

## Краткие сообщения

УДК 621.365

### **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В СИСТЕМАХ РЕГЕНЕРАЦИИ**

**К.А. Ачаков, Л.С. Зимин**

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

*Рассматривается оригинальная энергосберегающая технология нагрева трансформаторного масла в системах регенерации, основанная на сочетании двух методов нагрева - индукционного и диэлектрического.*

**Ключевые слова:** *электрический нагрев, регенерация, трансформаторное масло, индукционный, диэлектрический, энергосбережение*

Необходимость очистки масла от воды и других примесей, является актуальной проблемой. Регенерация масла в большинстве случаев осуществляется подогревом масла до определенных температур, порог которых зависит от метода, глубины вакуума, сочетания нескольких методов в одном технологическом процессе [1,2]. Как правило, на нагрев тратится от 90% до 95% активной мощности установки регенерации масла, поэтому решать данную проблему необходимо на основе применения энергосберегающих технологий. В установках регенерации существующих на сегодняшний день нагрев осуществляется элементами сопротивления в виде трубчатых электронагревателей (ТЭН) или ленточных нагревателей. Нагрев происходит косвенно, путем передачи энергии теплопроводностью и конвекцией.

С целью снижения энергетических затрат на нагрев трансформаторного масла разработана новая более эффективная технология. В этом случае теплообменный аппарат состоит из наружного и внутреннего стальных цилиндров и индукторов, намотанных вокруг внешнего цилиндра и внутри внутреннего. В кольцевом зазоре симметричных цилиндров находится нагреваемое масло. Величина кольцевого зазора и количество нагревателей зависит от производительности установки и температуры нагрева масла.

В данном нагревателе производится комбинированный нагрев. На первом этапе к цилиндрам подводится разность потенциалов, тем самым образуется рабочий конденсатор. При помещении трансформаторного масла в переменное электрическое поле конденсатора происходит его нагрев диэлектрическим способом. Далее по мере испарения воды и других примесей фактор потерь будет уменьшаться, соответственно на втором этапе осуществляется переход на индукционный нагрев. На этапе

---

*Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), зав. кафедрой электроснабжения.  
Константин Анатольевич Ачаков, аспирант.*

нагрева индукционным методом ферромагнитные цилиндры играют роль косвенных нагревателей, в которых тепло выделяется под действием наведенных вихревых токов. Передача тепла осуществляется через поверхность контакта сопряженных тел металлических цилиндров с жидким диэлектриком. Для оптимизации параметров комбинации двух методов нагрева на начальном этапе разработки используются результаты экспериментов и аналитические методы моделирования, на последнем этапе использован численный метод конечных элементов, реализованный на основе применение пакета программ Femlab.

В общем случае процесс нагрева описывается нелинейной, взаимосвязанной системой уравнений Максвелла для электромагнитного поля и Фурье для теплового поля с соответствующими краевыми условиями.

При индукционном нагреве исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области.

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A}\right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0; \operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \operatorname{div} \dot{A} = 0 \quad (1)$$

Решение уравнения ищется путем минимизации нелинейного функционала, выражающего энергию электромагнитного поля:

$$F(\dot{A}) = \frac{1}{2} \iint_Q \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \right) \frac{\partial \dot{A}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu r} \right) \frac{\partial (r \dot{A})}{\partial r} \right] dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q j \omega \gamma |\dot{A}|^2 dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q \dot{J}_0 \dot{A} dr dz \quad (2)$$

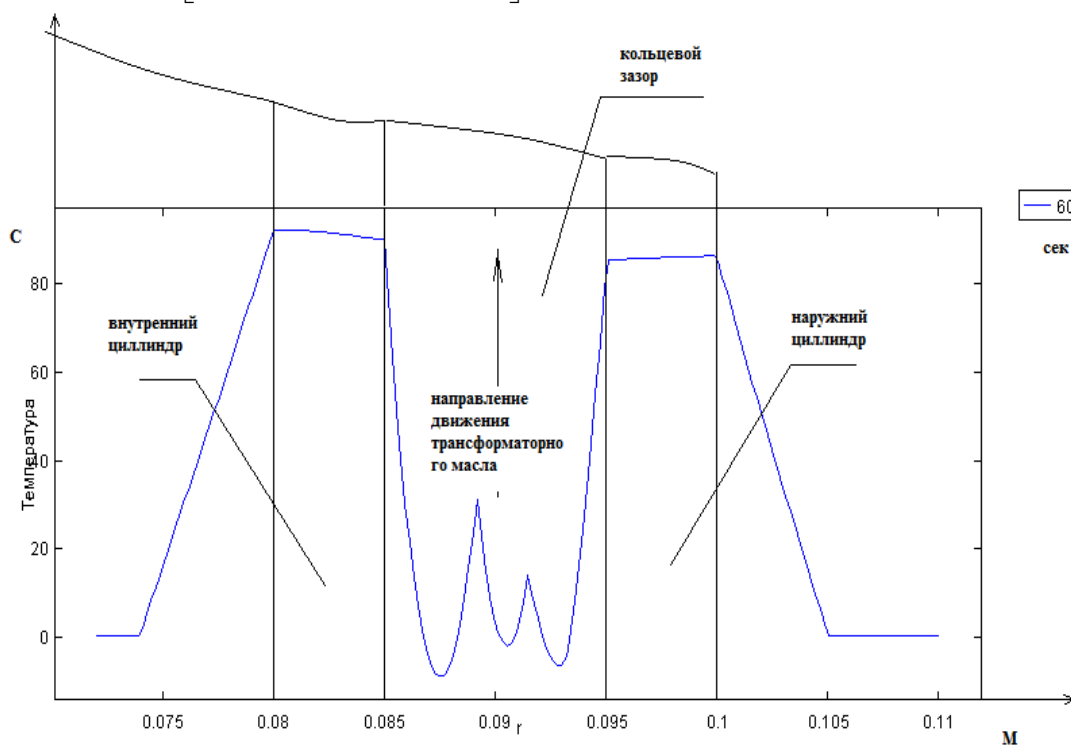


Рис.1 Температурное поле по сечению канала при индукционном нагреве

Колебания температуры в кольцевом зазоре обусловлено перемешиванием слоев масла нагретого от стенок цилиндров и подаваемого из емкости для регенерации, так как контур циркуляции масла при регенерации является замкнутым.

При диэлектрическом нагреве исходная постановка задачи выражается решением системы уравнений Максвелла относительно вектора напряженности электрического поля, решение достигается минимизацией энергетического функционала относительно напряженности электрического поля:

$$F(\dot{E}) = \frac{1}{2} \iint_Q \left( \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (r \dot{E})}{\partial r} \right] \right) \cdot \dot{E} dr dz - \frac{1}{2} \iint_Q j \omega \mu \dot{E}^2 dr dz - \frac{1}{2} \iint_Q \omega^2 \mu \epsilon \dot{E}^2 dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q J \dot{E} dr dz \quad (3)$$

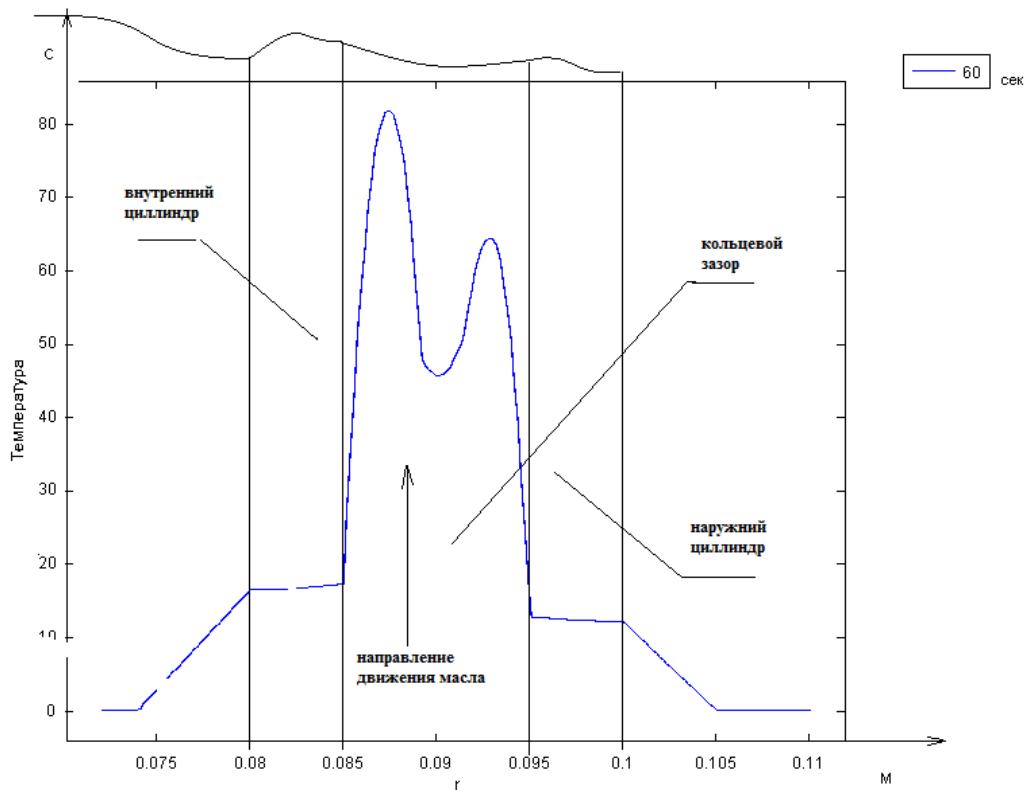


Рис.2 Температурное поле по сечению канала при диэлектрическом нагреве

Так как гармонические электромагнитные процессы в любой среде условно можно рассматривать как процессы в диэлектрике с комплексной диэлектрической проницаемостью [3]:

$$\epsilon_K = \epsilon - j \frac{\gamma}{\omega} = \epsilon - j \epsilon', \text{ но отношение } \frac{\gamma}{\omega \epsilon} = \frac{\epsilon'}{\epsilon} \text{ есть не что иное как } tg \delta,$$

откуда проводимость можно выразить как  $\gamma = tg \delta \omega \epsilon$ , мощность внутренних источников тепла, характеризующих нагрев диэлектриков при воздействии на диэлектрик переменного электрического поля, вычисляется для каждого элемента:

$$P^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^e} tg \delta \omega \epsilon \left( \overline{E \cdot E^*} \right) dV = 2,78 \cdot 10^{-11} \int_{V^e} tg \delta f \epsilon' \left( \overline{E \cdot E^*} \right) dV. \quad (4)$$

С учетом зависимости фактора потерь от примесей и температуры на каждом этапе итераций осуществляется корректирование  $tg\delta$  в соответствии с установленными экспериментальным путем зависимостями от содержания воды и других примесей, а так же температуры.

В случае с диэлектрическим нагревом наблюдается зеркально обратный процесс в кольцевом зазоре, так как источник тепла находится уже в самом масле.

Таким образом, на основании проведенных исследований разработан комбинированный нагреватель и алгоритм конечно-элементного моделирования комбинированного нагрева трансформаторных масел в системах регенерации.

Кроме того, диэлектрический нагрев, применяемый на первом этапе, при высоких значениях  $tg\delta$  в большей степени обусловленных наличием примеси воды, позволяет осуществлять осушку масел, так как наибольшее количество энергии поглощается водой содержащееся в масле, как в растворенном виде, так и капельном. Другими словами, в качестве внутренних источников тепла, в первую очередь служат коллоидные частицы и примеси воды, которые и будут нагреваться. После испарения воды и удаления примесей нагрев осуществляется индукционным нагревателем и масло окончательно доводится до требуемых параметров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Литвинейн В.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло. - М.: Энергия, 1987. - 330 с.
2. *Колесов С.Н., Колесов И.С.* Материаловедение и технология конструкционных материалов. - М.: Высшая школа, 2004. - 519 с.
3. *Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. Издание 2-е, переработанное и дополненное. - М.: Светское радио, 1971. - 664 с.

*Статья поступила в редакцию 4 марта 2012 г.*

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INDUCTION HEATING TRANSFORMATOR OIL IN THE REGENERATION SYSTEM

***KA Achakov<sup>1</sup>, LS Zimin***

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

*We consider the original energy-saving heating technology of transformer oil in regeneration system based on a combination of two methods of heating - induction heating and dielectric heating.*

***Keywords:*** *electric heating, regeneration, transformer oil, induction, dielectric, energy.*

---

*Konstantin A Achakov, Postgraduate student.  
Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*