

УДК 517.977.56, 519.6, 621.785

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК*

А.В. Попов, Ю.Э. Плешивецва

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

Аннотация. *Формулируются задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя, реализующего стадию нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, для решения которых в ПО MATLAB разработан проблемно-ориентированный программный комплекс. Основой комплекса является оптимизационная процедура, базирующаяся на использовании альтернативного метода параметрической оптимизации, который позволяет записать системы трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех неизвестных конструктивных характеристик и параметров алгоритмов управления. В оптимизационную процедуру интегрирована нелинейная двумерная численная модель процесса индукционного нагрева, разработанная в программном пакете Altair FLUX. Предложен вариант технической реализации найденного в ходе решения задачи оптимального быстрого действия алгоритма управления с учетом ограничения на максимальную температуру обрабатываемой заготовки.*

Ключевые слова: *поверхностная закалка, индукционный нагрев, оптимальное проектирование, оптимальное по быстродействию управление, программный комплекс, альтернативный метод, численная модель, электромагнитные и тепловые поля, FLUX.*

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем в машиностроении и металлургии является повышение экономической эффективности производственных процессов за счет увеличения производительности и снижения операционных затрат и себестоимости конечной продукции. Для достижения указанной цели необходима оптимизация конструкции и режимов работы существующего или проектирование принципиально нового оборудования. До недавнего времени подавляющее большинство методов оптимизации было ориентировано на использование упрощенных аналитических моделей исследуемых технологических процессов, что обусловлено их сравнительной простотой и низкими требованиями к вычислительным ресурсам при построении оптимизационных процедур [1]. Однако развитие и усложнение методов моделирования и оптимизации при совершенствовании вычислительной техники в последние годы привели к тому, что в настоящее время при решении задач оптимизации все чаще используются нелиней-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-08-00232 и №20-08-00240.

Попов Антон Валерьевич, младший научный сотрудник НИС кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Плешивецва Юлия Эдгаровна (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

ные многомерные модели, построенные с помощью современных программных средств численного компьютерного моделирования, которые позволяют учесть многочисленные специфические особенности и усложняющие факторы, присущие рассматриваемым процессам.

В этой связи одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности функционирования сложных объектов с распределенными параметрами представляется междисциплинарный подход к решению задач оптимизации, который заключается в применении современных достижений теории оптимального управления и компьютерного моделирования. Этот подход, в частности, предполагает построение оптимизационных процедур на основе высокоэффективных оптимизационных алгоритмов, во многих случаях гарантирующих получение решения, близкого к глобальному оптимуму, в комплексе с многомерными нелинейными численными моделями, позволяющими с высокой степенью адекватности отразить реальные свойства оптимизируемых объектов. Применение междисциплинарного подхода, открывающее несомненные перспективы получения результатов нового уровня, тем не менее, связано с рядом серьезных технических проблем, основной из которых является осуществление эффективного взаимодействия между оптимизационными алгоритмами и численными моделями. Поэтому в настоящее время в области оптимизации электротехнологических систем одной из основных проблем является интеграция численных нелинейных многомерных моделей в разрабатываемые на базе известных методов оптимизационные процедуры, которая преимущественно обусловлена необходимостью компромисса между точностью моделирования и высокими требованиями к вычислительным ресурсам.

Одной из наиболее широко используемых в промышленности технологий термической обработки металлов является поверхностная индукционная закалка, применение которой обусловлено необходимостью получения определенных изменений в микроструктуре поверхностного слоя обрабатываемого изделия.

В соответствии с вышесказанным самостоятельный интерес приобретает рассматриваемая в статье проблема построения программного комплекса для оптимизации процесса поверхностной индукционной закалки. При решении задач оптимального проектирования и управления режимами работы нагревателя, реализующего стадию нагрева процесса упрочнения стальных заготовок, используются интегрированные в оптимизационную процедуру численные проблемно-ориентированные модели исследуемого процесса.

Постановка задач оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя для поверхностной закалки

В общем случае процесс поверхностной индукционной закалки заключается в интенсивном нагреве обрабатываемого слоя детали до температур, значительно превышающих точку Кюри, что приводит к формированию в поверхностном слое аустенитной структуры, и резком охлаждении нагретого участка ниже температуры, при которой начинается процесс мартенситного преобразования [2–4]. Особенности формирования аустенита на первой стадии рассматриваемого процесса обуславливают необходимость получения максимально равномерного температурного поля в упрочняемом слое изделия для исключения на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя. В то же время снижается вероятность превышения

критического уровня закалочных напряжений, которые могут привести к выбраковке обрабатываемых заготовок. Поскольку использование типовых нагревателей и режимов их работы часто оказывается недостаточным для обеспечения требуемого температурного распределения в поверхностном слое, особенно важными представляются задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционной установки.

В работе рассматривается индукционная нагревательная система, состоящая из двухвиткового индуктора и стальной цилиндрической заготовки [5–6] (рис. 1).

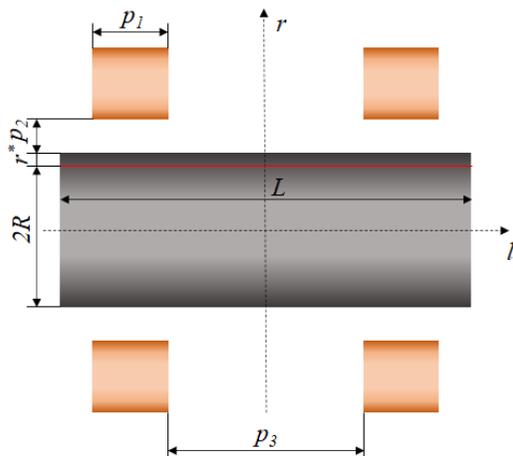


Рис. 1. Геометрия нагревательной системы

Витки сечением $p_1 \times p_1$ находятся на расстоянии p_2 от поверхности стальной цилиндрической заготовки радиусом R и длиной L . Витки расположены симметрично относительно оси r на расстоянии p_3 друг от друга.

Поведение электромагнитных и температурных полей в процессе индукционного нагрева в указанной осесимметричной системе с распределенными параметрами описывается известными взаимосвязанными уравнениями Максвелла и Фурье [5–7].

Задача оптимального проектирования индуктора заключается в поиске значений вектора оптимизируемых параметров $\bar{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, состоящего из перечисленных ранее геометрических характеристик индуктора и тока источника питания I . На указанные параметры накладываются ограничения, которые записываются в следующем виде:

$$p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max}, i = \overline{1, 3}; I_{\min} \leq I \leq I_{\max}. \quad (1)$$

Поскольку главной целью стадии нагрева поверхностной закалки является максимально равномерный нагрев закаливаемого слоя детали до заданной температуры, в качестве критерия оптимальности рассматривается максимум абсолютного отклонения температуры на границе поверхностного слоя толщиной r^* в конце стадии нагрева длительностью t^0 от заданного значения T^* , которое требуется минимизировать:

$$J_1 = \max_{l \in [0, L]} \left| T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}) - T^* \right| \rightarrow \min_{\bar{P}}. \quad (2)$$

Задача оптимального проектирования индуктора в таком случае формулируется следующим образом: требуется найти такие значения составляющих вектора оптимизируемых параметров \overline{P}^0 , стесненные ограничениями (1), которые обеспечивают за время t^0 достижение в поверхностном слое стальной заготовки толщиной r^* требуемой температуры T^* при минимальном значении критерия оптимальности (2) [5, 8].

Процесс закалки характеризуется высокой скоростью нагрева поверхностного слоя обрабатываемого изделия до температур выше точки Кюри, поэтому одной из существенных проблем становится возможный перегрев поверхности заготовки, которого можно избежать путем учета ограничения на максимальную температуру, согласно которому температура в процессе нагрева не должна превышать предельно допустимого значения $T_{дон}$ [6–9]:

$$T_{\max}(t) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, t) \leq T_{дон}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (3)$$

По этой причине важное значение приобретает решение задачи оптимального по критерию быстродействия

$$J_2 = \int_0^{t^0} dt = t^0 \rightarrow \min \quad (4)$$

управления мощностью источников внутреннего тепловыделения при наличии фазового ограничения (3) на максимальную температуру поверхности детали в процессе нагрева в индукторе оптимальной конструкции, полученной на этапе решения задачи оптимального проектирования.

Требования к конечному температурному распределению вдоль границы закаливаемого слоя заготовки имеют следующий вид:

$$\max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (5)$$

где ε_0 – максимальная величина абсолютного отклонения температуры от заданного значения.

Управляющим воздействием для данной задачи является управление током источника питания индуктора $I(t)$ с ограничением следующего вида:

$$I_{\min} \leq I(t) \leq I_{\max}. \quad (6)$$

Таким образом, задача оптимального управления сводится к поиску оптимальной программы изменения во времени сосредоточенного управляющего воздействия $I^*(t)$, стесненного ограничениями (6), которое обеспечивает перевод объекта из заданного начального в требуемое конечное состояние (5) за минимальное время согласно критерию (4) в условиях выполнения фазового ограничения (3).

Решение задач оптимального проектирования и управления

Сформулированные в предыдущем разделе задачи могут быть решены с помощью альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Согласно теории данного метода [10–11] оптимальным

значениям параметров вектора $\bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0)$, которые являются решением сформулированной задачи оптимального проектирования, отвечает пространственное распределение температур $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (2). Основное свойство результирующего температурного распределения $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ состоит в том, что число K точек $l_j^0 \in [0, L]$ вдоль продольного сечения обрабатываемой заготовки, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения конечной температуры $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ от требуемого значения T^* , равные ε_0 , всегда оказывается не меньше числа N искомых оптимизируемых параметров процесса. Кроме того, эти отклонения оказываются знакопеременными, то есть обладают альтернансным свойством. В [5–6] показано, что в рассматриваемом случае наличия четырех оптимизируемых параметров температурное распределение $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ имеет пять точек с максимальным отклонением температуры $\varepsilon_{\min}^{(4)}$ от T^* , что позволяет записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}, j = \overline{1, 5}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0); \\ 0 = l_1^0 < l_2^0 < l_3^0 < l_4^0 < l_5^0 = L; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{2, 4}. \end{cases} \quad (7)$$

Система из восьми уравнений (7) оказывается замкнутой относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым в данном случае относятся четыре компонента вектора \bar{P}^0 , три координаты точек с предельно допустимым абсолютным отклонением температуры от заданной l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение этого отклонения $\varepsilon_{\min}^{(4)}$.

Как показано в [7, 9], программное управление для задачи оптимального по быстродействию управления является релейной функцией времени, попеременно принимающей свои предельно допустимые согласно (6) значения и заданной с точностью до вектора $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ длительностей соответствующих интервалов нагрева и выравнивания температур. Поскольку рассматриваемая задача сформулирована применительно к процессу поверхностной закалки, состоящему из одного интервала нагрева, алгоритм управления при наличии фазового ограничения (3) на максимальную температуру детали примет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\max}, t \in [0; t_1]; \\ I^T(t), t \in (t_1; t_2], \end{cases} \quad (8)$$

где $I^T(t)$ – управление на особом участке движения по ограничению, t_1 – момент выхода на этот участок, который находится из уравнения $\max_{\substack{l \in [0; L] \\ r \in [0; R]}} T(r, l, t_1) = T_{don}$, t_2 – время окончания стадии нагрева.

Согласно [7] оптимальное управление на особом участке может быть аппроксимировано с помощью кусочно-постоянной функции времени, представленной на рис. 2.

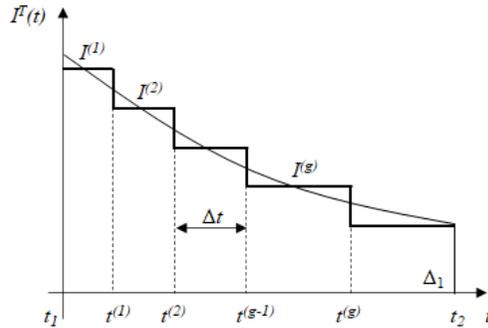


Рис. 2. Кусочно-постоянная аппроксимация управления $I^T(t)$

Приведенная аппроксимация управления на особом участке сводится к итерационной процедуре поиска на каждом временном шаге Δt значения управляющего воздействия $I^{(g)}$, $g = \overline{1, J}$, при котором выполняется условие

$$T_{\max}(t) = T_{don} \quad (9)$$

в моменты времени $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(J)}$, где $t^{(g)} = t_1 + g \cdot \Delta t$ [9]. При этом необходимая точность аппроксимации определяется выбором достаточно большого числа J шагов изменения управляющего воздействия при достаточно малой длительности каждого шага по времени Δt .

Время окончания нагрева t_2 соответствует моменту, когда средняя температура в упрочняемом слое достигает заданного значения T^* .

Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной индукционной закалки

Для численного решения сформулированных задач оптимального проектирования и управления в ПО MATLAB был разработан программный комплекс, общая схема которого представлена на рис. 3.

Основой рассматриваемого программного комплекса является автоматизированная процедура оптимизации на базе альтернативного метода, сводящаяся в данном случае к решению системы уравнений (7) и расчету алгоритма оптимального управления (8). Результирующее двумерное температурное поле

$T(R - r^*, l_j^0, t^0, P^0)$ в (7) и температура $T_{\max}(t)$ в уравнении (9), являющиеся решением сложной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, определяются с помощью специализированного пакета прикладных программ Al-

tair FLUX для численного моделирования электротехнологических систем [12]. Для этого в указанном программном пакете была разработана нелинейная двумерная численная модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки. Встроенная возможность интеграции разработанной FLUX-модели в ПО MATLAB [13] позволяет наиболее эффективно использовать данный пакет при построении показанного на рис. 3 программного комплекса.



Рис. 3. Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной закалки в ПО MATLAB

Общую схему работы программного комплекса можно описать с помощью следующей последовательности шагов. На первом шаге происходит запуск решателя MATLAB для системы нелинейных трансцендентных уравнений альтернансного метода с начальными приближениями искомого оптимизируемых параметров, которые затем передаются в численную модель процесса нагрева. Взаимодействие пакетов MATLAB и FLUX осуществляется по клиент-серверной технологии, поэтому на схеме присутствует блок «запуск FLUX сервера». На этом этапе процедуры происходит запуск Altair FLUX в роли сервера, к которому в качестве клиента подключается пакет MATLAB. Для обмена данными между программами на каждом шаге приведенной процедуры оптимизации используются текстовые файлы. На втором шаге производится расчет численной модели с заданными начальными приближениями, результатом которого является пространственно-временное температурное распределение по объему нагреваемой заготовки, которое затем используется при решении соответствующей системы уравнений альтернансного метода. В случае, если решение системы с заданной точностью найдено, полученные значения оптимизируемых параметров сохраняются в отдельном файле. В противном случае осуществляется повторный расчет значений искомого параметров, которые вновь передаются в разработанную численную модель процесса, после чего начинается новая итерация представленной процедуры оптимизации. Окончанием представленной итерационной процедуры является достижение либо заданной точности решения, либо заданного на этапе вызова решателя количества итераций.

В общем случае для решения как нелинейных уравнений, так и систем таких уравнений в ПО MATLAB реализован ряд существенно отличающихся друг от друга решателей, к которым относятся: *fsolve*, *lsqnonlin*, *fmincon*, *lsqcurvefit*, *fminunc*, *fzero* и др. Практически все указанные решатели входят в набор инструментов Optimization Toolbox [14] программного пакета MATLAB и не могут быть использованы без него. Поскольку рассматриваемая оптимизационная процедура разрабатывается для решения задач оптимального проектирования и управления, предполагающих задание ограничений на значения искомого оптимизируемых параметров, то для решения соответствующих систем уравнений можно использовать только функции *lsqcurvefit*, *lsqnonlin* и *fmincon*. Для рассматриваемой

процедуры был выбран решатель Isqnonlin, осуществляющий поиск неизвестных значений переменных с заданными ограничениями, который минимизирует значение нелинейной функции, являющейся суммой квадратов невязок системы однородных нелинейных уравнений.

Результаты решения задач оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя для поверхностной закалки

Представленный на рис. 3 программный комплекс был использован для решения сформулированных задач оптимального проектирования и управления режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок. Исходные данные для построения численной FLUX-модели показаны в табл. 1.

На параметры вектора \bar{P} накладываются следующие ограничения:

$$5 \leq p_1 \leq 15, 2 \leq p_2 \leq 10, 3 \leq p_3 \leq 15, 500 \leq I \leq 1500. \quad (10)$$

Общий вид FLUX модели системы «индукционная установка – заготовка» с наложенной конечно-элементной сеткой представлен на рис. 4.

Таблица 1

Исходные данные для построения модели в пакете FLUX

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Частота питающего тока	f	100000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	900	°С
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°С
Начальная температура заготовки	T_0	20	°С
Количество витков индуктора	N	2	
Радиус заготовки	RB	14	мм
Длина заготовки	LB	32.9	мм
Время нагрева	t^0	8	с
Толщина закаливаемого слоя	r^*	4	мм
Материал заготовки		Сталь (C40) [15]	

Для всех указанных ранее неизвестных параметров процесса с учетом ограничений (10) были заданы начальные приближения, которые сведены в табл. 2. В результате запуска автоматизированной процедуры оптимизации с указанными начальными приближениями оптимизируемых параметров были получены результаты, которые также приведены в табл. 2.

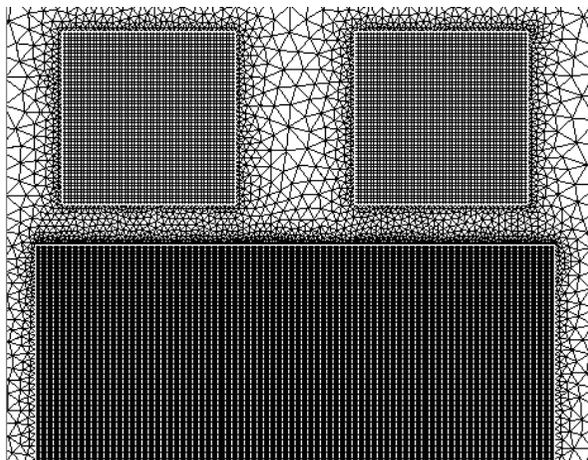
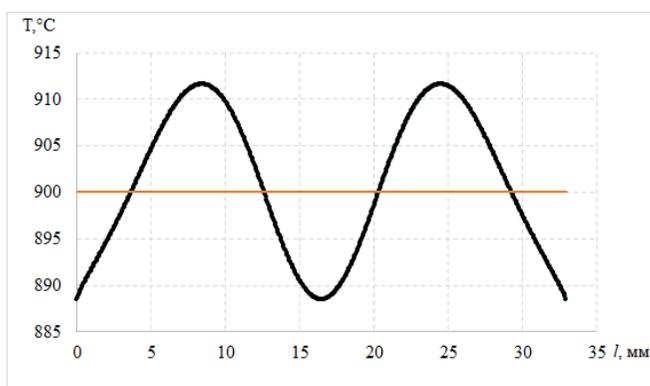


Рис. 4. Численная FLUX-модель с наложенной сеткой

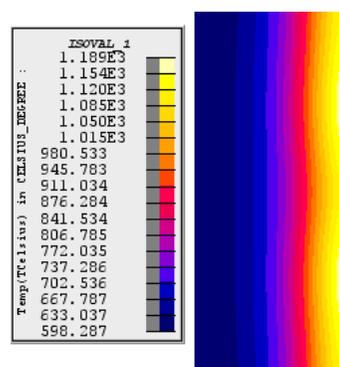
Таблица 2

Начальные приближения и оптимальные значения искомых параметров

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Начальное приближение	13 мм	4 мм	3 мм	1045 А	–
Оптимальное значение	11,9 мм	3 мм	4,4 мм	1382 А	11,5 °С



a



б

Рис. 5. Результаты решения задачи оптимального проектирования:
a – конечное распределение температуры на границе закаливаемого слоя;
б – температурное поле в продольном сечении заготовки в конце стадии нагрева

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя $r = R - r^*$, а также температурное поле по продольному сечению заготовки в конце стадии нагрева поверхностной индукционной закалки с найденными оптимальными

значениями конструктивных параметров индуктора представлены на рис. 5. Анализ результатов показывает, что максимальное отклонение температуры вдоль границы упрочняемого слоя заготовки составляет не более $11,5\text{ }^\circ\text{C}$, что полностью удовлетворяет самым жестким технологическим требованиям, предъявляемым к процессу поверхностной закалки.

Как было указано на этапе постановки задач оптимизации, с целью исключения перегрева поверхности заготовки выше допустимой температуры $T_{oon} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ для найденной конструкции индукционного нагревателя решается задача оптимального по быстродействию управления с учетом фазового ограничения на максимальную температуру вида (3).

На первом шаге решения сформулированной задачи была произведена аппроксимация особого участка управления кусочно-постоянной функцией времени, показанной на рис. 2. Найденный в результате данной аппроксимации алгоритм управления представлен на рис. 6а. Значения конструктивных характеристик нагревателя приняты равными оптимальным значениям, полученным в результате решения задачи оптимального проектирования (см. табл. 2).

Для технической реализации найденного оптимального алгоритма управления необходимо провести аппроксимацию полученной кусочно-постоянной функции времени с помощью непрерывной функции, для чего используется инструмент Curve Fitting Tool программного пакета MATLAB [14]. Данный модуль позволяет провести аппроксимацию экспериментальных данных с помощью различных функций, включая степенные полиномы, экспоненциальные функции, функцию Фурье и Гаусса и другие. В рассматриваемом случае максимальная точность аппроксимации достигается при экспоненциальной зависимости вида

$$I^T(t) = ae^{bt} + ce^{dt}, \quad (11)$$

параметры a, b, c, d которой определяются инструментом Curve Fitting Tool автоматически.

Таким образом, искомое программное управление для задачи с ограничением на максимальную температуру детали примет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1382A, & t \in [0; 6.1]; \\ 8.349 \cdot 10^{15} e^{(-5.154t)} + 1979e^{(-0.0852t)}, & t \in (6.1; 9.7]. \end{cases} \quad (12)$$

Время выхода максимальной по объему закаливаемой заготовки температуры на ограничение составило $t_1 = 6.1\text{ c}$, а общее время стадии нагрева $t_2 = 9.7\text{ c}$. (рис. 6б).

Конечные распределения температуры по границе закаливаемого слоя и вдоль боковой поверхности заготовки в конце оптимальной по быстродействию стадии нагрева поверхностной закалки с учетом ограничения на максимально допустимую температуру представлены на рис. 7.

Как видно из представленных результатов, на поверхности нагреваемой детали отсутствует перегрев, имевший место при нагреве с постоянной максимальной мощностью. Максимальная температура в течение всей стадии нагрева не превышает допустимого значения $T_{oon} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ более чем на $1\text{ }^\circ\text{C}$, что вызвано погрешностями численного расчета.

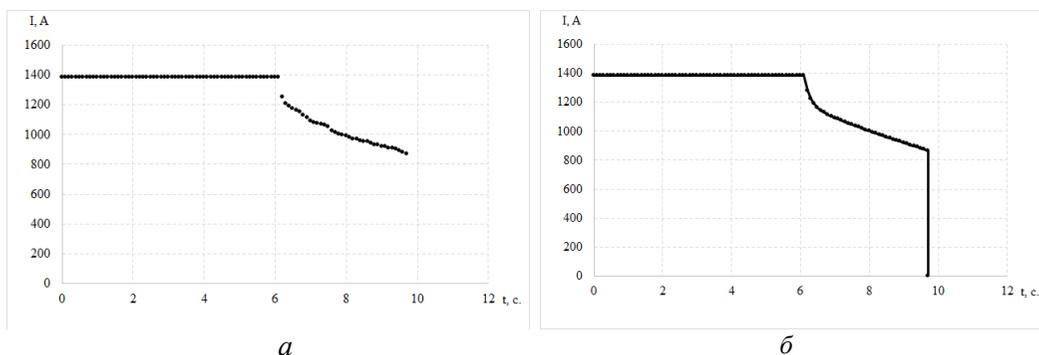


Рис. 6. Алгоритмы оптимального по быстродействию управления в задаче с ограничением на максимальную температуру:

a – аппроксимация алгоритма управления с помощью кусочно-постоянной функции;
б – аппроксимация алгоритма управления с помощью экспоненциальной функции

Техническая реализация оптимального алгоритма управления с учетом ограничения на максимально допустимую температуру заготовки

Современный рынок технических средств для построения промышленных систем автоматического управления позволяет осуществить техническую реализацию найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимально допустимую температуру обрабатываемой детали.

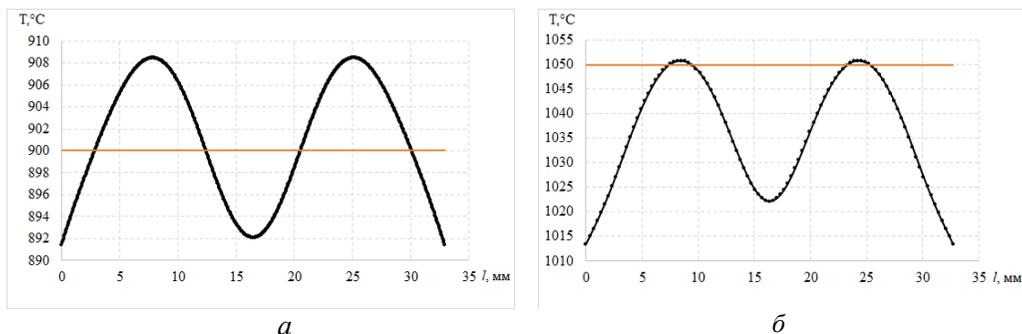


Рис. 7. Конечные температурные распределения:

a – вдоль границы закаливаемого слоя заготовки;
б – вдоль боковой поверхности заготовки

В качестве среды для программирования контроллера был выбран пакет Codesys v2.3 [16]. Данная программная среда позволяет разрабатывать программы на любом из языков программирования ПЛК стандарта IEC 61131-3, а также создавать систему визуализации для панелей оператора. Достоинством данного ПО является возможность использования ПК в режиме эмулирования реального ПЛК, что позволяет осуществить отладку созданного программного кода перед подключением к реальному оборудованию.

На первом шаге технической реализации в качестве объекта управления используется FLUX-модель процесса, а персональный компьютер – в режиме эмулирования работы ПЛК. В данном случае возникает проблема обмена данными между двумя программными пакетами, для решения которой используется библиотека Simulink в качестве промежуточного звена взаимодействия.

Существует несколько вариантов обмена данными в реальном времени между Codesys и Simulink. Одним из них является применение OPC технологии, использование которой предполагает настройку программной среды Codesys в качестве OPC-сервера и дальнейшее подключение к нему ПО MATLAB с помощью набора инструментов OPC Toolbox. Данный набор инструментов включает блоки конфигурирования OPC, считывания значений переменных с заданного OPC-сервера и передачу в него данных, полученных в Simulink (рис. 8) [8].

Подключение пакета FLUX к библиотеке Simulink осуществляется с помощью клиент-серверной технологии, где в качестве сервера выступает ПО FLUX, к которому в роли клиента подключается ПО MATLAB. Запуск FLUX-сервера в этом случае обеспечивается стандартным m-файлом, входящим в библиотеку FLUX. В Simulink-модели данный файл представлен блоком Interpreted MATLAB-function, который позволяет запускать m-файлы функции непосредственно в Simulink.

Таким образом, на каждом шаге расчета модели управляющее воздействие из контроллера будет передаваться в Simulink-модель с помощью OPC-технологии, а затем и в FLUX-модель процесса, после чего происходит расчет одного шага FLUX-модели с переданным значением управления и передача полученного температурного распределения вдоль боковой поверхности заготовки в Simulink. На последнем шаге в Simulink производится вычисление максимального значения температуры и передача его в контроллер, который, в свою очередь, рассчитывает новое значение управляющего воздействия, если температура поверхности достигла своего максимально допустимого значения.

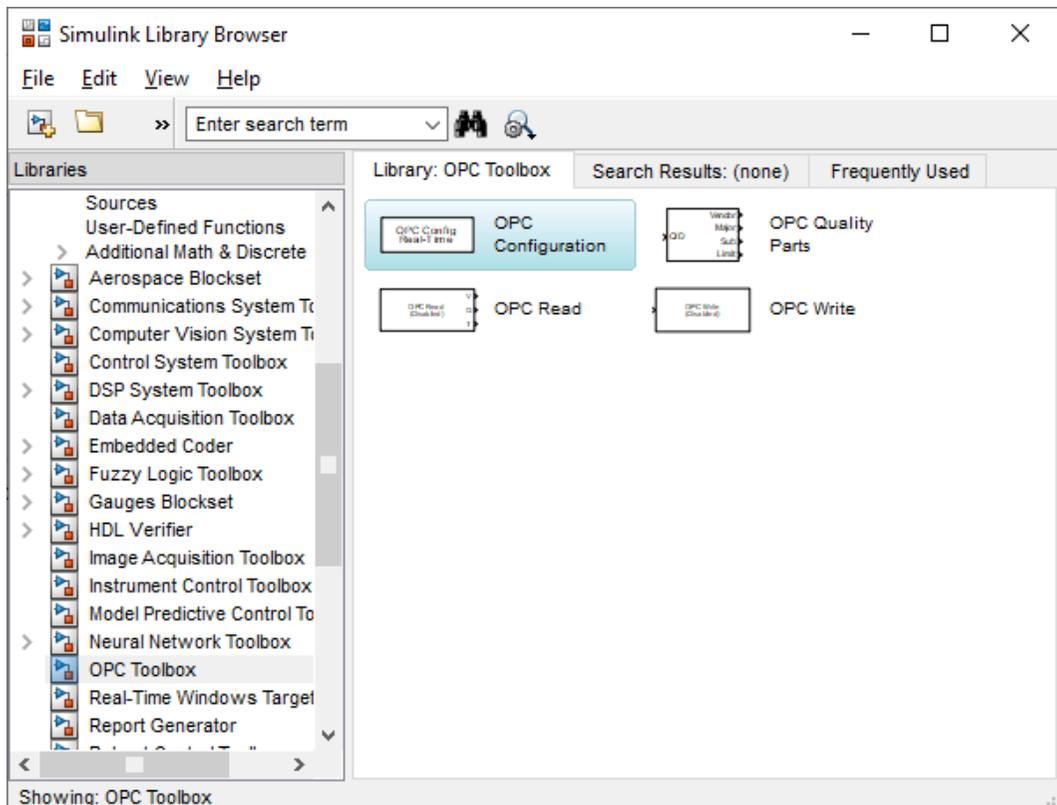


Рис. 8. Набор блоков инструмента OPC Toolbox

Общий вид полученной Simulink-модели, а также внешний вид созданной в среде Codesys системы визуализации показаны на рис. 9.

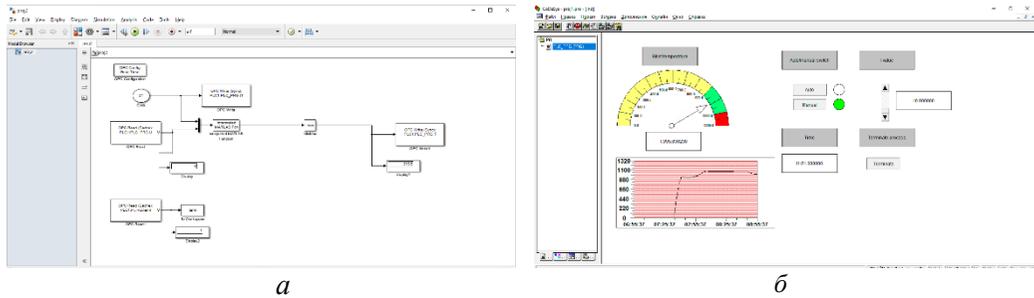


Рис. 9. Техническая реализация алгоритма управления с ограничением на максимальную температуру:
а – Simulink-модель; *б* – система визуализации Codesys

Программа контроллера написана так, что при загрузке в индуктор новой заготовки по умолчанию запускается автоматический режим, который реализует полученный алгоритм оптимального управления (12). После окончания процесса контроллер автоматически переходит в ручной режим с нулевым значением управляющего воздействия. В этом режиме оператор имеет возможность самостоятельно задавать требуемое значение управления. В течение всего процесса на экране отображаются текущие значения времени процесса и максимальной температуры заготовки, а также сохраняется история изменения максимальной температуры во времени.

Как видно из рис. 10, максимальная температура заготовки в течение всего процесса нагрева в автоматическом режиме не превышала своего допустимого значения.

На следующем шаге технической реализации необходимо выбрать технические средства автоматизации, соответствующие основным требованиям к ПЛК: наличие аналоговых входов (для передачи значения максимальной температуры с инфракрасного датчика температуры) и выходов (для задания тока источника питания), малое время опроса аналогового входа, а также наличие интерфейса RS-485 для подключения датчика температуры. Всем этим требованиям удовлетворяет ПЛК150 компании ОВЕН (рис. 11*а*) [17].

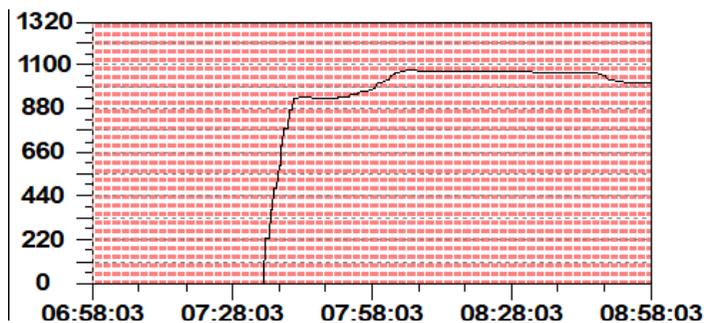


Рис. 10. История изменения максимальной температуры в Codesys



Рис. 11. Вид средств автоматизации компании ОВЕН:
 а – ПЛК150; б – панели оператора семейства ОВЕН СП3хх

Данный ПЛК имеет 6 дискретных входов, 4 дискретных выхода типа электромагнитного реле, а также 4 аналоговых входа и 2 аналоговых выхода. Время опроса одного выхода в данном контроллере составляет 0,5 секунды, что соответствует требованиям к быстродействию контроллера для данного процесса. Существенным преимуществом данного контроллера является встроенная возможность связи со средой разработки Codesys.

В качестве панели оператора для реализации системы визуализации, разработанной в Codesys, предлагается использовать панель ОВЕН СП307-Б (рис. 11б) [18].

Заключение

В работе представлен программный комплекс для оптимизации на базе альтернативного метода процесса поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок. Сформулированы задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя в условиях наличия фазового ограничения на максимальную температуру обрабатываемой детали. Приведены результаты решения сформулированных задач с помощью описанного программного комплекса, которые полностью удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к процессам поверхностного упрочнения. Рассмотрен вариант технической реализации полученной программы оптимального по быстродействию управления в программной среде Codesys.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.
2. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of Induction Heating. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. 797 p.
3. *Блантер М.Е.* Металловедение и термическая обработка. – М.: Машгиз, 1963. – 416 с.
4. *Лахтин Ю.М.* Металловедение и термическая обработка металлов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
5. *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю.* Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 40–50.

6. *Popov A.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, 2019. Pp. 237–241.
7. *Рапопорт Э.Я., Пleshivtseva Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
8. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2020. – 24 с.
9. *Попов А.В., Дьяконов А.И.* Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 56–68.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
12. Flux [Электронный ресурс]: сайт программного продукта FLUX. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения 01.05.2021).
13. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
14. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]: сайт документации MATAB. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения 04.05.2021).
15. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
16. Codesys [Электронный ресурс]. URL: <https://www.codesys.com/> (дата обращения 03.05.2021).
17. OWEN ПЛК [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/product/plk100_150_154/ (дата обращения 04.05.2021).
18. OWEN панели оператора [Электронный ресурс]. URL: <https://www.owen.ru/product/sp3xx/> (дата обращения 04.05.2021).

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2021 г.

PROGRAM COMPLEX FOR OPTIMIZATION OF SURFACE HARDENING OF STEEL BILLETS*

A.V. Popov, Yu.E. Pleshivtseva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *The aim of the paper is to develop program complex in software MATLAB with integrated numerical 2D nonlinear FLUX model, which is used for solving optimal inductor design and control problems for heating stage of surface induction hardening. Considered program complex is based on alternance method, that allows to write systems of transcendental equations, closed with respect to all unknown design and control parameters of the process. The suggestion for implementation of obtained optimal control algorithm is presented.*

Keywords: *surface hardening, induction heating, optimal design, time-optimal control, program complex, alternance method, numerical model, electromagnetic and thermal fields, FLUX.*

**The work was funded by RFBR, projects №20-08-00240, №19-08-00232.*

*Anton V. Popov, Junior researcher.
Yulia E. Pleshivtseva, Professor.*

REFERENCES

1. *Rapoport E.Ya.* Optimalnoe upravleniye sistemami s raspredelennimi parameterami [Optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow: Visshaya shkola, 2009. 678 p.
2. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of Induction Heating. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. 797 p.
3. *Blanter M.E.* Metallovedenie i termicheskaya obrabotka [Metal science and heat treatment]. Moscow: Mashgiz, 1963. 416 p.
4. *Lakhtin Yu.M.* Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 360 p.
5. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Popova M.A., Derevyanov M.Yu.* Optimalnoye proektirovaniye induktora dlya poverkhnostnoi zakalki tsilindricheskikh zagotovok na osnove chislennoi dvumernoi modeli [Optimal inductor design for surface hardening of cylindrical billets] // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series "Control, computer engineering, informatics". Astrakhan, 2019. No. 1. Pp. 40–50.
6. *Popov A.V.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, 2019. Pp. 237–241.
7. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimalnoe upravleniye temperaturnimi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal control of induction heating processes]. Moscow: Nauka, 2012. 309 p.
8. *Popov A.V.* Optimalnoe proektirovaniye i upravlenie rezhimami induktsionnogo nagreva v protsesse poverkhnostnoy zakalki. Avtoref. kand. diss. [Optimal design and control of induction heating for surface hardening process. Cand. diss. abstract]. Samara, 2020. 24 p.
9. *Popov A.V., Diakonov A.I.* Optimalnoe po bistrodeystviyu upravlenie protsessom periodicheskogo induktsionnogo nagreva s uchetom ogranicheniya na maksimalnuyu temperaturu [Time-optimal control of batch induction heating process with respect to maximum temperature restriction] // Bulletin of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2015. No. 3(47). Pp. 56–68.
10. *Rapoport E.Ya.* Optimizatsiya protsessov induktsionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. Moscow: Metallurgiya, 1993. 279 p.
11. *Rapoport E.Ya.* Alternansniy metod v prikladnikh zadachakh optimizatsii [Alternance method in applied optimization problems]. Moscow: Nauka, 2000. 336 p.
12. Flux [electronic source]: www.altair.com/flux/ (accessed 01.09.2020).
13. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
14. MATLAB Documentation [electronic source]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (accessed 04.05.2021).
15. *Marochnik staley i splavov 2-e izdaniye* [Grade guide of steels and alloys. Second edition] / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu.V. Kashirskiy et al. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p.
16. Codesys [electronic source]. URL: <https://www.codesys.com/> (accessed 03.05.2021).
17. Owen PLC [electronic source]. URL: https://owen.ru/product/plk100_150_154/ (accessed 04.05.2021).
18. Owen operator panels [electronic source]. URL: <https://www.owen.ru/product/sp3xx/> (accessed 04.05.2021).