

УДК 621.365.511

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИНДУКЦИОННОГО  
НАГРЕВА\****А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин, С.С. Кибкало, Д.В. Сурков*Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244E-mail: aidanilushkin@mail.ru, denis.zhivotyagin@arconic.com, vaz-21093-2001@yandex.ru,  
surkov81dv@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы проектирования высокопроизводительной индукционной установки для нагрева ферромагнитных заготовок перед обработкой на деформирующем оборудовании. Отмечены специфические особенности технологического процесса нагрева ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации. Показано, что для повышения эффективности процесса нагрев крупногабаритных заготовок из ферромагнитной стали целесообразно осуществлять в двухчастотном индукционном нагревателе с двумя автономными секциями. Выполнено исследование процесса нагрева в двухсекционном нагревателе ферромагнитных заготовок с учетом нелинейной зависимости физических характеристик металла нагреваемых заготовок от изменяющейся в процессе нагрева температуры. Сформулирована и решена задача минимизации длины двухсекционного нагревателя с учетом энергетических и технологических ограничений. Условием для определения оптимальной длины первой секции является достижение температуры, соответствующей потере магнитных свойств, в слое, равном глубине проникновения тока на частоте источника питания второй секции. Представлены результаты численного расчета оптимальных параметров двухсекционного нагревателя. Показано, что алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой кусочно-постоянную функцию. Приведены результаты расчета температурного распределения в заготовках в процессе нагрева. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для решения задачи оптимизации конструктивных и режимных параметров многосекционного нагревателя.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, частота, математическая модель, температурное распределение, оптимальное проектирование.

Нагрев заготовок в технологических линиях производства изделий методом штамповки или прессования на машиностроительных и металлургических предприятиях производят преимущественно в высокопроизводительных индукцион-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А.

Данилушкин Александр Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Животягин Денис Александрович, аспирант.

Кибкало Сергей Сергеевич, аспирант.

Сурков Дмитрий Викторович, аспирант.

ных нагревательных установках методического действия, состоящих из нескольких секций. При этом используются два возможных варианта питания нагревателя: все секции индукционной установки подключают к одному источнику питания или нагрев осуществляют в двухчастотном нагревателе. Во втором случае секции индукционного нагревателя работают на разных частотах, следовательно, используются два независимых источника. Этот способ целесообразно использовать при нагреве крупногабаритных ферромагнитных заготовок под обработку на деформирующем оборудовании [1–4]. Известно, что эффективность индукционного нагревателя при нагреве ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации значительно снижается при потере металлом магнитных свойств. Уменьшается коэффициент полезного действия, снижается коэффициент мощности установки [5–9]. Температура, при которой металл теряет магнитные свойства, в зависимости от марки стали лежит в диапазоне 650÷700 град. Для повышения эффективности нагрева и улучшения энергетических характеристик индуктора нагрев крупногабаритных заготовок целесообразно осуществлять на двух частотах: нагрев до температуры магнитных превращений осуществлять на одной частоте, определенной из условия максимальной энергетической эффективности нагревателя, а затем, при нагреве немагнитного металла, переходить на нагрев на более высокой частоте. Конкретное значение частоты определяется на основании известных соотношений для сквозного нагрева немагнитных заготовок [10].

Сложность исследования процесса нагрева в индукционной системе при обработке ферромагнитных заготовок заключается в необходимости учета нелинейной зависимости физических характеристик материала нагреваемых заготовок от изменяющейся в процессе нагрева температуры. При переходе через точку Кюри металл теряет магнитные свойства. Это приводит к значительному изменению электрических параметров индукционного нагревателя при высокотемпературном нагреве ферромагнитных заготовок [10, 11].

Методика расчета температурного распределения при индукционном нагреве основана на решении нелинейной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [12–14]:

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

$$\frac{\partial H(0,x,\tau)}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

$$c(T)\gamma \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T)r \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial x} \right) + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r,x,t,\xi(T)) \quad (4)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r,x,t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = \alpha [T(r,0,t) - T_1(r,0,t)] + \varepsilon \left[ \left( \frac{T(r,0,\tau)}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1(r,0,t)}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial t} \Big|_{x=L} = \alpha [T(r, L, t) - T_2(r, L, t)] + \varepsilon \left[ \left( \frac{T(r, L, t)}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2(r, L, t)}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} \Big|_{r=R} = \alpha_1(T) [T(R, x, t) - T_1(R, x, t)] + \varepsilon_1 \left[ \left( \frac{T(R, x, t)}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1(R, x, t)}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x); \quad r \in [0, R]; \quad x \in [0, L] \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(0, x, t)}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

Здесь  $\{\bar{H}\}$  – вектор напряженности магнитного поля;

$T$  – температура;

$t$  – время;

$\lambda(r, x, T)$  – удельная теплопроводность;

$c(T)$  – удельная теплоемкость;

$\gamma$  – плотность нагреваемого металла;

$W(r, x, t, \xi(T))$  – удельная мощность тепловыделения;

$\xi(T)$  – глубина проникновения тока.

Система уравнений (1), (2) дополняется граничными условиями. Для электромагнитной задачи используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе  $S_1$  (ГУ1) и условие симметрии на осевой линии  $S_2$ , которое заключается в равенстве нулю производной от функции (ГУ2).

Задача расчета внутренних источников тепла формулируется на основе уравнений Максвелла для векторного магнитного потенциала  $A$  ( $B = \text{rot}A$ ) и скалярного электрического потенциала  $U$  ( $\mathbf{E} = -\text{grad}U$ ,  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля) [12]:

$$\begin{aligned} \text{rot}(\mu^{-1} \cdot \text{rot}A) &= J + \text{rot}H; \\ J &= g \cdot \text{grad}U - g \cdot \partial A / \partial t, \end{aligned}$$

где  $\mu^{-1}$  – тензор, обратный тензору магнитной проницаемости;  
 $g$  – электропроводность.

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала  $A$  ( $B = \text{rot}A$ ,  $B$  – вектор магнитной индукции) для осесимметричного случая

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu_x} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - i\omega g A = -j_{\text{стор}},$$

где электропроводность  $g$  и составляющие магнитной проницаемости  $\mu_x$  и  $\mu_r$  постоянны в пределах каждого блока модели. Сторонняя составляющая тока  $J_{\text{стор}}$  предполагается обратно пропорциональной радиусу.

Мощность внутренних источников тепла, характеризующих нагрев проводящих тел индукционной системы, вычисляется для каждого элемента по закону

Джоуля – Ленца:

$$P^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^e} \sigma \left( \bar{E} \cdot \bar{E}^* \right) dV,$$

где  $\bar{E}^*$  – величина, сопряженная к  $\bar{E}$ .

Для учета нелинейной зависимости  $\mu_a(H)$  в ферромагнитных областях разработан итерационный алгоритм многократного решения результирующей системы уравнений. Определение магнитной проницаемости производится с помощью введения в программу расчета полинома, аппроксимирующего кривую намагничивания.

Для решения электромагнитной задачи выбран тип задачи магнитного поля переменных токов. Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного полей, возбужденных приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем. По заданным исходным данным строится геометрия модели. Исследуемая индукционная установка представляет собой осесимметричную систему. Построение модели начинается с задания осей симметрии и ориентации модели в пространстве.

Основные элементы модели строятся с помощью единичных геометрических объектов. Точки задаются координатами и соединяются линиями, образуя поверхности. Завершается построение геометрии заданием конечной области, ограничивающей пространство модели. Следующий шаг моделирования заключается в создании расчетной сетки модели, где каждую составляющую конструкции индукционной системы разбивают на простейшие элементы. Тип элементов и способ разбиения зависят от индивидуальных особенностей задачи, конфигурации деталей и координат областей конструкции, оказывающих наибольшее влияние на результат решения задачи.

При построении сетки наибольший интерес представляет поведение электромагнитного поля в непосредственной близости к загрузке и катушке индуктора. В этих областях плотность сетки должна быть максимальной. Плотность сетки можно уменьшать по мере удаления к границе области. В настоящей работе для разбиения исследуемого пространства выбран треугольный тип элементов. Сетка моделируемой системы «индуктор – загрузка» строится с учетом поверхностного эффекта. С этой целью в каждой заготовке и на поверхности индуктора, обращенной к заготовке, задается область, геометрические размеры которой зависят от глубины проникновения тока в металл. Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем этот переход имеет место в первой секции индуктора, работающей на частоте 50 Гц. В этом случае наблюдается ярко выраженный поверхностный эффект, поэтому в этой области строится равномерная сетка с минимально возможными размерами треугольного элемента. Кроме того, сгущение сетки предусмотрено в области стыка смежных заготовок.

Вся расчетная конструкция модели состоит из несколько частей, включающих N заготовок, одновременно находящихся в нагревателе, катушки индуктора, тепловую изоляцию и окружающее пространство. Нелинейные зависимости магнитной проницаемости, теплоемкости, удельной проводимости, теплопроводности от температуры задаются вручную с помощью аппроксимирующих выражений.

Для тепловой задачи задаются граничные условия на боковых поверхностях и на торцах смежных заготовок, для каждой заготовки задаются коэффициенты конвективного теплообмена и теплообмена излучением. Электрофизические и теплофизические свойства материала загрузки задаются в виде непрерывных или табличных функций, зависящих от температуры. ELCUT позволяет вести вычисления с учетом нелинейных зависимостей свойств материалов от температуры. Для первой секции индуктора, где материал загрузки сохраняет магнитные свойства, необходимо ввести аппроксимирующую зависимость магнитной проницаемости от интенсивности магнитного поля. В этом случае используется специально модифицированная кривая намагничивания ферромагнитного материала. Автоматический пересчет кривой намагничивания  $B(H)$  выполняется с таким расчетом, чтобы сохранялась средняя энергия магнитного поля за период. Редактор кривой намагничивания для данного типа задач показывает одновременно исходную и скорректированную кривые.

Теплопроводность задается линейной зависимостью вида

$$\lambda(T) = \lambda_0(1 + (T - T_0)),$$

где  $T_0$  – начальная температура;

$\lambda_0$  – теплопроводность при нулевой температуре.

Удельное сопротивление

$$\rho(T) = \rho_0(1 + (T - T_0)),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при нулевой температуре.

Объемная теплоёмкость задается в виде экспоненциальной зависимости.

Объемная теплоемкость задается в виде экспоненциальной зависимости.

Особенностью решения электромагнитной задачи является необходимость учитывать зависимость магнитной проницаемости материала заготовки от температуры. В используемом пакете ELCUT нет возможности автоматизированной реализации этой зависимости, поэтому решение тепловой задачи для заготовки проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения по мере прогрева слоев заготовки выше точки магнитных превращений и заданием полученной картины в качестве источников для тепловой задачи. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения. Итерации проводятся до получения заданной технологией температуры.

По результатам моделирования получены значения параметров электромагнитного поля, характеризующих рассматриваемый процесс: распределение напряженности магнитного поля, распределение плотности полного тока в каждой заготовке, распределение мощности внутренних источников тепловыделения, распределение плотности потока энергии по сечению каждой заготовки, зависимость изменения мощности во времени для каждой заготовки и в секциях нагревателя, изменение мощности по длине каждой секции нагревателя, температурные распределения по радиальной и осевой координатам и др.

На рис. 1 приведена сетка конечных элементов для расчета электромагнитных полей в первой секции нагревателя. Характеристика КЭ модели: число уз-

лов – 3804, число элементов – 7489.

Полученные в результате численного расчета электромагнитной задачи внутренние источники тепла используются далее при решении задачи расчета температурного поля заготовки в процессе ее дискретного перемещения через нагреватель.

Специфической особенностью расчета температурного поля заготовок является существенно различающиеся по характеру функции распределения внутренних источников тепла в секциях нагревателя и различные условия теплообмена по длине загрузки. В первой секции нагревателя находятся ферромагнитные заготовки, поэтому характер распределения внутренних источников тепла в значительной степени определяется нелинейной зависимостью мощности внутреннего тепловыделения от напряженности магнитного поля. Во второй секции заготовка немагнитная и характер распределения плотности тока по сечению заготовки однозначно определяется частотой источника питания и удельным сопротивлением нагреваемого металла.

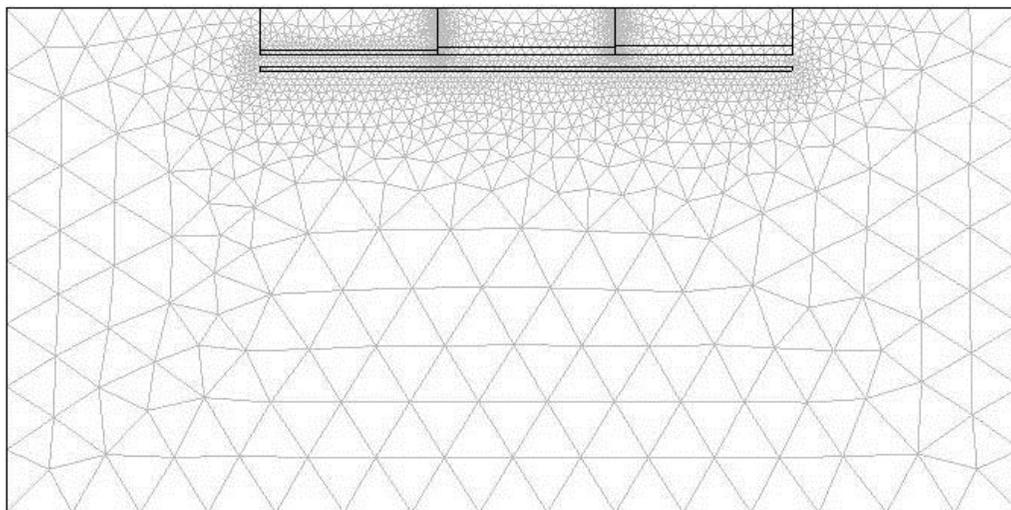


Рис. 1. Сетка конечных элементов секции нагревателя для расчета электромагнитных полей

Решение тепловой задачи для заготовок, находящихся в нагревателе, проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения в электромагнитной задаче и заданием полученной картины в качестве источников для тепловой задачи [15–17]. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры и внутренних источников тепловыделения.

Для решения тепловой задачи используется приложение программы Comsol, построенное на базе метода конечных элементов. Распределение температуры в нагреваемой заготовке находится в результате решения уравнения теплопроводности с известной функцией распределения внутренних источников тепла, полученной в результате решения электромагнитной задачи.

Предложенная методика расчета положена в основу проектирования индукционного нагревателя минимальной длины. Задача минимизации длины индукционного нагревателя решается с учетом ряда конструктивных и режимных фак-

торов при наличии энергетических и технологических ограничений, накладываемых источниками питания и технологией. В качестве ограничений рассматриваются удельная мощность нагрева, максимальная температура нагрева, перепад температур по объему изделия, скорость нагрева.

Задача на минимум длины двухчастотного нагревателя формулируется следующим образом [19].

Для объекта, описываемого уравнениями вида (1)–(9), требуется определить минимальную длину двухсекционного нагревателя, при которой в установившемся режиме обеспечивается заданное технологией температурное распределение по объему заготовки на выходе из нагревателя

$$T(r, x, t) = T_{зад}(r, x) \pm \Delta T_{доп.}$$

при наличии энергетических и технологических ограничений вида:

– удельная поверхностная мощность первой секции индуктора

$$0 \leq p_1 \leq p_{1max}, \text{ кВт/м}^2;$$

– удельная поверхностная мощность второй секции индуктора

$$0 \leq p_2 \leq p_{2max}, \text{ кВт/м}^2;$$

– максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева)  $(T_{нов} - T_{ц})_I \leq \Delta T_1, \text{ }^\circ\text{C};$

– максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению

$$T(r, x, \tau_{кон}) \leq T_{max}, \text{ }^\circ\text{C};$$

– перепад температур между наиболее нагретой точкой и центром заготовки на выходе из нагревателя –  $(T_{max} - T_{ц}) = \Delta T_{доп.}$

Максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева) и предельное значение температуры поверхности заготовки на выходе из первой секции индуктора определяются технологическими требованиями.

Варьируемые параметры:

1. Частота питающего напряжения.
2. Удельная мощность нагрева по длине первой секции нагревателя

$$0 \leq p_1 \leq p_{1max}, \text{ кВт/м}^2.$$

3. Удельная мощность нагрева по длине второй секции нагревателя

$$0 \leq p_2 \leq p_{2max}, \text{ кВт/м}^2.$$

В качестве начальных условий принимается радиальное температурное распределение заготовки, находящейся на входе в первую секцию. Точность приближения результирующего температурного распределения к требуемому оценивается по величине максимального отклонения температуры по объему нагреваемой заготовки на выходе из нагревателя.

Как правило, если нет специальных требований к характеристикам индукционного нагревателя, выбор оптимальной частоты определяется условиями максимального электрического КПД, максимального коэффициента мощности и минимально возможным временем нагрева до заданной температуры, что для мето-

дического нагревателя аналогично конструкции нагревателя с минимальной длиной. Значение предельного электрического КПД может быть получено на основании известных зависимостей [10, 12] либо серии экспериментов, проведенных для нескольких частот при одинаковых геометрических размерах индукционной системы.

Оптимальное по критерию минимума длины нагревателя распределение мощности нагрева по длине нагревателя с учетом ограничения на температуру поверхности заготовки состоит из двух интервалов. На первом интервале нагрев осуществляется при максимально допустимой удельной поверхностной мощности. Исходя из этого предположения определяют длину первой секции. Необходимым условием при поиске длины первой секции является достижение температурой металла в точке, соответствующей глубине проникновения тока на частоте второй секции, значения, при котором металл теряет магнитные свойства. Частота тока во второй секции нагревателя определяется по известным соотношениям для сквозного нагрева немагнитной стали [10].

Для реализации методики оптимального проектирования индукционного нагревателя разработан алгоритм последовательного решения задачи оптимизации с улучшением требуемых показателей на каждой итерации.

В процессе поиска оптимума на каждой итерации происходит пересчет электромагнитной задачи из-за уточнения распределения температуры по радиусу и длине нагревателя. Процесс заканчивается, если полученное температурное распределение и оптимизируемые параметры – длины каждой секции нагревателя – оказываются близкими к их значениям на предыдущем этапе.

Задача поиска состоит в определении длины участков и уровня мощности с учетом накладываемых технологических, энергетических и конструктивных ограничений.

После проверки полученных результатов на соответствие накладываемым ограничениям решение считается завершенным. Далее производится расчет интегральных параметров системы: расчет и выбор числа витков и сечения проводов катушки обоих индукторов в соответствии с выбранной частотой и напряжением источника питания и расчет системы охлаждения по известной методике [20].

В индукционных нагревательных установках методического действия заготовки перемещаются дискретно [21–23]. В нагревателе одновременно находятся  $N$  заготовок, причем количество заготовок в каждой секции двухчастотного нагревателя может отличаться. Это обусловлено различными причинами, прежде всего наличием разных по уровню предельных значений удельной мощности нагрева для секций, работающих на различных частотах.

Решение задачи оптимизации длины нагревателя по приведенной методике рассмотрено на конкретном примере двухсекционного индукционного нагревателя методического действия для нагрева мерных стальных ферромагнитных заготовок до температур пластической деформации.

В работе выполнены расчеты параметров нагревателей для исходных данных, представленных в табл. 1.

Технологические требования к режиму нагрева [24]:

- на выходе из нагревателя средняя температура заготовки  $T=1180\pm 70\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- удельная поверхностная мощность  $0 \leq p_{2\max} \leq 2500\text{ кВт/м}^2$ ;
- максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева)  $(T_{нов} - T_u)_I \leq 60^\circ\text{C}$ ;

– максимальная температура наиболее нагретой точки по сечению заготовки  
 $T_{\max}(r, x, \tau) \leq 1250^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1

**Параметры нагреваемых заготовок**

Наименование детали	Материал детали	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Масса m, кг	Производительность П, кг/час
Заготовка для нагрева под обработку на деформирующем оборудовании	Ст19ХГНМА Ст14ХНЗМА	120÷160	350	30÷56	3000

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров нагревателей различного конструктивного исполнения – односекционного нагревателя с рабочей частотой 1000 Гц, двухсекционного двухчастотного нагревателя с частотами соответственно 50 и 1000 Гц и нагревателя оптимальной конструкции с рабочими частотами 500 и 2400 Гц в секциях.

Таблица 2

**Сравнительные характеристики нагревателей**

Параметр	Одночастотный индуктор	Двухчастотный индуктор		Двухчастотный индуктор минимальной длины	
		1-я секция	2-я секция	1-я секция	2-я секция
Частота, Гц	1000	50	1000	500	2400
Длина секции, м	3,2	1,15	1,75	1,15	1,15
Общая длина, м	3,2	2,9		2,3	
Число заготовок	10	8		6	
Диаметр, м	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
U, В	800	380	800	800	800
P, кВт	543	239,4	289,5	219,4	270,7
$\eta_{\text{эл.}}$	0,718	0,72	0,74	0,76	0,78
$\eta_m$	0,803	0,835	0,84	0,852	0,86
$\eta_{\Sigma}$	0,576	0,61	0,62	0,647	0,671
$\cos\varphi$	0,107	0,26	0,083	0,092	0,067

Полученный алгоритм распределения мощности по длине двухсекционного нагревателя представляет собой двухинтервальную кусочно-постоянную функцию. Уровень мощности для каждой секции рассчитывается исходя из условия обеспечения технологического ограничения на температуру по объему заготовки в конце нагрева, т. е. сводится к выполнению условия

$$T_{\max}(r_{\max}, x_{\max}, t) \leq T_{\text{дон}},$$

где  $r_{\max}, x_{\max}$  – координаты точки с максимальной температурой.

Приведенные в качестве примера результаты получены для технологии, по которой допустимая точность нагрева составляет 150 град. При повышении точности нагрева алгоритм расчета мощности в секциях нагревателя остается неизменным, но одновременно увеличивается длина второй секции (количество заготовок во второй секции) и мощность каждой секции.

Результаты расчета температурного распределения в загрузке при минимальной длине нагревательной системы приведены на рис. 1÷4.

На рис. 2 и рис. 4 приведены графики радиального распределения температуры через каждые 20 сек в процессе нагрева заготовки на последней позиции. Как следует из графиков, координата точки с максимальной температурой находится внутри заготовки. Ее координата определяется величиной тепловых потерь с поверхности заготовки. С уменьшением потерь она приближается к поверхности. На рис. 3 и рис. 5 приведены графики аксиального распределения температуры в сечениях в различных точках по радиусу заготовок.

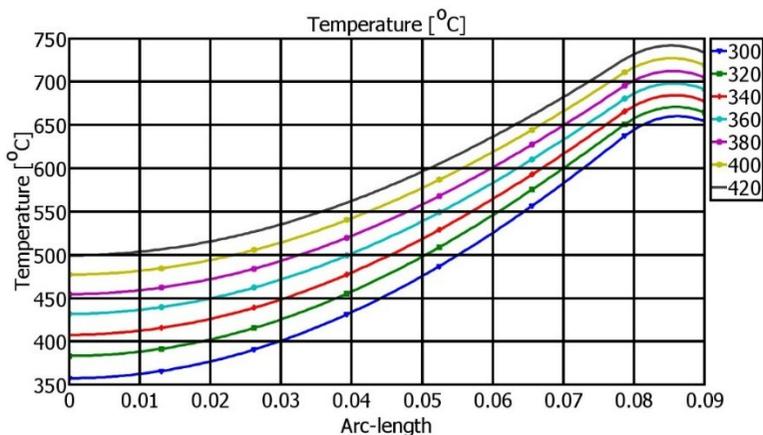


Рис. 2. Графики радиального распределения температуры в заготовке на выходе первой секции

На интенсивность нагрева существенное влияние оказывают физические свойства металла, изменяющиеся в процессе нагрева. С ростом температуры увеличивается удельное сопротивление металла, изменяется напряженность магнитного поля и магнитная проницаемость. Влияние этих характеристик отражается на мощности, выделяющейся в каждой заготовке. Характер распределения мощности тепловыделения в заготовках по длине загрузки при постоянной мощности секций представлен на рис. 6.

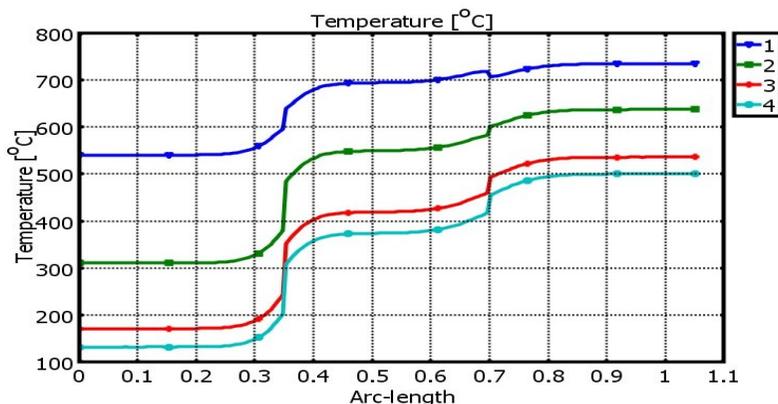


Рис. 3. Графики аксиального распределения температуры в первой секции: 1 — на поверхности; 2 — на глубине 30 мм; 3 — на глубине 60 мм; 4 — в центре

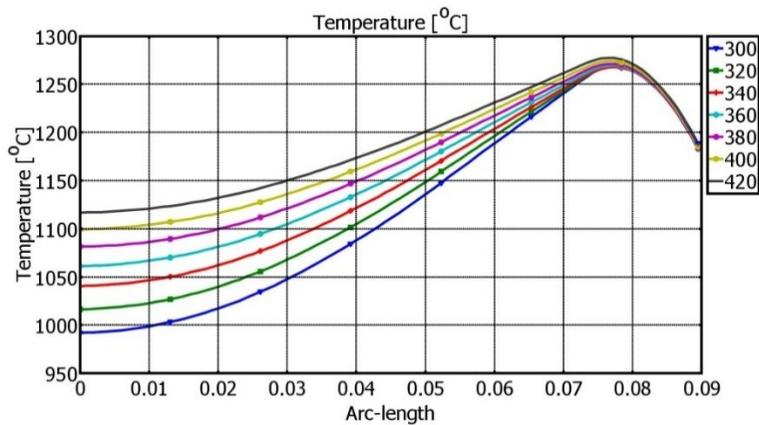


Рис. 4. Результирующее радиальное температурное распределение в заготовке на выходе из нагревателя

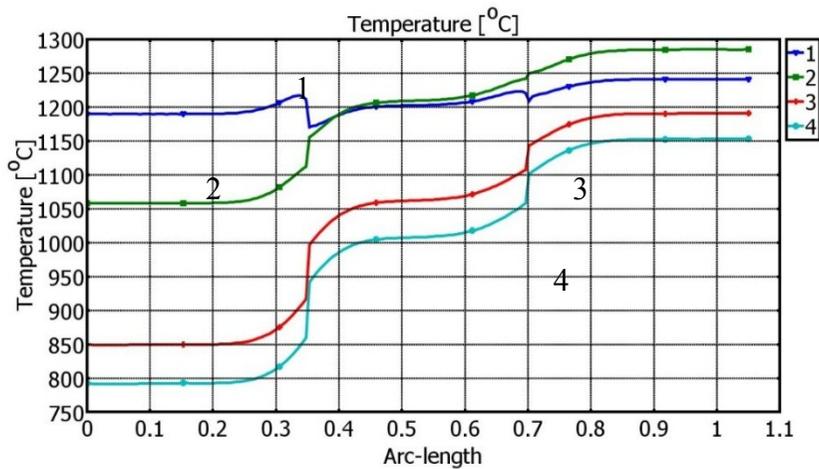


Рис. 5. Графики аксиального распределения температуры в секции повышенной частоты:

1 – на поверхности; 2 – на глубине 30 мм; 3 – на глубине 60 мм; 4 – в центре

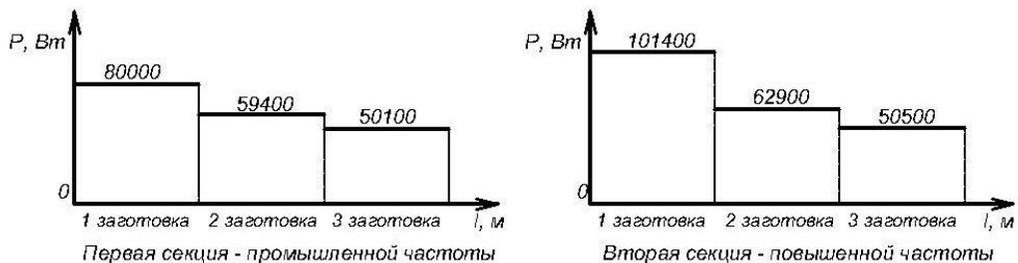


Рис. 6. Распределение мощности тепловыделения по длине загрузки

Неравномерное распределение мощности, выделяемой в заготовках, объясняется влиянием изменяющихся в процессе нагрева свойств металла загрузки – магнитной проницаемости и удельного сопротивления – на мощность тепловыделения в заготовках.

Как следует из представленных результатов, предложенная методика расчета

оптимальных конструктивных и режимных параметров двухчастотного нагревателя дает существенные преимущества, заключающиеся в улучшении массогабаритных показателей нагревательной системы и снижении суммарных энергозатрат. Так, энергетические характеристики односекционного нагревателя, работающего на частоте 1000 Гц, существенно отличаются от аналогичных характеристик двухчастотного индукционного нагревателя. Длина двухчастотного индукционного нагревателя, рассчитанного по предложенной методике, при той же производительности составляет 2,3 м, в то время как длина нагревателя, реализованного на рабочей частоте 1000 Гц, составляет 3,2 м. Уменьшение длины двухчастотного нагревателя привело к повышению теплового и общего КПД установки. Уменьшилась также реактивная мощность индуктора, емкость конденсаторной батареи и число конденсаторов для компенсации реактивной мощности нагревателя.

### Заключение

На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева разработан алгоритм поиска конструктивных и режимных параметров двухсекционного нагревателя, минимизирующий массогабаритные показатели нагревателя в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от заданного распределения. Предложенная методика использована для расчета установившихся режимов двухсекционного нагревателя с заданными выходными характеристиками нагрева – температурным распределением по объему заготовки на выходе из нагревателя с допустимой точностью. Определена оптимальная частота для каждой секции нагревателя исходя из условия максимального коэффициента полезного действия. Предложена итерационная процедура определения оптимальной длины двухсекционного нагревателя с использованием численных моделей электромагнитных и тепловых полей. Предложенная методика учитывает различные виды теплообмена в системе «загрузка – футеровка» в секциях нагревателя. Результаты исследований позволили уменьшить на 23 % длину нагревательной системы при одновременном снижении на 12 % суммарных потерь энергии по сравнению с нагревателем, работающим на одной частоте. Показано, что при повышении точности нагрева алгоритм расчета оптимальной длины нагревателя остается неизменным, при этом увеличивается длина второй секции нагревателя и потребляемая мощность.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Безручко И.И.* Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 127 с.
2. *Головин Г.Ф., Зимин Н.В.* Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Под ред. А.Н. Шамова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 87 с.
3. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А.* Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2(24). – С. 15–17.
4. *Демидович В.Б., Никитин Б.М., Иванов В.Н., Червинский В.И., Баранкова И.И.* Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии // Индукционный нагрев. – 2008. – № 4. – С. 20–26.
5. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
6. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. – 657 p.
7. *Афиногентов А.А., Деревянов М.Ю.* Эффективные стратегии функционирования производ-

- ственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 162–167.
8. *Raport E.Y.* Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, Vol. 51, No. 3, pp. 375–390. Импорт-фактор журнала в Web of Science 0,191.
  9. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла: моногр. – М.: Наука, 2012. – 219 с.
  10. *Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А.* Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
  11. *Кувалдин А.Б.* Индукционный нагрев ферромагнитных сталей. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
  12. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
  13. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
  14. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
  15. *Кувалдин А.Б.* Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных средах // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 56–61.
  16. *Базаров А.А.* Моделирование процесса теплопроводности для задач синтеза систем управления в среде MATLAB // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 33. – С. 7–11.
  17. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2009.
  18. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.* Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2(50). – С. 128–139.
  19. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
  20. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
  21. *Данилушкин А.И., Князев С.В., Кожемякин А.В.* Оптимизация энергопотребления в системах электроснабжения кузнечных индукционных нагревателей // Электромеханика. Известия вузов. Спец. выпуск «Электроснабжение». – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – С. 34–35.
  22. *Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А.* Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 143–153.
  23. *Турбин В.В.* Численное моделирование процесса проходного индукционного нагрева металла перед пластической деформацией // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2017. – № 1–2. – С. 178–180.
  24. *Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П.* Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно-непрерывного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (72). – С. 111–116.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2020 г.*

# OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL TECHNOLOGY COMPLEX FOR HIGH-PERFORMANCE INDUCTION HEATING LINES

*A.I. Danilushkin, D.A. Zhivotyagin, S.S. Kibkalo, D.V. Surkov*

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

**Abstract.** *The paper discusses the design issues of a high-performance induction installation for heating ferromagnetic billets before processing on deforming equipment. Specific features of the technological process of heating ferromagnetic billets to plastic strain temperatures are noted. It is shown that in order to increase the efficiency of the process, the heating of large-sized preforms from ferromagnetic steel is advisable to be carried out in a two-frequency induction heater with two autonomous sections. A study of the heating process in a two-section heater of ferromagnetic billets was carried out taking into account the nonlinear dependence of the physical characteristics of the heated billets metal on the temperature changing during heating. The problem of minimizing the length of a two-section heater is formulated and solved taking into account energy and technological limitations. A condition for determining the optimal length of the first section is to achieve a temperature corresponding to the loss of magnetic properties in the layer equal to the depth of current penetration at the frequency of the second section power supply. The results of numerical calculation of the optimal parameters of a two-section heater are presented. It is shown that the power distribution algorithm along the length of a two-section heater is a piecewise constant function. The results of calculating the temperature distribution in the workpieces during heating are presented. The results of the study can be used to solve the problem of optimizing the structural and operational parameters of a multi-section heater.*

**Keywords:** *induction heating, frequency, mathematical model, temperature distribution, optimal design.*

## REFERENCES

1. *Bezruchko I.I.* Indukcionnyj nagrev dlja ob#emnoj shtampovki. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 127 s.
2. *Golovin G.F., Zimin N.V.* Tehnologija termicheskoj obrabotki metallov s primeneniem indukcion-nogo nagreva / Pod red. A.N. Shamova. L.: Mashinostroenie. Leningr.otd-nie, 1990. 87 s.
3. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Sit'ko P.A.* Modelirovanie i optimizacija indukcionnyh nagrevatelej mernyh zagotovok v kuznechnom proizvodstve. Indukcionnyj nagrev, 2013. № 2(24). S. 15–17.
4. *Demidovich V.B., Nikitin B.M., Ivanov V.N., Chervinskij V.I., Barankova I.I.* Aktual'nye jenergos-beregajushhie tehnologii indukcionnogo nagreva v metallurgii. Zh–l «Indukcionnyj nagrev», 2008, № 4, s. 20–26.
5. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Teorija i raschet ustrojstv indukcionnogo nagreva. L.: Jener-goatomizdat, 1988. 280 s.
6. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. 657 p.
7. *Afinogentov A.A., Derevjanov M.Ju.* Jeffektivnye strategii funkcionirovanija proizvodstvennogo kompleksa «nagrev – obrabotka metalla davleniem» // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Serija: Tehniceskie nauki, 2015, № 3, s. 162–167.
8. *Rapoport E.Y.* Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, Vol. 51, No. 3, p. 375–

---

*Aleksandr I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Denis A. Zhivotyagin, Postgraduate Student.  
Sergey S. Kibkalo, Postgraduate Student.  
Dmitry V. Surkov Postgraduate Student.*

390. Impakt faktor zhurnala v Web of Science 0,191.
9. *Raport Je.Ja., Pleshivceva Ju.Je.* Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami indukcionnogo nagreva metalla: monogr. M.: Nauka, 2012. M.: Nauka, 2012. 219 s.
  10. *Sluhockij A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A.* Ustanovki indukcionnogo nagreva. L.: Jenergoizdat, 1981. 328 s.
  11. *Kuvaldin A.B.* Indukcionnyj nagrev ferromagnitnyh stalej. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 200 s.
  12. *Vajnberg A.M.* Indukcionnye plavil'nye pechi. M.: Jenergija, 1967. 416 s.
  13. *Kartashov Je.M.* Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel. M.: Vysshaja shkola, 2001. 550 s.
  14. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen (Spravochnik). M.: Jenergija, 1978. 480 s.
  15. *Kuvaldin A.B.* Matematicheskie modeli dlja issledovanija jelektromagnitnogo polja v ferromagnitnyh sredah // *Jelektrichestvo*. 2005. № 11. s. 56–61.
  16. *Bazarov A.A.* Modelirovanie processa teploprovodnosti dlja zadach sinteza sistem upravlenija v srede MATLAB. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija «Tehničeskije nauki», vyp. 33, 2005 s. 7–11.
  17. ELCUT. Modelirovanie dvumernyh polej metodom konechnyh jelementov. Rukovodstvo pol'zovatelja. Versija 5.9. S-Pb.: Proizvodstvennyj kooperativ TOR, 2009.
  18. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A.* Kompleksnoe modelirovanie i upravlenie procesom nepreryvnogo indukcionnogo nagreva ferromagnitnyh zagotovok. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija «Tehničeskije nauki», 2016, Vyp. № 2 (50). S. 128–139.
  19. *Raport Je.Ja.* Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami. M.: Vysshaja shkola, 2009, 677 s.
  20. *Sluhockij A.E., Ryskin S.E.* Induktory dlja indukcionnogo nagreva. L.: Jenergija, 1974. 264 s.
  21. *Danilushkin A.I., Knjazev S.V., Kozhemjakin A.V.* Optimizacija jenergotreblenija v sistemah jelektrosnabzhenija kuznechnyh indukcionnyh nagrevatelej // *Jelektromehanika. Izvestija vuzov. Special'nyj vypusk «Jelektrosnabzhenie»*. Novočerkassk: JuRGTU (NPI), 2009. S. 34–35.
  22. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Zhivotjagin D.A.* Parametricheskij analiz i optimal'noe proektirovanie indukcionnoj sistemy po kriteriju maksimal'nogo koeficienta poleznogo dejstvija // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskije nauki. 2018. № 3. S. 143–153.
  23. *Turbin V.V.* Chislennoe modelirovanie processa prohodnogo indukcionnogo nagreva metalla pered plasticheskoj deformaciej // *Novaja nauka: Problemy i perspektivy*. 2017. № 1–2. S. 178–180.
  24. *Danilushkin A.I., Kozhemjakin A.V., Mostovoj A.P.* Issledovanie rezhima nagreva ferromagnitnyh zagotovok v dvuhchastotnom indukcionnom nagrevatele diskretno-nepreryvnogo dejstvija. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija «Tehničeskije nauki». 2013. Vyp. № 3 (72), s. 111–116.