

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ТРЕХФАЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

*А.И. Данилушкин, Е.А. Никитина, Д.Н. Пименов*

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

*Исследуются взаимосвязанные электромагнитные и тепловые процессы в системе «индуктор – цилиндрическая заготовка» при нагреве в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем. Отмечены специфические особенности методики расчета, обусловленные физически неоднородной структурой системы нагрева, сложным характером теплообмена между элементами системы и наличием нелинейностей. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей в нагреваемой заготовке и элементах индукционной системы.*

**Ключевые слова:** индуктор, нагрев, моделирование, вихревые токи, температура.

**Введение.** Практически во всех отраслях промышленности находят широкое применение индукционные системы для преобразования электромагнитной энергии в тепловую. Опыт применения индукционных установок для технологического нагрева заготовок в линиях горячей обработки металла показывает, что они являются перспективными по ряду важнейших признаков. Они надежны и безопасны и позволяют легко осуществить автоматическое управление процессом нагрева. Компактность индукционных нагревателей позволяет размещать их непосредственно там, где требуется нагрев, тем самым исключая потери тепла при его транспортировке.

В то же время разнообразие форм индукционных нагревателей, которые могут быть использованы для технической реализации одной и той же задачи, приводит к необходимости решения ряда специфических проблем. Выбор конструктивного исполнения диктуется требованиями, предъявляемыми к нагревателю конкретным технологическим процессом, условиями работы, уровнем рабочих температур, производительностью, энергоэффективностью и т. д.

Известные конструктивные решения для мощных индукционных нагревательных установок, работающих на промышленной частоте, представляют собой многосекционную систему индукторов и не обеспечивают симметричную нагрузку фаз даже при полном равенстве собственных сопротивлений отдельных секций трехфазного нагревателя. Так, например, часто индукторы располагают друг за другом с минимальным осевым зазором для снижения провала удельной мощности в зоне стыков, а также сгущают витки обмотки в этой области. Это приводит к увеличению взаимной индуктивности обмоток, а значит, и к неравномерной загрузке фаз питающей сети (эффект переноса мощности из одной фазы в другую), особенно заметной для крупных установок большой мощности. В связи с этим возникает необходимость поиска возможных путей совершенствования имеющихся конструкций и принципов работы установок индукционного нагрева с целью обеспечения электромагнитной совместимости с системой электроснабжения и снижения стоимости установленного

---

*Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Екатерина Александровна Никитина, аспирант.*

*Данил Николаевич Пименов, аспирант.*

оборудования. Одним из вариантов такого подхода может быть исследуемая в работе установка индукционного нагрева, особенностью которой является выполнение индуктора с замкнутым цилиндрическим магнитопроводом [1].

**Математическая модель индукционной системы.** Предлагаемая конструкция индукционной системы отличается наличием свойств, характерных для электрических машин, в частности асинхронных. Это предполагает использование сходных методов расчета, хотя и имеющих различные цели. Если для асинхронной машины требуется минимизировать потери мощности на тепло и обеспечить максимальный вращающий момент, то для индуктора главным является получение максимальной мощности внутренних источников тепла в загрузке. Тем не менее наличие магнитопровода с чередующимися по фазе токовыми катушками, так же как и в асинхронных машинах, приводит к необходимости оптимизировать распределение индукции в зубцах и уменьшить поля рассеяния в зазоре между обмоткой индуктора и заготовкой. В общем случае возможно формирование как пульсирующего магнитного поля относительно загрузки, так и вращающегося, что позволяет решать дополнительные технологические задачи.

Геометрическая модель исследуемой индукционной системы представлена на рис. 1.

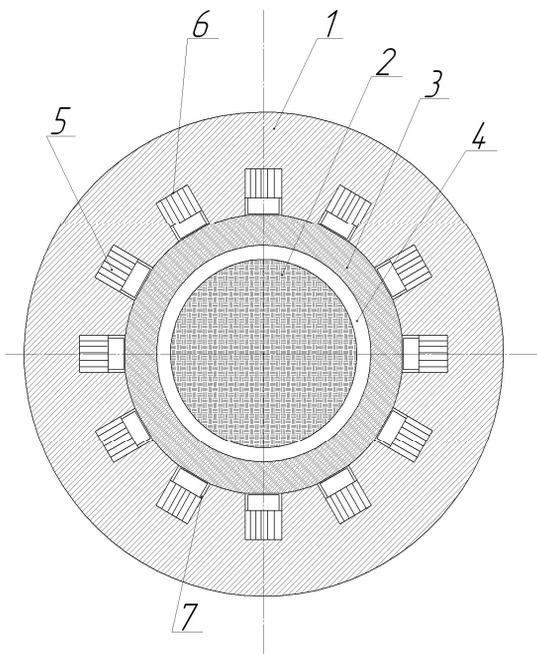


Рис. 1. Геометрическая модель для расчета системы:  
1 – магнитопровод; 2 – заготовка; 3 – футеровка; 4 – воздушный зазор;  
5 – обмотка; 6 – изоляция; 7 – трубка системы охлаждения

Особенностью рассматриваемой индукционной системы является существенная нелинейная зависимость электрофизических характеристик от магнитного состояния загрузки. В связи с этим повышение точности расчета параметров поля, в частности зависимости магнитной проницаемости от температуры нагреваемого изделия в течение всего процесса нагрева, является первоочередной задачей. Существующие программные комплексы чаще всего обеспечивают расчет магнитной проницаемости в зависимости от напряженности магнитного поля. Введение температурной зависимости обеспечивается внешним воздействием на вводимые параметры, что тре-

бует объединения электромагнитной и тепловой задач. Еще одна проблема состоит в том, что нелинейные электромагнитные задачи с учетом кривых намагничивания решаются для нестационарных процессов.

Чаще всего на первом этапе решается нелинейная магнитная задача, где определяются основные магнитные параметры, а затем уже решается линейная (с постоянной магнитной проницаемостью в различных зонах объекта) стационарная электромагнитная задача. Для индуктора с ферромагнитной замкнутой системой такой подход не обеспечивает достаточной точности расчетов, поэтому в работе используется более сложный алгоритм, содержащий решение нелинейной стационарной задачи совместно с решением тепловой задачи и пересчетом распределения магнитной проницаемости на каждом шаге.

В общем случае процесс индукционного нагрева цилиндрической заготовки в трехфазном индукторе с замкнутым магнитопроводом описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей [1, 2]:

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a(T) \left( \frac{\partial^2 T(r, \theta, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \theta, x, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r, \theta, x, t)}{\partial \theta^2} \right) + W(r, \theta, x, t), \quad (2)$$

где  $H(r, x, t)$  – напряженность магнитного поля;  $\mu_a$  – магнитная проницаемость;  $\sigma(T)$  – удельная электропроводимость;  $T(r, \theta, x, t)$  – температура;  $t$  – время;  $r$  и  $x$  – радиальная и аксиальная координаты;  $\theta$  – угловая координата;  $a(T) = \lambda(T)/(c(T)\gamma)$  – коэффициент температуропроводности;  $c(T)$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – удельная плотность материала;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $W(r, x, \theta, t)$  – функция распределения внутренних источников тепла в заготовке, определяемая из решения электромагнитной задачи.

Система уравнений (1)–(2) дополняется граничными условиями.

Для электромагнитной задачи используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе  $S_\infty$  и условие симметрии на поверхности симметрии  $S_{0-x}$ , которое заключается в равенстве нулю производной от функции.

Для тепловой задачи используется более широкий спектр граничных условий – от граничных условий второго рода до теплообмена между соприкасающимися телами (граничное условие четвертого рода).

**Исследование электротепловых полей индукционной системы.** Сложность моделирования электротепловых процессов наряду с нелинейными зависимостями параметров процесса от температуры в процессе нагрева обусловлена неоднородной составной структурой системы «индуктор – футеровка – изделие». Основными причинами нелинейностей электромагнитной и тепловой задач являются нелинейная зависимость функции распределения внутренних источников тепла от температуры при высокотемпературном нагреве ферромагнитных заготовок и зависимость теплофизических характеристик материала заготовки от температуры. Кроме того, необходимо учитывать различные условия теплообмена – радиационного, конвективного и кондуктивного – между сопряженными телами с разными теплофизическими свойствами и существенно отличающимся уровнем температур на границах отдель-

ных элементов системы. Для решения поставленных задач используется метод конечных элементов как наиболее полно отвечающий требованиям точности.

В качестве инструментального средства для моделирования тепловых полей в системе сложной геометрии выбран пакет моделирования полей различной природы Elcut 5.6 Profesional [4].

Решение поставленной задачи расчета электромагнитных и тепловых полей осуществляется поэтапно. На первом этапе производится расчет геометрических параметров индуктора. В качестве исходных данных при решении задачи моделирования и расчета системы индукционного нагрева ферромагнитной заготовки в трехфазном поперечном поле принимаются рассчитанные геометрические параметры системы, а также физические свойства материалов. Вторым этапом производится расчет электромагнитной задачи.

Результатом решения электромагнитной задачи является распределение объемной мощности тепловыделения в нагреваемой заготовке. Для осуществления связи с тепловой задачей объемная мощность тепловыделения из электромагнитной задачи передается в тепловую в качестве источников тепла.

Процесс решения тепловой задачи включает в себя также стандартные процедуры. Итогом решения тепловой задачи для заготовки являются температурные распределения по сечению, градиенты распределения температуры, температурные поля в заготовке и элементах индукционной системы.

Решение тепловой задачи для заготовки проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения по мере прогрева слоев заготовки выше точки магнитных превращений в электромагнитной задаче и последующей передачей полученной мощности тепловыделения 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 (внутренних источников тепловыделения). Итерации проводятся до получения заданной в соответствии с технологией температуры заготовки  $|T_{\max} - T_{\text{зад}}| \leq \Delta T_1$  с допустимой погрешностью  $\Delta T_1$ . Одновременно проводится расчет тепловой задачи для футеровки, катушки индуктора и магнитопровода. Процесс решения состоит из аналогичных для вышерассмотренных задач этапов: построение геометрической модели, разбиение ее на конечные элементы, решение, получение и анализ результатов, проверка полученных результатов по условиям максимально допустимой для магнитопровода и катушки индуктора температуры.

В исследуемой установке значение геометрических и электрических параметров индуктора при заданной частоте источника питания определяется геометрическими размерами заготовки и характеристиками материала заготовки и магнитопровода.

Результаты проведенных расчетов – графики зависимостей максимального значения индукции магнитопровода от плотности тока в проводниках, графики зависимости мощности тепловыделения в заготовке от объемной мощности тепловыделения в обмотке, графики зависимости температурного распределения в заготовке в процессе нагрева, графики тепловых потерь в катушке индуктора и магнитопроводе и ряд других зависимостей – дают полное представление об электромагнитных и тепловых характеристиках системы. На рис. 2 приведен график распределения плотности полного тока по радиусу заготовки для ферромагнитной заготовки (на первой стадии нагрева), а на рис. 3 – для немагнитной заготовки под пазом и зубцом магнитопровода соответственно.

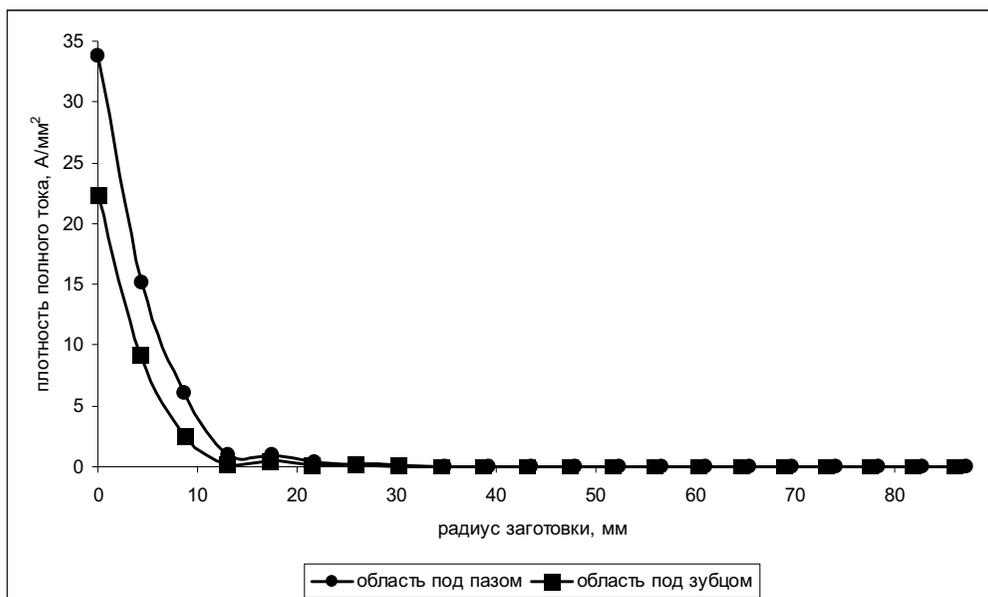


Рис. 2. Распределение плотности полного тока для ферромагнитной заготовки

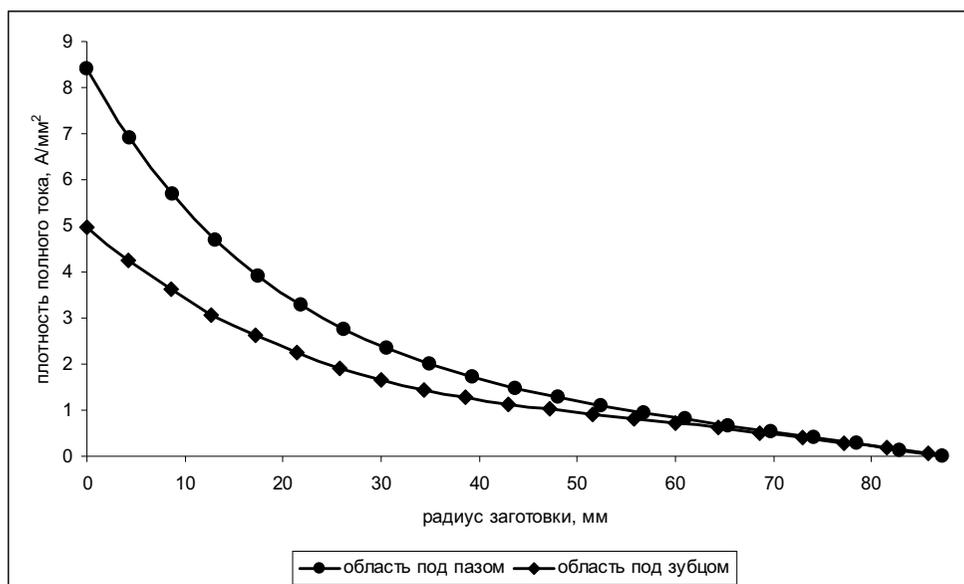


Рис. 3. Распределение плотности полного тока по радиальной координате для немагнитной заготовки

Результат решения тепловой задачи для заготовки представлен на рис. 4. Неравномерность температурного распределения по окружности заготовки обусловлена неравномерностью плотности тока под пазом и зубцом магнитопровода и наблюдается только на расстоянии от поверхности, соответствующем глубине проникновения тока в металл. Разность температур между максимально нагретой точкой под пазом и минимально нагретой точкой под зубцом составляет 15÷18 град. С прибли-

жением к центру изотермы принимают вид концентрических окружностей с центром, совпадающим с осью симметрии заготовки.

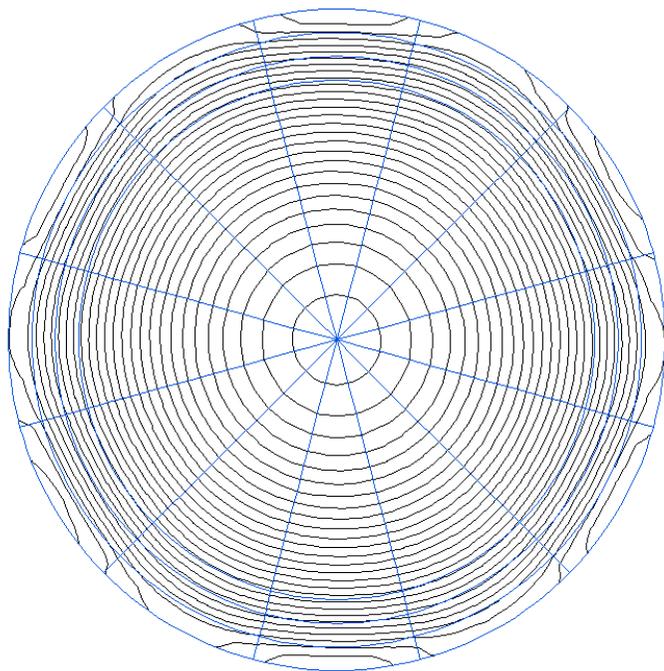


Рис. 4. Изотермы теплового поля заготовки

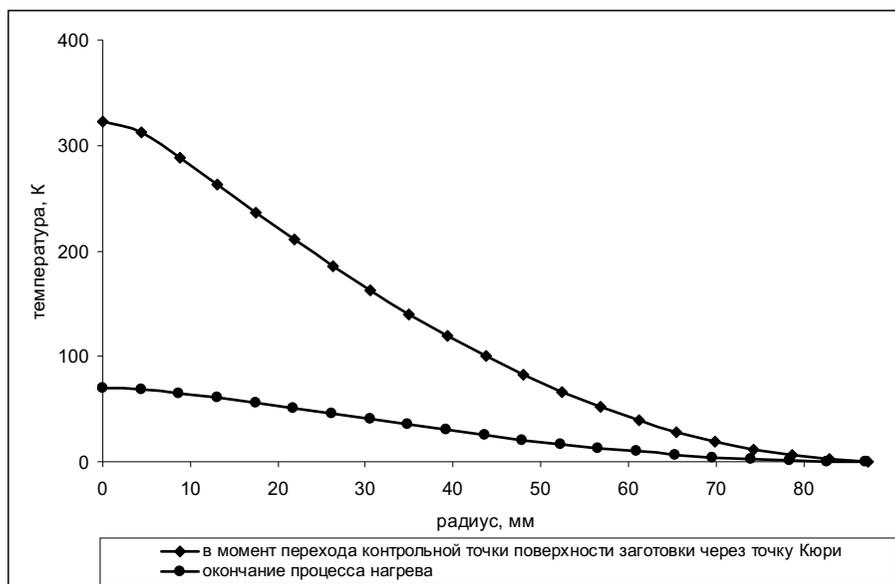


Рис. 5. Перепад температуры по радиусу заготовки

На рис. 5 приведены графики температурных перепадов по сечению заготовки в момент перехода температуры поверхности через точку Кюри и в конце нагрева до температуры пластической деформации.

На рис. 6 приведено температурное распределение в различных точках по радиусу заготовки в процессе нагрева. Нижняя кривая соответствует температурному распределению в центре заготовки.

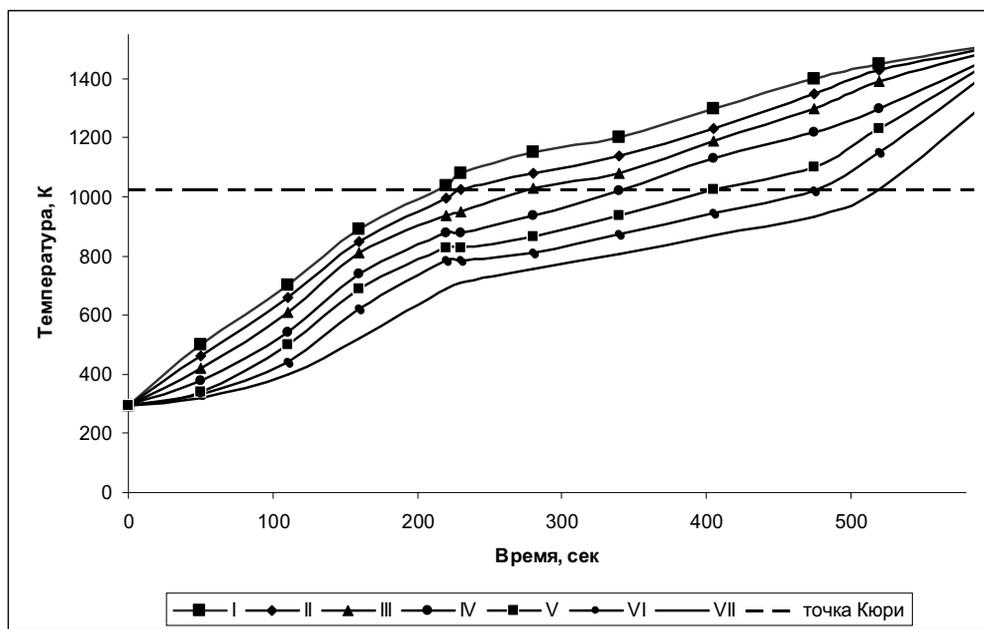


Рис. 6. Температурное распределение в контролируемых точках в процессе нагрева (I, II, III, IV, V, VI – координаты контролируемых точек сечения заготовки с шагом 8-10 мм)

**Заключение.** Как показывают результаты анализа, определяющим фактором, оказывающим существенное влияние на электромагнитные и тепловые характеристики всей системы, является соотношение ширины паза и зубца магнитопровода. Увеличение ширины паза, в котором располагается катушка индуктора, по отношению к ширине зубца позволяет получить максимальную мощность тепловыделения в заготовке. Оптимальное соотношение ширины паза и ширины зубца магнитопровода, которое обеспечивает максимальную мощность тепловыделения в заготовке, определяется допустимым значением магнитной индукции зубца магнитопровода и составляет для выбранной марки стали 1,5:1.

Эффективность индукционного нагрева определяется при прочих равных условиях плотностью тока в катушке индуктора. В установках высокотемпературного индукционного нагрева максимальная плотность тока при принудительном охлаждении обмотки индуктора водой определяется интенсивностью охлаждения и составляет  $15 \div 25 \text{ А/мм}^2$ . В предлагаемой конструкции индуктора охлаждение осуществляется с помощью специальной трубки, уложенной в пазу магнитопровода вместе с индуктирующим проводом и изолированной от него. Так как при таком способе охлаждения теплоотвод от индуктирующего провода ухудшается, максимальное значение плотности тока необходимо поддерживать на уровне  $10 \div 15 \text{ А}$ .

Из физических величин ферромагнитных устройств с геометрией связаны лишь плотность тока и индукция. При этом на геометрию эти величины влияют неодно-

значно. При заданных потерях в стали или токе намагничивания максимальное значение индукции достигается при наименьшей средней линии магнитопровода. Увеличение плотности тока с ограничением потерь мощности или напряжения в катушках достигается минимизацией объема обмоточного материала, то есть путем уменьшения сечения и средней длины катушек. Совершенно противоположно влияет геометрия на увеличение индукции и плотности тока при ограничениях по нагреву. Здесь должны быть развитыми поверхности охлаждения, что потребует вариации всех трех относительных размеров.

Увеличение максимальной рабочей индукции при постоянстве остальных параметров всегда увеличивает мощность устройства и тем самым улучшает удельно-экономические показатели. Естественным ограничением для увеличения индукции является свойство электротехнических сталей насыщаться, после чего индукция почти не меняется. Для устройств индукционного нагрева рабочая индукция должна быть значительно ниже индукции насыщения. Кроме того, ограничение индукции связано также с необходимостью ограничения температуры магнитопровода из-за потерь в стали, а иногда – заданного тока намагничивания, заданного коэффициента полезного действия, также во многом зависящих от потерь в стали.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Никитина Е.А. Моделирование и расчет внутренних источников тепла в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2009. – Вып. №2 (24). – С. 120-127.
2. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
3. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: Рук-во пользователя. Версия 5.7. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2009.

*Статья поступила в редакцию 24 июня 2012 г.*

## RESEARCH ON ELECTROMAGNETIC AND THERMAL FIELDS IN THE ELEMENTS OF A THREE-PHASE INDUCTION HEATER

*A.I. Danilushkin, E.A. Nikitina, D.N. Pimenov*

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

*The interrelated electromagnetic and thermal processes in an "inductor-cylindrical workpiece" system during heating in a three-phase inductor with a rotating magnetic field are investigated. The calculation method features due to the physically inhomogeneous structure of the heating system, the complex nature of heat transfer between the system elements and the presence of nonlinearities are marked. The numerical calculation results for electromagnetic and thermal fields in a heated workpiece and in components of an induction heating system are presented.*

**Keywords:** *inductor, heating, modeling, eddy currents, temperature.*

---

*Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Ekaterina A. Nikitina, Postgraduate Student.  
Danil N. Pimenov, Postgraduate Student.*