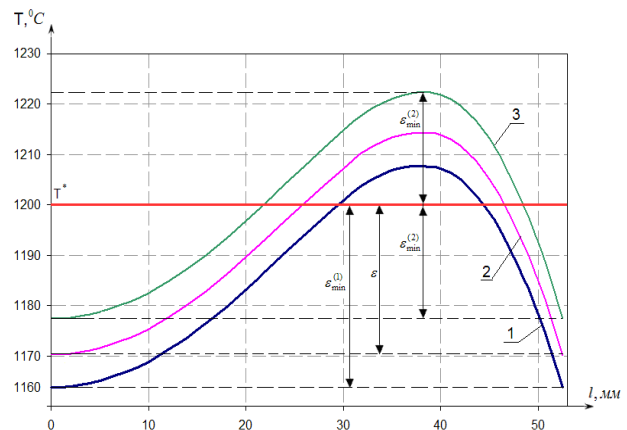
**Табл. 1.** Результаты решения задач быстрогодействия и минимального энергопотребления

	Параметры оптимального по быстродействию процесса нагрева				Параметры оптимального по расходу энергии процесса нагрева			
	$\varepsilon_0, ^\circ C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд.}, кДж$	$\varepsilon_0, ^\circ C$	$\Delta_1^0, сек$	$\Delta_2^0, сек$	$E_{инд.}, кДж$
$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$	40	515	-	24736	40	507	10	24336
$\varepsilon_{\min}^{(2)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$	34,3	517	3	24739	29,8	515	9	24577
$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$	22,5	520	9	24696	22,5	520	9	24696

Конечные радиальные температурные распределения для каждого из рассмотренных случаев решения задачи оптимального быстрогодействия представлены на Рис. 6, задачи минимума расхода энергии - на Рис. 7.



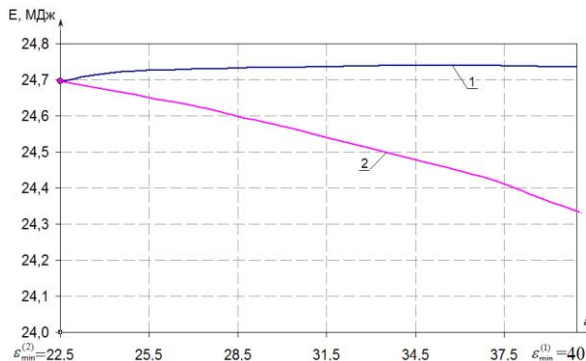
**Рис. 6.** Радиальные температурные распределения в конце оптимального по быстрдействию процесса нагрева: 1)  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(1)}$ ; 2)  $\epsilon_{\min}^{(2)} < \epsilon_0 < \epsilon_{\min}^{(1)}$ ; 3)  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$



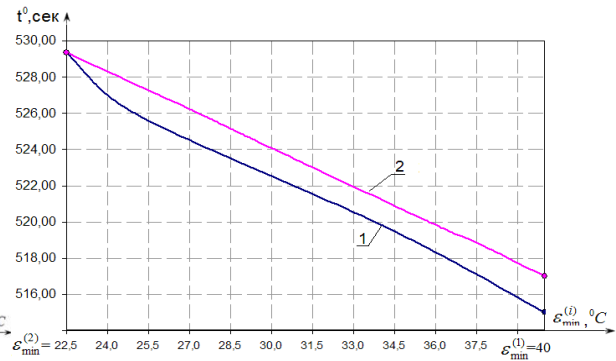
**Рис. 7.** Радиальные температурные распределения в конце оптимального по расходу энергии процесса нагрева: 1)  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(1)}$ ; 2)  $\epsilon_{\min}^{(2)} < \epsilon_0 < \epsilon_{\min}^{(1)}$ ; 3)  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$

На Рис. 8 и Рис. 9 приведены некоторые сравнительные результаты расчета процессов нагрева, оптимальных по критериям быстрдействия и расхода энергии, при изменении требуемой точности нагрева  $\epsilon_0$  в интервале от  $\epsilon_{\min}^{(2)}$  до  $\epsilon_{\min}^{(1)}$ . Представленные данные подтверждают сделанный ранее вывод о том, что именно в этом диапазоне изменения  $\epsilon_0$  оптимальные алгоритмы управления по указанным критериям различаются, совпадая лишь на границе при  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$ . Таким образом, при  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$  полученный алгоритм оптимального управления является универсально-оптимальным, т.е. оптимальным по обоим рассматриваемым критериям.

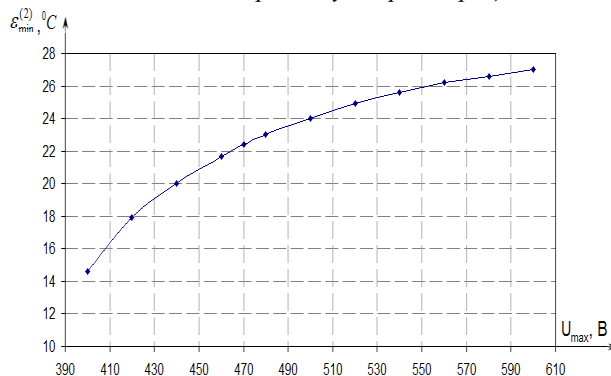
Для случая  $\epsilon_0 = \epsilon_{\min}^{(2)}$  были рассчитаны параметры оптимальных как по критерию быстрдействия, так и по критерию минимума расхода энергии процессов нагрева для различных значений  $u_{\max}$  в ограничении (5). Полученные результаты представлены на Рис. 10-11.



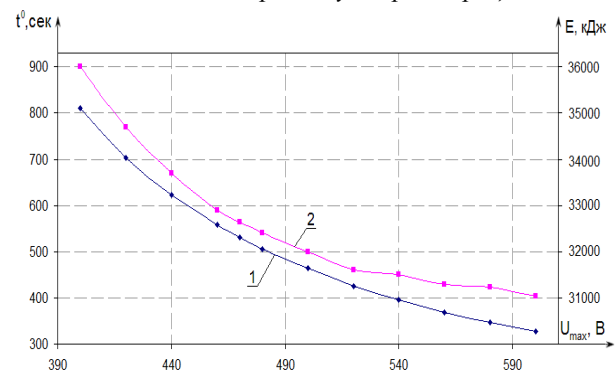
**Рис. 8.** Зависимость расхода энергии от заданной точности нагрева при  $\epsilon_{\min}^{(2)} \leq \epsilon_0 \leq \epsilon_{\min}^{(1)}$ :  
1 - в оптимальном по быстрдействию процессе;  
2 - в оптимальном по расходу энергии процессе



**Рис. 9.** Зависимость длительности процесса от заданной точности нагрева при  $\epsilon_{\min}^{(2)} \leq \epsilon_0 \leq \epsilon_{\min}^{(1)}$ :  
1 - в оптимальном по быстрдействию процессе;  
2 - в оптимальном по расходу энергии процессе



**Рис. 10.** Зависимость предельно достижимой в классе двухинтервальных управлений точности нагрева  $\epsilon_{\min}^{(2)}$  от заданного ограничения на  $u_{\max}$



**Рис. 11.** Зависимости длительности процесса нагрева (1) и расхода энергии (2) на нагрев заготовки от заданного ограничения на  $u_{\max}$



### Заключение

Полученные зависимости наглядно показывают, что при переходе от оптимальных по быстродействию алгоритмов к алгоритмам, оптимальным по энергосбережению, достигаются возрастающие с уменьшением точности нагрева выигрыш по расходу энергии и потери по производительности процесса.

Представленные результаты выявляют тенденцию увеличения длительности процесса и расхода энергии, затрачиваемой на нагрев, при возрастании точности индукционного нагрева для различных значений напряжения источника питания.

### Список литературы

1. Плешивцева Ю. Э., Шарапова О. Ю. Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Самара: СамГТУ, 2011. № 4 (32). С. 172-180.
2. Рапопорт Э. Я. Оптимальное по быстродействию управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Элементы и системы оптимальной идентификации и управления технологическими процессами. Тула, 1996. С. 81-91.
3. Рапопорт Э. Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 279 с.
4. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с.
5. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М.: Физматгиз, 1959. 356 с.
6. Шарапова О. Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2011. 22 с.
7. Шарапова О. Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 7 (28). С. 180-185.
8. Cedrat Flux [Электронный ресурс]. URL: [www.cedrat.com/en/software/flux.html](http://www.cedrat.com/en/software/flux.html) (дата обращения: 13.01.2013).

УДК 616-01

### Медицинские науки

*Статья раскрывает необходимость проведения комплексной лабораторной оценки тестирования на антитела к вирусу иммунодефицита человека (ВИЧ). Основное внимание в работе акцентировано на возможном получении в процессе лабораторного исследования ложноположительных иммунных реакций, вызванных присутствием в сыворотке крови человека антител, перекрёстно реагирующих с белками ВИЧ. Сделан вывод о том, что интерпретация лабораторных результатов в области сомнительных значений может оказаться достаточно субъективной, и для постановки диагноза ВИЧ-инфекции необходимо использование подтверждающих тестов.*

*Ключевые слова и фразы:* ретро-вирус; ВИЧ-инфекция; иммунодефицит; антитела; тестирование; иммуноблот; скрининг; иммунохроматография.

**Праздникова Елена Юрьевна**

**Васильева Елена Григорьевна**

**Рукавишниковна Наталья Фёдоровна**

**Петухова Елена Валерьевна**

**Дворникова Людмила Владимировна**

**Борисенко Зоя Леонидовна**

*ФГБУ «Объединённая больница с поликлиникой» Управления делами Президента РФ, г. Москва  
volshebstvoelfov@yandex.ru*

## ЛОЖНОПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТА НА ВИЧ<sup>©</sup>

### Глава 1. Обзор литературы

Вирус иммунодефицита человека (ВИЧ) был обнаружен в 1981 году у гомосексуальных мужчин, которые имели необычные симптомы. Эти симптомы были похожи на пневмонию лёгкой формы и редко на симптомы опухоли кожи - саркомы. Также у пациентов было обнаружено снижение количества CD4+T-лимфоцитов. Позже, в 1983 году, это заболевание было описано как вирус иммунодефицита человека, относящийся к группе ретро-вирусов.

Вирус иммунодефицита человека вызывает заболевание, называемое ВИЧ-инфекцией, последняя стадия которой известна как синдром приобретённого иммунодефицита (СПИД).

Распространение ВИЧ-инфекции связано, главным образом, с незащищёнными половыми контактами, использованием заражённых вирусом шприцев, игл и других медицинских и парамедицинских инструментов,

<sup>©</sup> Праздникова Е. Ю., Васильева Е. Г., Рукавишниковна Н. Ф., Петухова Е. В., Дворникова Л. В., Борисенко З. Л., 2013