

УДК 621.785, 669.14, 519.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ¹

**Ю.Э. Плешивцева¹, Э.Я. Рапопорт¹, Б. Наке², А.Н. Никаноров²,
А.В. Попов¹**

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Институт электротехнологий Университета им. Лейбница, г. Ганновер
Германия, D-30167, г. Ганновер, Wilhelm-Busch st., 4

Описаны основные подходы и приведены примеры решения задач многокритериальной оптимизации индукционных нагревательных установок. Основной целью исследования является применение различных оптимизационных алгоритмов и методов численного моделирования при решении многокритериальных задач оптимизации, сформулированных для типовых критериев качества, которые обеспечивают максимальную равномерность конечного температурного распределения по объему заготовки, минимальный расход энергии на нагрев и минимум окалинообразования. Представлено решение двухкритериальной задачи оптимизации на базе альтернативного метода процесса индукционного нагрева алюминиевых заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной с помощью специализированного программного пакета FLUX (Cedrat). В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в мультифизическом пакете ANSYS. Разработанные оптимизационные процедуры планируется использовать для решения различных задач оптимального проектирования и управления промышленными электротехнологическими установками и системами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, многокритериальная оптимизация, численная модель, альтернативный метод, генетические алгоритмы, Cedrat FLUX, ANSYS, оптимальное проектирование.

Оптимизация играет ключевую роль при проектировании любой установки или системы, и электромагнитные устройства, к которым относятся индукционные нагревательные установки, не являются исключением. Задача оптимального проектирования заключается в нахождении области проектных параметров установки, которые обеспечивают соответствие предъявляемым технологическим

¹ Работа финансирована Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, проект №1436).

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

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

Антон Валерьевич Попов, аспирант, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Бернард Наке, директор Института электротехнологий университета им. Лейбница, г. Ганновер.

Александр Николаевич Никаноров (к.т.н.), научный сотрудник Института электротехнологий университета им. Лейбница, г. Ганновер.

требованиям, часто задаваемым в виде ряда критериев оптимальности, экстремальные значения которых не могут быть достигнуты одновременно. Во многих случаях сведение такой постановки к однокритериальной задаче различными методами свертки иерархической системы частных критериев оптимальности невозможно, что обуславливает необходимость формулировки задачи многокритериальной оптимизации, т. е. задачи поиска решения, удовлетворяющего одновременно нескольким конфликтующим целевым функциям [1].

В данной статье описаны основные подходы и приведены примеры решения задач многокритериального оптимального проектирования индукционных нагревательных установок, реализованных с помощью объединения численных моделей взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей и оптимизационных процедур.

В работе рассматривается решение задачи двухкритериальной оптимизации на базе альтернативного метода процесса индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок, моделируемого численной двумерной FLUX-моделью. В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в пакете ANSYS. Представленные результаты получены в рамках научных исследований, проводимых совместно Самарским государственным техническим университетом (г. Самара, Россия) и Университетом им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

Многокритериальная постановка задачи оптимального проектирования

Задачи оптимального проектирования индукционных нагревательных систем могут быть сформулированы как нелинейные задачи оптимизации, характеризующиеся вектором целевых функций $\bar{F}(\bar{p}) = \{\tilde{f}_1(\bar{p}), \dots, \tilde{f}_{n_f}(\bar{p})\}$, состоящим из $n_f \geq 2$ элементов в пространстве целевых функций \mathcal{R}^{n_f} . Многокритериальная задача поиска вектора неизвестных значений параметров $\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_{n_p})$ в пространстве оптимизируемых переменных \mathcal{R}^{n_p} может быть записана в следующем виде:

$$\text{дано } \bar{p}_0 \in \mathcal{R}^{n_p}, \text{ найти } \inf_{\bar{p}} \bar{F}(\bar{p}), \bar{p} \in \mathcal{R}^{n_p}, \quad (1)$$

при выполнении n_c ограничений в виде неравенств и n_e ограничений в виде равенств:

$$g_i(\bar{p}) \leq 0, \quad i = \overline{1, n_c}; \quad h_j(\bar{p}) = 0, \quad j = \overline{1, n_e}, \quad (2)$$

а также $2n_v$ ограничений, накладываемых на оптимизируемые параметры:

$$p_{k \min} \leq p_k \leq p_{k \max}, \quad k = \overline{1, n_v}. \quad (3)$$

В задаче оптимального проектирования \bar{p} представляет собой вектор конструктивных параметров индуктора или ключевых режимных параметров процесса нагрева.

Зависимость j -той целевой функции \tilde{f}_j , $j = \overline{1, n_f}$ от вектора \bar{p} может быть достаточно сложной. В большинстве случаев n_f конфликтующих целевых функций, имеющих различные физические размерности, относятся к наиболее важным технико-экономическим характеристикам технологического процесса

(себестоимость конечного продукта, качество полуфабрикатов, энергетические и материальные затраты и др.), что вынуждает проектировщика искать наилучшие компромиссные решения.

Решение сложной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, описывающей поведение электромагнитных и тепловых полей в процессе индукционного нагрева, и вычисление значений целевых функций включают расчеты, связанные с конструктивными параметрами, являющимися компонентами вектора \bar{p} . Вследствие этого целевая функция f_j , определяющая характеристики электромагнитных и тепловых полей или технико-экономические показатели процесса, зависит от \bar{p} как явно, так и неявно, что позволяет определить последовательность вычислений:

$$\text{геометрия } \{\bar{p}\} \rightarrow \text{поле } S(\bar{p}) \rightarrow \text{целевая функция } \tilde{f}_j(\bar{p}) \equiv f_j(\bar{p}, S(\bar{p})), j = \overline{1, n_f}. \quad (4)$$

Согласно формулировке (4), оптимальный синтез электромагнитных и тепловых полей $S(\bar{p})$ в процессе индукционного нагрева неразрывно связан с оптимизацией основных конструктивных параметров.

Задача (1)–(3) является нетривиальной в случае, когда пара целевых функций $(\tilde{f}_i, \tilde{f}_j)$ представляет собой конфликтующие функции для всех $i \neq j$. В общем случае n_f функций будут находиться в конфликте, если $\exists \tilde{p}_i \in P$ и $\exists \tilde{p}_j \in P$, для которых выполняется выражение

$$\tilde{f}_i(\tilde{p}_i) = \inf_p \tilde{f}_i(\bar{p}), \quad \tilde{f}_j(\tilde{p}_j) = \inf_p \tilde{f}_j(\bar{p}) \quad (5)$$

при $\tilde{p}_i \neq \tilde{p}_j, i \neq j, i, j \in \overline{1, n_f}$, где P – область определения вектора \bar{p} .

Конфликт между целевыми функциями является основным обстоятельством, препятствующим достижению ими экстремальных значений одновременно [1].

Одним из наиболее важных критериев оптимизации при рассмотрении процессов индукционного нагрева является максимальная равномерность температурного распределения по объему заготовки. В качестве отвечающей технологическим требованиям оценки точности нагрева часто может рассматриваться максимальное абсолютное отклонение температуры $T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр})$ в конце процесса нагрева от требуемого значения $T^*(\bar{x}) = const$. Следовательно, целевая функция f_1 , соответствующая критерию максимальной точности нагрева, может быть записана в форме чебышевской нормы:

$$f_1(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр})) = \max_{\bar{x} \in X} |T(\bar{x}, \bar{p}, t_{нагр}) - T^*(\bar{x})| \rightarrow \min_{\bar{p} \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^{n_p}}, \quad (6)$$

где $\bar{x} \in X$ – вектор пространственных координат, изменяющихся в области X .

Во многих практических ситуациях основным показателем, характеризующим эффективность процесса нагрева, являются энергетические затраты. В этом случае целевая функция, минимизирующая общее энергопотребление в процессе нагрева, может быть представлена в следующей интегральной форме:

$$f_3(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t)) = \int_0^{t_{нагр}} W(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t), t) dt \rightarrow \min_{\bar{p} \in \Omega \subseteq \mathfrak{R}^{n_p}}, \quad (7)$$

где $W(\bar{p}, T(\bar{x}, \bar{p}, t), t)$ – мощность внутренних источников тепла.

В других ситуациях ведущая роль может принадлежать материальным затратам, существенную долю которых при высокотемпературном индукционном нагреве обычно составляют потери металла в окалину.

Методы многокритериальной оптимизации

Поиск решения задачи (1)–(3) представляет значительные трудности, так как в общем случае целевые функции могут не иметь производных и являться невыпуклыми или негладкими. Кроме того, оценка целевых функций является затратной с точки зрения вычислительных ресурсов, поскольку каждый вызов функции требует решения нелинейной системы уравнений для электромагнитного и теплового полей. Это является главным источником возникающих при решении подобных задач проблем, приводящих к необходимости поиска компромисса между точностью получаемого решения, требуемым временем вычислений и возможностью сохранения истории расчетов.

Наиболее общий подход при решении многокритериальной оптимизационной задачи основан на сведении ее к однокритериальной задаче различными методами свертки иерархической системы частных критериев оптимальности, удовлетворяющих выбранным ограничениям. Традиционно многокритериальная задача редуцируется к однокритериальной путем введения функции предпочтения, т. е. взвешенной суммы целевых функций:

$$\Psi(\bar{p}) = \sum_{i=1}^{n_f} c_i f_i(\bar{p}) \quad (8)$$

при $0 < c_i < 1$, $\sum_{i=1}^{n_f} c_i = 1$, которая должна быть минимизирована по $x \in \mathcal{R}^{n_v}$ при условиях (2)–(3). Иерархическое предпочтение локальных целевых функций при их свертке в единый критерий оптимальности может быть изменено путем изменения соответствующих весовых коэффициентов: для заданного множества весовых коэффициентов соответствующее решение, если оно имеется, принимается в качестве оптимального.

Однако наиболее общее решение задачи может быть представлено фронтом Парето недоминируемых решений, т. е. совокупностью решений, для которых уменьшение одной из целевых функций невозможно без одновременного увеличения по крайней мере одной другой целевой функции. По существу, это означает, что имеется семейство оптимальных решений, которые необходимо сравнить исходя из опыта проектировщика и выбрать единственное решение согласно дополнительным критериям.

На практике для получения фронта Парето могут использоваться различные алгоритмы многокритериальной параметрической оптимизации, большинство из которых основано на недерминистских методах оптимизации, использующих принципы естественной эволюции [1].

Во многих случаях нет необходимости в получении широкого семейства оптимальных решений. Поэтому многие многокритериальные задачи формулируются для нахождения конечного числа Парето-оптимальных решений, которые равномерно распределены вдоль фронта Парето. С инженерной точки зрения целесообразно выбрать единственное решение из полученного семейства. Оно должно принадлежать к совокупности недоминируемых решений и удовлетво-

рять заданным требованиям проектировщика.

Альтернативный метод параметрической оптимизации давно и успешно применяется при решении задач управления и проектирования индукционных систем. Методы оптимального управления и базирующиеся на них методики оптимизации основаны на физических свойствах контролируемых нестационарных процессов теплопроводности в процессе индукционного нагрева. Эти свойства позволяют составить систему уравнений, которая должна быть решена относительно неизвестных оптимизируемых параметров.

Подобная оптимизационная стратегия была представлена в ряде публикаций [2–6] и применена для решения сформулированной ниже двухкритериальной задачи.

Пример решения двухкритериальной задачи оптимизации альтернативным методом

Рассмотрим типичный для кузнечного производства процесс периодического индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок перед операциями пластической деформации (рис. 1) [6, 10].

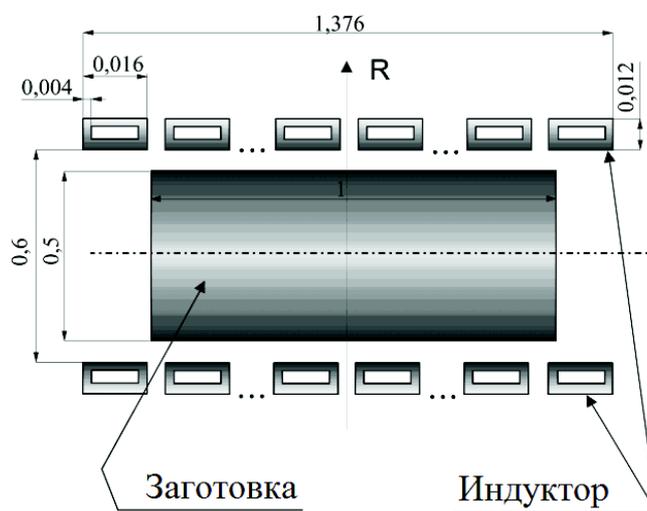


Рис. 1. Геометрические параметры системы «индуктор – заготовка»

Основной целью процесса индукционного нагрева является получение требуемого (обычно равномерного) температурного распределения; однако одним из недостатков индукционного нагрева является наличие поверхностных, концевых и краевых эффектов, обуславливающих неравномерный нагрев. Предъявляемые к процессу нагрева требования обеспечения максимально достижимой равномерности распределения температурного поля по объему заготовки в конце процесса нагрева при минимальном энергопотреблении, в принципе, находятся в противоречии друг с другом, поэтому задача оптимального по критериям (6) и (7) проектирования нагревателя должна быть сформулирована как задача многокритериальной оптимизации.

В общем случае распределение температурного поля по объему нагреваемого тела описывается весьма сложной системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и теплового полей [2, 5].

В настоящее время большинство коммерческих программ численного анализа электромагнитных и температурных полей основано на методе конечных элементов. Для решения сформулированной задачи была разработана двумерная

численная модель периодического индукционного нагрева изделий цилиндрической формы в конечно-элементном программном пакете Cedrat FLUX [7, 8].

В рассматриваемой двухкритериальной задаче в качестве оптимизируемых параметров выбраны параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на процесс: напряжение источника питания $U(t)$, связанное с мощностью внутренних источников тепла, и время нагрева $t_{нагр}$. Возможные интервалы изменения оптимизируемых параметров могут быть заданы в виде ограничений:

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}; t_{min} \leq t_{нагр} \leq t_{max}. \quad (9)$$

Противоречие, возникающее между целевыми функциями (6) и (7), является одной из главных предпосылок к решению задачи многокритериальной оптимизации, которая может быть сформулирована следующим образом. Для процесса индукционного нагрева, описываемого двумерной численной FLUX-моделью, необходимо определить такие значения оптимизируемых параметров $U = U^{opt}$ и $t_{нагр} = t_{нагр}^{opt}$, стесненных ограничениями (9), которые обеспечили бы нагрев заготовки от начальной 20 °С до требуемой конечной температуры 450 °С при минимально возможных значениях целевых функций (6) и (7).

Исходные данные для моделирования, а также геометрия системы «индуктор – заготовка» представлены в табл. 1 и на рис. 1 соответственно. Результаты решения задачи, полученные с использованием альтернативного метода оптимизации, приведены в табл. 2. Соответствующий фронт Парето представлен на рис. 2 на плоскости целевых функций (6) и (7). Как можно видеть из рисунка, фронт Парето имеет выпуклую форму, а уменьшение значения целевой функции f_1 приводит к возрастанию значения целевой функции f_2 , что согласуется с физическими закономерностями рассматриваемых процессов и означает необходимость дополнительных затрат энергии для увеличения точности нагрева.

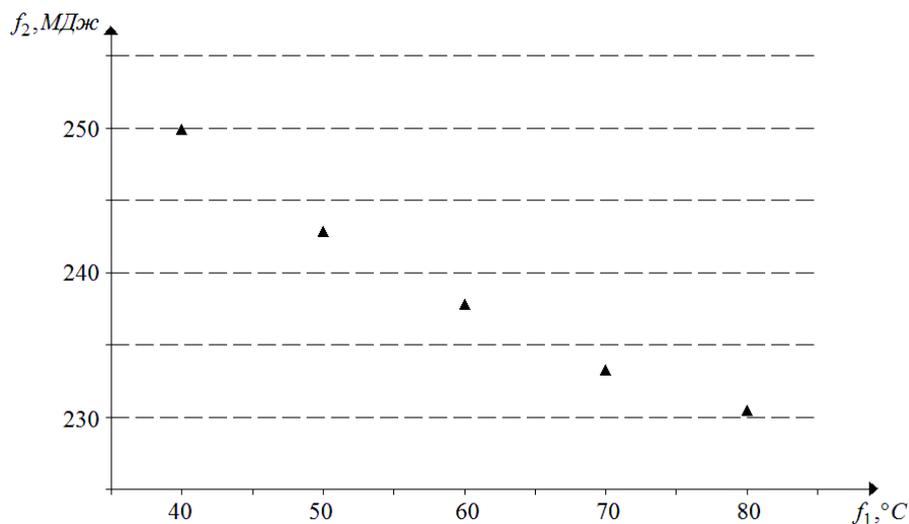


Рис. 2. Результаты решения двухкритериальной задачи на плоскости целевых функций

Последующий анализ фронта Парето состоит в выборе единственного решения из полученного множества оптимальных по Парето решений. С технологической точки зрения, руководствуясь требованиями, предъявляемыми на последующих операциях пластического формоизменения, целесообразно выбрать решение, соответствующее максимальной точности нагрева, т. е. минимальному зна-

чению целевой функции (6). Данное решение представлено самой правой точкой фронта Парето со следующими значениями целевых функций: $f_1 = 40^\circ\text{C}$; $f_2 = 249.91 \times 10^6$ Дж, что соответствует следующему решению задачи проектирования в пространстве оптимизируемых параметров: $U^{opt} = 347$ В; $t_{нагр}^{opt} = 3.126 \times 10^3$ с.

Решение сформулированной двухкритериальной задачи оптимизации было проведено также для различных значений геометрических и физических параметров системы. Во всех случаях результаты решения демонстрируют аналогичные качественные характеристики оптимальных процессов нагрева.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Число витков индуктора	69
Длина заготовки, м	1.0
Частота питающего напряжения, Гц	50
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda(T) = 115(1 + 0.8 \cdot 10^{-3} T)$
$V(H), \text{Тл}$	$B(H) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H$
Электрическое сопротивление, Ом	$\rho(T) = 0.3 \cdot 10^{-7} (1 + 0.007T)$
Объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\rho C_p(T) = 2.34 \cdot 10^6 (1 + 5.7 \cdot 10^{-4} T)$

Таблица 2

Результаты решения задачи

$U_{opt}, \text{В}$	$t_{нагр}^{opt}, \text{с.}$	$f_1, ^\circ\text{C}$	$f_2, \text{МДж}$
456	1663	80	230,448
434	1868	70	233,283
405	2183	60	237,809
379	2543	50	242,83
347	3126	40	249,91

Пример решения трехкритериальной задачи оптимизации

Рассмотренная выше двухкритериальная задача оптимального проектирования была сформулирована для двух типовых критериев оптимизации: максимальной точности нагрева и минимального энергопотребления. Целый ряд технологических процессов предусматривает нагрев стальных заготовок до высоких температур 1100–1200 °С. Выравнивание температуры в центре заготовки в таких процессах протекает с низкой скоростью, что приводит к увеличению длительности нагрева до десятков минут. В этом случае металл начинает активно окисляться, что вызывает существенные его потери, ухудшение свойств конечного продукта и срока службы формовочного оборудования [3]. Все вышеперечисленные причины обуславливают необходимость минимизации образования окалины в процессе нагрева стальных изделий. Данное требование может быть сформулировано в виде следующей целевой функции:

$$f_3 = \int_0^{t_{нагр}} 10 \cdot e^{-\frac{1}{T}} \sqrt{t} dt, \quad (10)$$

где T – температура поверхности [9].

Задача трехкритериальной оптимизации была решена с помощью интегрирования двумерной численной модели процесса, разработанной в пакете ANSYS, в оптимизационную процедуру, построенную на основе генетического алгоритма. В качестве объекта оптимизации рассматривается индукционная установка для нагрева стальных цилиндрических заготовок диаметром 100 мм до температуры 1200 °С при частоте питающего тока 1000 Гц [10].

Критерии максимальной точности нагрева и минимального энергопотребления сформулированы согласно выражениям (6) и (7). В качестве оптимизируемых параметров процесса выбраны сила тока индуктора и время нагрева.

Фронт Парето, полученный в результате решения данной задачи, представляет собой трехмерную поверхность в пространстве трех целевых функций: точности нагрева, энергопотребления и окалинообразования, которые определяются выражениями (6), (7) и (10) соответственно.

Проекция семейства решений на плоскость целевых функций (6) и (7) показана на рис. 3. В данном случае фронт Парето представляет собой левую вогнутую границу V-образной кривой, на которой для каждой точки уменьшение значения целевой функции (6) приводит к возрастанию значения целевой функции (7), что свидетельствует о ярко выраженном конфликте между рассматриваемыми критериями и нетривиальностью задачи выбора единственного решения.

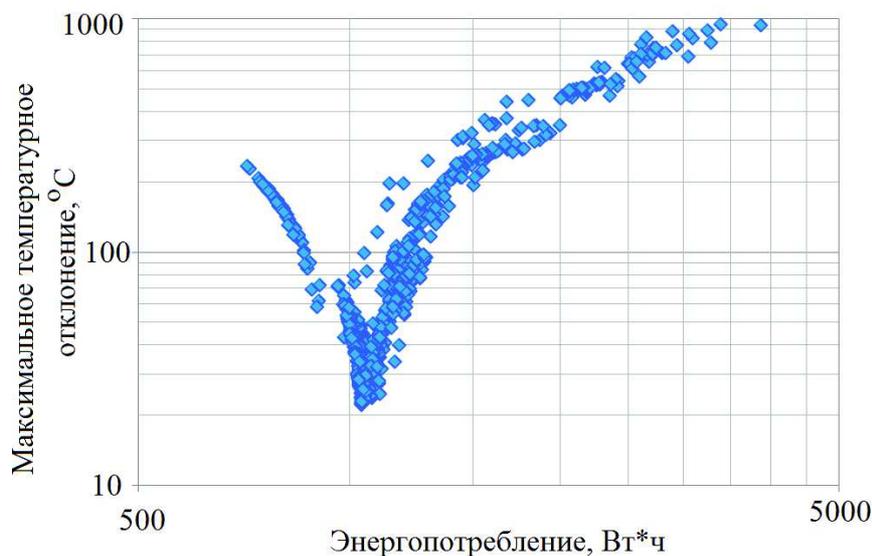


Рис. 3. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (6) и (7)

Проекция семейства решений задачи на плоскость целевых функций (6) и (10), показанная на рис. 4, представляет собой две группы точек с явно выраженным промежутком между ними. Максимальная точность нагрева, определяемая согласно критерию (6), соответствует нижним точкам правой группы, в то время как минимальному значению критерия (10) отвечают несколько решений левой группы, соответствующих различным значениям критерия (6). Этот эффект, как и эффект разделения решений на группы, позволяет сделать вывод о не столь явно выраженном конфликте целевых функций, как в предыдущем случае (рис. 3), и необходимости дальнейшего детального анализа для выбора един-

ственного решения.

Анализ проекции найденного фронта Парето на плоскость целевых функций (7) и (10), представленной на рис. 5, позволяет сделать вывод о существовании единственного решения, удовлетворяющего одновременно минимальным значениям обоих критериев, что свидетельствует об отсутствии конфликта между ними.

Заключение

Идея формулировки и решения задачи оптимального проектирования электротехнических установок как задачи многокритериальной оптимизации сама по себе не нова. Однако проблема интегрирования численных нелинейных многомерных моделей взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в автоматизированные оптимизационные процедуры является весьма нетривиальной, а ее решение открывает перед проектировщиками большие возможности по выбору и оценке принимаемых решений.

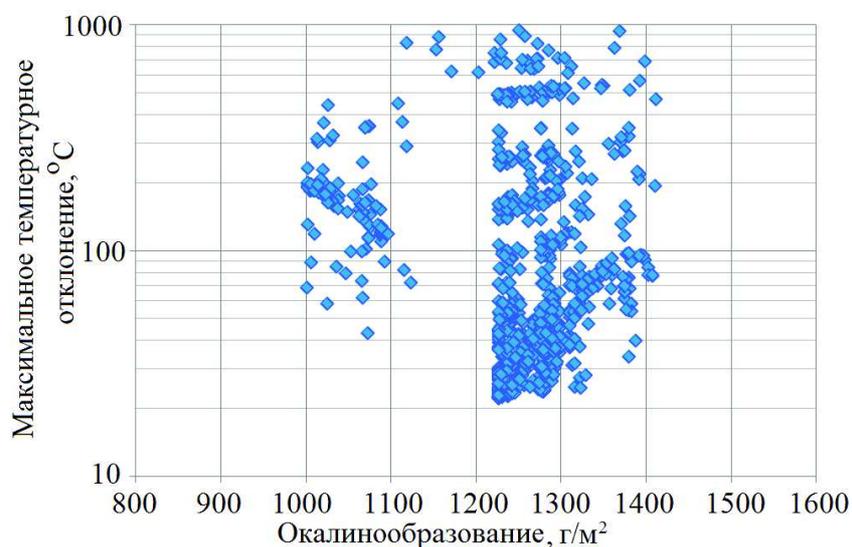


Рис. 4. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (6) и (10)

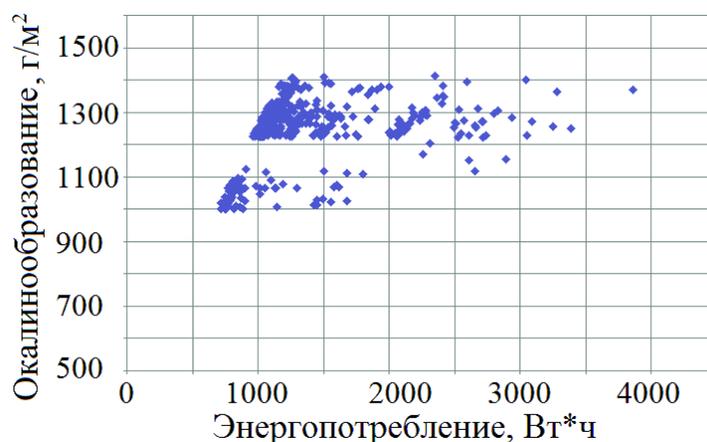


Рис. 5. Проекция фронта Парето на плоскость целевых функций (7) и (10)

В работе рассмотрены многокритериальные задачи оптимального проектирования индукционных установок для нагрева заготовок перед операциями пластического формоизменения. В качестве целевых функций рассмотрены типовые критерии качества процесса нагрева: максимальная точность нагрева, минимальное энергопотребление и минимальное окалинообразование.

С помощью альтернативного метода получено решение двухкритериальной задачи оптимизации процесса индукционного нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной с помощью специализированного программного пакета FLUX (Cedrat). В качестве примера трехкритериальной задачи рассмотрена оптимизация с помощью стандартных генетических алгоритмов процесса нагрева стальных заготовок, моделируемого двумерной численной моделью, разработанной в мультифизическом пакете ANSYS.

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности предложенных подходов, необходимости дополнительных исследований полученных решений и выявляют возможности расширения сферы применения рассмотренных оптимизационных процедур к практическим задачам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация и управление электротехнологическими системами. Интенсивный курс. Специализация III / А.И. Алиферов, Э. Бааке, Д. Барглик, Р. Бикеев, Ф. Брессан, П. Ди Барба, Л. Горелова, С. Лупи, Б. Наке, А.Н. Никаноров, С. Павлов, Ю.Э. Плешивцева, Э.Я. Рапопорт, А. Смальцеж, С. Спитан, М. Форцан, А. Якович. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 266 с.
2. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
3. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2(42). – С. 148–163.
4. 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. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 56–68.
5. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.
6. Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nikanorov A., Nacke B., Forzan M., Lupi S., Sieni E. Multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled field analysis // Int. J. Microstructure and Materials Properties. – 2014. – Vol. 9. – Nos. 6. – pp. 532-551. ISSN online: 1741-8429
7. Flux [Электронный ресурс]: сайт программного продукта Cedrat Flux. Режим доступа: www.cedrat.com/en/software/flux.html (дата обращения 20.05.2016).
8. Шаранова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 7(28). – С. 180–185.
9. Börgerding R. Optimierung des Betriebs induktiveSchmiedeblockerwärmer // Fortschr. – Ber. VDI. – Düsseldorf: VDI Verlag, 1997. – Reihe 2, Nr. 451.
10. Pleshivtseva Yu., Di Barba P., Rapoport E., Nikanorov A., Nacke B., Forzan M., Lupi S., Sieni E. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization // Proc.: International Seminar “Heating by Electromagnetic Sources” HES-16. – Padua, Italy, May 24–27, 2016,

Статья поступила в редакцию 25 марта 2016 г.

INDUCTION HEATING INSTALLATIONS DESIGN BASED ON MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION

*Yu.E. Pleshivtseva*¹, *E.Ya. Rapoport*¹, *A.N. Nikanorov*², *B. Nacke*²,
*A.V. Popov*¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, Russian Federation

²Institute of Electrotechnology, Leibniz Universität Hannover
4, Wilhelm-Busch-st., Hannover, D-30167, Germany

The paper describes main ideas and demonstrates results of the researches in the field of induction heating installations design based on multiple-criteria optimization. The main goal of the research is the application of different optimization methods and numerical techniques to solve the multi-objective optimization problem that is mathematically formulated in terms of the most important optimization criteria, i.e. temperature uniformity, energy efficiency and scale formation. Standard genetic algorithm and alternance method of optimal control theory are applied as effective tools for the practice-oriented problems solutions based on non-linear coupled electromagnetic and temperature field analysis. Optimization procedures are tested and investigated for two- and three-criteria optimization problems solution on the examples of induction heating of aluminum billets prior to hot forming. The developed optimization procedures are planned to be applied to the wide range of real-life industrial problems of the optimal design and control of different electromagnetic devices and systems.

Keywords: *induction heating, multi-criteria optimization, numerical model, alternance method, genetic algorithm, Cedrat FLUX, ANSYS, optimal heater design.*

*Yulia E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anton V. Popov, Postgraduate Student, Assistant.
Bernard Nacke, Director Institute for Electrotechnology, Hannover.
Alexandr N. Nikanorov (Ph.D. (Techn.)), Research Scientist.*