

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**Бийский технологический институт (филиал) государственного  
образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Алтайский государственный технический  
университет имени И.И. Ползунова»**

**ИЗМЕРЕНИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
(ИАМП–2010)**

Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции  
6–7 октября 2010 года

Бийск  
Издательство Алтайского государственного технического университета  
им. И.И. Ползунова  
2010

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**А.И. Данилушкин, Е.А. Никитина**

*Самарский государственный технический университет, г. Самара*

В работе исследуется процесс индукционного нагрева цилиндрического изделия во вращающемся магнитном поле, создаваемом обмоткой трехфазного индуктора. Для создания вращающегося магнитного поля используется конструкция индуктора в форме статора трехфазной асинхронной машины. В роторе, в качестве которого рассматривается нагреваемая заготовка, тепло выделяется под действием вихревых токов, наведенных вращающимся магнитным полем обмотки статора. Предлагаемая конструкция позволит обеспечить равномерную загрузку трех фаз сети, повысить коэффициент мощности системы и коэффициент полезного действия, уменьшить влияние краевых эффектов.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, вращающееся магнитное поле.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений Федеральной целевой программы «Энергосбережение России» является повышение энергоэффективности энергоемких отраслей промышленности, где в результате мероприятий, предусмотренных программой, должна повыситься конкурентоспособность производимой продукции.

К энергоемким электротермическим технологиям обработки ответственных изделий относятся процессы высокотемпературного индукционного нагрева массивных заготовок для последующей обработки на деформирующем оборудовании. Установленная мощность индукционных нагревателей достигает нескольких сотен киловатт в единице оборудования, а общая установленная мощность достигать десятков мегаватт. Работа таких мощных потребителей сопровождается ухудшением качества напряжения, в частности, несимметричной нагрузкой фаз и низким коэффициентом мощности. Это приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению срока службы оборудования (в частности, электрических машин), снижению коэффициента использования (загрузки) источника питания, что в результате приводит к увеличению себестоимости производства.

Для уменьшения негативного влияния электротермических установок на качество электроэнергии и работу других потребителей используются дополнительные устройства, весогабаритные и стоимостные параметры которых зачастую превышают аналогичные параметры самих индукционных установок. К таким устройствам относятся симметрирующие устройства, конденсаторы для компенсации реактивной мощности индуктора, а также различные вспомогательные устройства. Наличие уже этих двух факторов (необходимость наличия симметрирующего устрой-

ства и конденсаторной установки) заставляет искать возможные пути совершенствования имеющихся конструкций и создание новых конструкций установок индукционного нагрева. Один из таких вариантов предложен в настоящей работе.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемая конструкция трехфазного индуктора представляет цилиндрический магнитопровод, в пазах которого расположена трехфазная катушка, выполненная из водоохлаждаемой медной трубки. Заготовка, расположенная во внутренней полости индуктора, является, при условии геометрической симметрии системы, симметричной нагрузкой. Сопровращения фаз индуктора также симметричны, так как все три фазы имеют одинаковые параметры и охвачены общей магнитной системой. Эти обстоятельства обеспечивают абсолютно симметричную нагрузку фаз, что в принципе исключает необходимость симметрирующего устройства.

Вторым существенным преимуществом является более высокий коэффициент мощности. Коэффициент мощности современных индукционных нагревателей промышленной частоты в лучшем случае составляет  $0,4 \div 0,45$ . Реальный  $\cos \varphi$  индукционной установки исследуемой конструкции может достигать  $0,6 \div 0,7$ , что существенно выше, чем у индукционных установок традиционной конструкции. Поэтому компенсация реактивной мощности, даже если и необходима, то требует меньшей мощности компенсирующих устройств, а соответственно снижаются и затраты.

Реализация предлагаемой нестандартной конструкции индукционной установки требует решения ряда задач, связанных с исследованием взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей системы. Сложность моделирования электромагнитных и тепловых процессов обусловлена сложной конфигураци-

ей электромагнитной системы, нелинейной зависимостью электрофизических характеристик нагреваемого материала от температуры, нелинейным характером распределения внутренних источников тепла по радиусу цилиндра.

Моделирование процесса включает в себя решение двух взаимосвязанных задач – электромагнитной и тепловой. Аналитическое описание электромагнитных и тепловых процессов ввиду сложной геометрии требует дополнительно разбиения модели на участки и рассмотрения процессов уже в них, что вводит в расчеты дополнительную погрешность, а также лишает возможности представления о целостности системы и протекающих в ней процессов, и в то же время не дает точного решения. Это обстоятельство обуславливает необходимость для исследования процессов в индукционной установке представленной конструкции использовать численные методы.

В общем случае процесс нагрева рассматриваемого класса объектов описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\{H\} &= \gamma_{ye} E; \\ \operatorname{rot}\{E\} &= -\left\{\frac{\partial B}{\partial t}\right\}; \\ \operatorname{div}\{B\} &= 0; \\ \operatorname{div}\{E\} &= 0; \\ c(r, \theta, x, T) \rho(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Здесь  $\{H\}$ ,  $\{E\}$ ,  $\{B\}$  – векторы напряженности магнитного и электрического полей и магнитной индукции;  $\gamma_{ye}$  – удельная электропроводимость;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\lambda(r, \theta, x, T)$  – компоненты тензора теплопроводности (теплопроводность как функция температуры представляется кубическим сплайном);  $q_v$  – удельная мощность тепловыделения (в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры);  $c(r, \theta, x, T)$  – удельная теплоемкость (в нелинейном случае это функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами);  $\rho(r, \theta, x, T)$  – плотность,  $\theta$  – угловая координата.

Решение системы уравнений Максвелла и Фурье относительно температурного поля, описывающего тепловое состояние объекта, в общем случае возможно только для каждой конкретной технологической ситуации. Однако и в этом случае возникает ряд проблем, затрудняющих получение приемлемого для практических целей решения задачи вследствие

сложной конструкции и структуры взаимодействия полей. В связи с этим в целях изучения основных закономерностей процесса в базовой модели объекта принимается ряд допущений, не искажающих физической сущности явления, но позволяющих получить решение с допустимой погрешностью.

В рассматриваемом случае одномерная математическая модель объекта не позволяет достичь требуемой точности описания процесса нагрева. В связи с необходимостью учитывать и неравномерность распределения температурного поля по длине, температурное поле  $T(r, z, t)$  описывается двумерным уравнением теплопроводности

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} &= a \left( \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{w(r, z, t)}{c\gamma}, \quad (0 < r < R, 0 < z < Z, t > 0). \end{aligned}$$

Здесь  $Z$  – аксиальная координата.

Потери тепла как с боковой, так и с торцевых поверхностей цилиндра будут описываться краевыми условиями третьего рода:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} (T(R, z, t) - T_c) &= 0; \quad \frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad t \geq 0, \\ \frac{\partial T(r, Z, t)}{\partial z} + \frac{\alpha}{\lambda} (T(r, Z, t) - T_c) &= 0, \\ -\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} + \frac{\alpha}{\lambda} (T(r, 0, t) - T_c) &= 0. \end{aligned}$$

Несмотря на общность уравнений для электромагнитного и теплового полей, между ними существует значительная разница. С одной стороны, тепловое поле описывается скалярным уравнением относительно одной переменной  $T$ , а область, в которой определяется поле, обычно составляет только часть пространства, в котором существует электромагнитное поле. Это упрощает задачу. С другой стороны, наличие внутренних источников и нестационарность температурных полей усложняют решение по сравнению с электромагнитной задачей.

При расчете электромагнитного поля в отдельной зоне индукционного нагревателя с учетом вихревых токов, протекающих по проводникам обмоток или массивным участками индукторов, обычно преследуют цель определения дополнительных потерь, вызываемых этими токами, и снижения индуктивных сопротивлений вследствие размагничивающего действия реакции вихревых токов, т. е. определения главным образом интегральных характеристик. С другой стороны, представляет интерес и изменение структуры поля вблизи границ и массивных элементов, а также распределение вихревых токов и вызванных ими потерь, так как термическая стойкость обмоток и других активных элементов установки определяется не средними, а местными максимальными потерями.

Устройства индукционного нагрева являются сложными техническими объектами, в которых про-

текают физические процессы различной природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и много-связных областей. Если не вводить существенных упрощений в постановку задачи, то решение указанной системы уравнений, а значит, и количественное описание изучаемого объекта практически может быть получено только численными методами.

В рассматриваемом случае численный расчет производился с помощью программного комплекса EL-CUT 5.6 Professional.

В процессе исследования были разработаны и уточнены методики расчета полей, в частности, была определена методика проведения вычислительных экспериментов по расчету электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве ферромагнитной заготовки с более точной аппроксимацией зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в процессе нагрева. Значимую роль также играет и подготовительный этап, на котором определяются основные конструктивные и технологические параметры. Применение стандартных подходов расчета электрических машин в данном случае не приемлем, поэтому для каждого конкретного случая необходимо уточнение параметров и применяемых методик расчета.

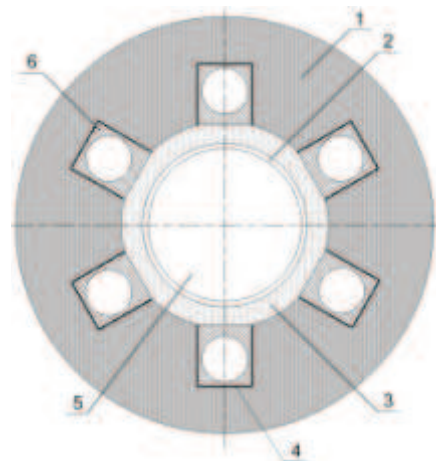
Модель индукционной системы для исследования процессов нагрева представлена на рис. 1.

На рис. 1–3 представлены некоторые результаты исследования процесса индукционного нагрева стальной ферромагнитной цилиндрической заготовки в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем. Параметры физической модели индукционной системы: диаметр заготовки – 140 мм, толщина футеровки (шамот группы В) – 20 мм, величина воздушного зазора между заготовкой и индуктором – 5 мм. Число пазов индуктора – 6. Обмотка индуктора выполнена из стандартной медной трубки специального профиля со смещенным отверстием. Индуктор охлаждается водой. Источником тепла служит объемная плотность тепловыделения, обусловленная вихревыми токами в заготовке. График распределения поверхностной плотности тока по внешнему радиусу заготовки, полученный по результатам решения электромагнитной задачи, представлен на рис. 2.

Тепловая задача в процессе исследования формулируется как задача расчета температурного поля, обусловленного электромагнитными источниками тепла в заготовке. Геометрическая модель заготовки соответствует геометрии электромагнитной задачи.

Неравномерность температурного распределения по окружности заготовки наблюдается только на расстоянии от поверхности, соответствующем глубине проникновения тока в металл. С приближением к центру изотермы принимают вид концентрических ок-

ружностей с центром, совпадающим с осью симметрии заготовки. Максимальный перепад температур по окружности заготовки, представленный на рис. 3, составляет 25 К.



1 – магнитопровод индуктора; 2 – воздушный зазор; 3 – футеровка; 4 – изоляция; 5 – нагреваемое изделие; 6 – медная трубка специального профиля

Рис. 1. Геометрическая модель исследуемой установки

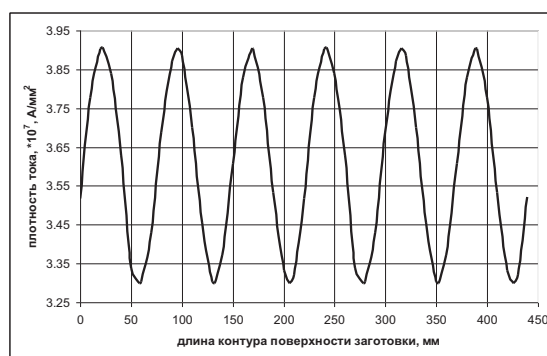


Рис. 2. График мгновенного значения плотности полного тока по внешнему радиусу заготовки

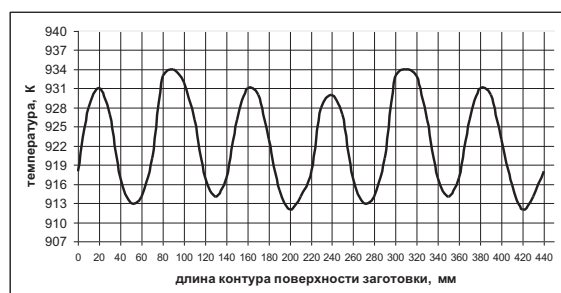


Рис. 3. Распределение температуры по контуру поверхности заготовки

Характер кривой распределения температуры по контуру поверхности заготовки (рис. 3) соответствует характеру распределения источников внутреннего тепловыделения, приведенному на рис. 2 и объясняется различной мощностью нагрева под индуктирующим проводом и под зубцом магнитопровода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предметом дальнейших исследований в этом направлении является оптимизация параметров индукционной системы, обеспечивающей требуемый по технологии температурный перепад по объему изделия за счет вариации конструктивных или режимных параметров.

Перспективным является использование данного принципа для косвенного индукционного нагрева промышленных жидкостей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данилушкин, А.А. Моделирование и расчет внутренних источников тепла в трехфазном индукторе с вращающимся магнит-

ным полем [Текст] / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Е.А. Никитина // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. - 2009. - №2(24). - С. 120-127. - Библиогр. С. 127. ISSN 1991-8542.

2. Данилушкин, А.И. Стационарная модель температурного поля трехфазного индукционного нагревателя с вращающимся магнитным полем [Текст] / А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, Е.А. Никитина // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. - 2010. - №2(26). - С. 140-147. - Библиогр. С. 146. ISSN 1991-8542.

*Данилушкин Александр Иванович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ГОУ ВПО «СамГТУ», тел. (846)2423690, e-mail: epp@samgtu.ru.*

*Никитина Екатерина Александровна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», ГОУ ВПО «СамГТУ», e-mail: nikitinaekaterina63@gmail.com.*

УДК 621.316.7

# К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХКАНАЛЬНОГО СТАБИЛИЗАТОРА АМПЛИТУДЫ

**В.С. Дубровин**

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (ГОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»), г. Саранск*

В статье рассматриваются вопросы построения простого и эффективного стабилизатора амплитуды квадратурных сигналов, обеспечивающего необходимую точность стабилизации в статических и динамических режимах при минимальных искажениях сигналов.

*Ключевые слова: стабилизатор, эффективность, структурная схема, нелинейные искажения.*

## ВВЕДЕНИЕ

Электронные генераторы и формирователи квадратурных гармонических сигналов находят широкое применение в радиоэлектронике, автоматике, системах связи.

Они могут быть использованы для формирования и детектирования однополосного сигнала в передающей и приемной радио- и телевизионной аппаратуре, при построении помехоустойчивых систем радиосвязи и локации, в устройствах антенной техники, устройствах, предназначенных для анализа частотных характеристик систем (цепей).

Схемы измерения составляющих мощности электромагнитных сигналов и помех, схемы, моделирующие различные аналитические функции, также требуют генераторов и формирователей квадратурных сигналов с высокими метрологическими характеристиками.

На базе устройств с квадратурными сигналами достаточно просто реализуются различные  $m$ -фазные преобразователи для систем управления силовой электроники [1], вычислители модулей [2–7], умно-

жители частоты [8], устройства для определения параметров сигнала с квадратурной модуляцией [9].

Точность работы подобных устройств зависит, прежде всего, от точности поддержания амплитудных значений квадратурных сигналов на заданном уровне и сохранении их соотношения в статических и динамических режимах.

По мере развития и совершенствования элементной базы были предложены многочисленные схемотехнические решения построения генераторов квадратурных сигналов, обеспечивающих стабильность амплитуды в пределах 1-3% при коэффициенте нелинейных искажений 0,5-3% [10].

В современных областях техники и при научных исследованиях требуются источники квадратурных гармонических сигналов со стабильностью порядка 0,01–0,1% при нелинейных искажениях 0,005–0,05%.

Вместе с высокими требованиями к статическим параметрам предъявляются также высокие требования и к динамическим характеристикам таких генераторов, поскольку время переходных процессов при перестройке зачастую определяет и характеристики информационно-измерительных систем в целом. Задача одновременного достижения высоких требова-