

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

Академия электротехнических наук Российской Федерации

## **СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Международной научно-технической конференции

# **«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**

(XVI Бенардосовские чтения)

*К 130-летию изобретения электродуговой сварки  
Н.Н. Бенардосом*

**1-3 июня**

I том

**Электроэнергетика**

Иваново 2011

В I томе сборника научно-технической конференции отражены результаты научных исследований в области теории и практики электротехники и электротехнологии; электроэнергетических систем; рассмотрены вопросы надежности, эффективности и диагностики электрооборудования станций и энергосистем; вопросы техногенной безопасности в энергетике.

Редакционная коллегия:

**Тарарыкин С.В.**, ректор, д.т.н., профессор, - председатель  
**Тютиков В.В.**, проректор по НР, д.т.н., профессор,  
**Мошкарин А.В.**, зав. каф. ТЭС, д.т.н., профессор  
**Назарычев А.Н.**, зав. каф. ЭСДЭ, д.т.н., профессор  
**Митькин Ю.А.**, зав. каф. ТЭВН, д.т.н., профессор  
**Полетаев В.А.**, зав. каф. ТАМ, д.т.н., профессор  
**Косяков С.В.**, зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор  
**Колибаба В.И.**, зав. каф. экономики и организации предприятия  
**Клюнина С.В.**, нач. УИУНЛ

ISBN 978-5-89482-726-1  
ный

© □ ГОУВПО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина», 2011.

Следует также обратить внимание на то, что эффективное активное сопротивление индуктора может зависеть от формы поля. Как известно, эффективное активное сопротивление на переменном токе часто значительно больше, чем активное сопротивление на постоянном токе. Вытеснение тока, вызывающее этот эффект, обуславливает в равномерном поле катушки вытеснение тока на сторону проводника, находящуюся внутри катушки. На конце катушки, где поле в области обмотки проходит не параллельно оси катушки, а получает радиальную составляющую, при соответствующем профиле обмоточной меди, могут возникнуть дополнительные потери от вытеснения тока.

Такие краевые явления, кроме концов всего индуктора, возникают также и в местах стыка отдельных катушек и опять тем сильнее, чем больше сдвиг фаз по времени соседних потоков. Таким образом, стремление сделать потери из-за вытеснения тока возможно малыми, приводит к тому, что приходится стремиться к возможно малому сдвигу фаз по времени у соседних потоков.

Трёхфазные индукторы имеют также то преимущество, что отдельные катушки могут включаться порознь, что даёт возможность получать с одинаковыми катушками различные аксиальные плотности мощности и соответствующее распределение температуры. Остающаяся некоторая асимметрия сети в большинстве случаев может быть компенсирована соответствующей схемой соединения катушек. Однако, следует иметь в виду что потребление мощности отдельной катушкой из сети, не находится в прямой зависимости от мощности, индуктированной этой катушкой в садке. В значительной степени потребление мощности из сети зависит от взаимного перекачивания мощности между отдельными катушками.

УДК 621.365

А.И. ДАНИЛУШКИН, д.т.н., профессор,  
А.В. КОЖЕМЯКИН,  
С.В. КНЯЗЕВ, аспиранты  
(СамГТУ) г. Самара

## **Исследование электротепловых процессов в методическом индукционном нагревателе**

При нагреве массивных заготовок в методическом индукционном нагревателе наряду с температурным перепадом по сечению нагреваемого изделия имеет место неравномерное температурное распределение по длине заготовки вследствие значительного перепада температур торцевых поверхностей контактирующих заготовок, что может привести к существенному отклонению температурного распределения заготовки,

находящейся на выходе из индуктора. Для оценки температурного распределения по длине заготовки необходимо решать двумерную тепловую задачу, которая позволит определить распределение температуры как по длине, так и по радиусу. Используя известные методы решения электромагнитной задачи, в работе получены выражения для функции распределения мощности внутренних источников тепла, которые затем используются для решения тепловой задачи.

Полное моделирование процесса индукционного нагрева требует совместного решения электромагнитной задачи для всей системы, внутренней электротепловой задачи и задачи внешнего теплообмена. Для решения этих задач необходимо знание характера электромагнитных и тепловых процессов и средств их количественного описания (моделирования).

В настоящей работе исследуются электротепловые процессы в системе «индуктор – металл» с целью качественной оценки характера распределения внутренних источников тепла и температуры по объему цилиндрической заготовки для каждой  $n$ -ой заготовки, находящейся внутри индуктора

При решении любой сложной системы принимается ряд общих и специфических допущений, корректность которых зависит от конкретной системы. К общим допущениям при решении электромагнитной задачи можно отнести: отсутствие запаздывания электромагнитной волны в воздухе; расчет установившихся электромагнитных процессов для величин, меняющихся по гармоническому закону; однозначность зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля; магнитная проницаемость считается действительной величиной.

При решении нелинейных уравнений электромагнитного поля основную кривую намагничивания аппроксимируют аналитическими выражениями, которые, с одной стороны, должны достаточно точно описывать эту кривую, а с другой - допускать интегрирование системы уравнений поля в удобном для расчетов виде. Наибольшее распространение получила параболическая зависимость. Однако, сложная структура исследуемой системы «индуктор – нагреваемое изделие», содержащая ряд конструктивных элементов с различными физическими свойствами, не позволяет с достаточной для практики точностью использовать аналитические методы решения.

Численный расчет электромагнитных полей в сложной составной структуре тел, содержащей ферромагнитные участки магнитной цепи, стальные конструктивные элементы и ферромагнитную загрузку, производился с помощью программного комплекса ELCUT 5.2 Professional [1]. Расчет производился в два этапа. На первом этапе электромагнитная задача решалась как задача нестационарного магнитного поля, которая позволяет рассчитывать поле, возбужденное токами произвольной формы и анализировать переходные процессы. В качестве исходных данных

вводятся: свойства сред, источники поля, распределенные и сосредоточенные токи, кривые намагничивания ферромагнитных материалов, граничные условия и др. Основными расчетными параметрами являются изменяющиеся во времени магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность поля, токи, энергия магнитного поля, силы Лоренца, моменты, собственные и взаимные индуктивности и потокосцепление.

Задача расчета нестационарного магнитного поля представляет собой общий случай расчета магнитного и электрического полей, вызванных переменными токами (синусоидальные, импульсные и др.), постоянными магнитами, или внешним магнитным полем, в линейной и нелинейной (ферромагнитной) среде, с учетом вихревых токов (поверхностный эффект).

Однако, полученные результаты являются промежуточными и не позволяют определить интегральные характеристики устройства, необходимые для проектирования. Для расчета интегральных параметров индукционной системы, полученные дифференциальные результаты далее использовались как исходные данные в аналогичной геометрии задаче расчета стационарного магнитного поля переменных токов. Интегральными параметрами при расчетах стационарного магнитного поля переменных токов являются такие величины, как полный электрический ток (с его сторонней и вихревой компонентами), электрическое напряжение, мощность тепловыделения (омические потери), вектор Пойнтинга, индукция магнитного поля, напряженность магнитного поля, магнитные силы и их моменты, комплексное сопротивление (импеданс), индуктивность.

Анализ стационарного магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного полей, возбужденных приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем. Изменение поля во времени предполагается синусоидальным.

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала. Вектор магнитной индукции предполагается лежащим в плоскости модели, в то время как вектор плотности электрического тока и векторный магнитный потенциал ортогональны к нему.

Полученные в результате расчета электромагнитной задачи внутренние источники тепла используются далее при решении задачи расчета температурного поля заготовки.

Решение тепловой задачи выполнено методом конечных элементов (МКЭ), который дает возможность достаточно точно учитывать все нелинейности путем изменения всех нелинейных величин с каждым шагом по времени, а также задать сложную геометрию нагреваемого изделия.

Тепловая задача в процессе исследования формулируется как задача расчета температурного поля, обусловленного электромагнитными источниками тепла в заготовке [2, 3]. Геометрическая модель заготовки

соответствует геометрии электромагнитной задачи. Разбиение на блоки производилось таким образом, чтобы была обеспечена полная аналогия моделей обеих задач для передачи данных из электромагнитной задачи в тепловую. При построении сетки конечных элементов задавался автоматический шаг дискретизации.

### Литература

1. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.7. С-Пб.: Производственный кооператив ТОР, 2009.
2. **Лыков А.В.** Тепломассообмен (Справочник) М.: Энергия, 1978. –480 с.
3. **Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

УДК 621.3:517.951

В.Н. МЕЩЕРЯКОВ., д.т.н., профессор,  
С.С. ТИТОВ, аспирант  
(ЛГТУ) г. Липецк

## Комплекс оборудования для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы

### 1. Вводная информация

Создание комплексов оборудования непрерывного действия, обеспечивающего симметричный на заданную глубину поверхностный нагрев, например под термообработку металлических шаров исключительно актуально для ряда отраслей промышленности, в частности в массовых производствах мелющих тел для горно – обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков подшипников качения.

Более всего этой востребованной промышленностью совокупности параметров нагрева отвечает индукционный способ с прямым и высокоскоростным превращением электрической энергии в тепловую, отличающийся простотой регулирования температуры и глубины прогрева, что позволяет получать после закалки и отпуска оптимальное сочетание высокой поверхностной твердости изделий с относительно пластичной сердцевиной (ударная стойкость).

Однако, при всех известных достоинствах этого способа применимость его с обеспечением требуемой симметричности нагрева в настоящее время ограничена в мировой практике преимущественно изделиями непрерывного сечения или близкого к таковому.