

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКЦИОННОМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕ

Хацевский Константин Владимирович,

профессор, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: xkv-post@rambler.ru

Гапон Александр Евгеньевич,

магистрант, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: gapon543@gmail.com

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN INDUCTION HEATER

Khatsevskiy Konstantin Vladimirovich,

Professor, Doctor of Technical Sciences, Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: xkv-post@rambler.ru

Gapon Alexander Evgenevich,

Undergraduate, Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: gapon543@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены электромагнитные системы преобразования электрической энергии в тепловую, выполненные в виде коаксиальных цилиндров с использованием ферромагнитных сердечников. Анализ проведен на основе магнитных схем замещения, теории цепей и электромагнитной теории с привлечением экспериментальных результатов.

Abstract. Considered electromagnetic system for converting electrical energy into thermal energy, in the form of coaxial cylinders with the use of ferromagnetic cores. The analysis based on magnetic equivalent circuits, circuit theory and electromagnetic theory with the involvement of the experimental results.

Ключевые слова. Индукционный нагреватель, электромагнитное поле, коаксиальные цилиндры.

Key words. Induction heater, the electromagnetic field coaxial cylinders.

По принципу работы индукционные электронагреватели аналогичны трансформаторам. В нагревателях такого типа вторичные обмотки в виде коаксиальных цилиндров играют роль промежуточных нагревателей для непроводящих материалов – жидкостей и газов. Очевидная взаимосвязь электромагнитных, тепловых и гидродинамических параметров, определяющих эксплуатационную эффективность конструкции в целом, возможность выполнения вторичной обмотки в виде двух и более коаксиальных цилиндров определили необходимость разработки методов расчета таких систем нагрева.

К оптимизационным параметрам индукционной системы нагрева с коаксиальными цилиндрами относятся электрофизические параметры каждого их цилиндров (ρ_i , μ_i) и геометрический размер по координате распределения электромагнитной волны (толщина цилиндров a_i). Анализ влияния этих параметров на энергетические соотношения в системе нагрева в целом можно провести путем рассмотрения электромагнитных процессов в отдельном цилиндре, находящимся в электромагнитной

связи с системой нагрева. Этот анализ возможно провести с использованием известного подхода к математическому описанию такого типа систем – решению уравнений Максвелла характеризующих локальные параметры электромагнитного поля:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= E / \rho + \partial \dot{D} / dt; \quad \operatorname{rot} \dot{E} = -\partial \dot{B} / dt; \\ \dot{B} &= \mu \mu_0 \dot{H}; \quad \dot{D} = \varepsilon \varepsilon_0 E; \quad \operatorname{div} \dot{B} = 0; \quad \operatorname{div} \dot{E} = \sigma \end{aligned} \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля;

D – электрическая индукция;

μ – магнитная проницаемость;

ε – диэлектрическая проницаемость;

μ_0 и ε_0 – магнитная и электрическая постоянные;

σ – плотность электрических зарядов.

Этот подход позволяет проводить анализ процессов внутри тел, находящихся в электромагнитном поле, и используется для определения собственных сопротивлений элементов, составляющих индукционную систему. Положительный эффект в технических решениях нагревателей рассматриваемого типа можно получить при проявлении электромагнитных эффектов в нагреваемых телах, которые проявляются при выполнении конкретных, предварительно выполненных, условиях. Однако из основных условий, выявленных экспериментально, для систем нагрева с коаксиальными цилиндрами, записывается следующим образом: радиальный размер концентрических цилиндров

$$a = (d_{in} - d_{ie}) / 2 < \Delta_{\varepsilon}, \quad (2)$$

где Δ_{ε} – глубина проникновения электромагнитного поля в материал цилиндра.

Эта теоретическая задача в общем виде в приложении к анализу электромагнитных процессов в шихтованных пакетах магнитопровода решена Л.Р. Нейманом для минимизации энергии, выделяющейся в конкретной пластине ферромагнитного магнитопровода. Для электронагревателей необходимо исследовать электромагнитные процессы в аналогичной системе, но при выполнении пластин из немагнитных материалов в режимах выделения максимальной энергии при возможном увеличении эквивалентного сопротивления всей группы коаксиальных цилиндров. Укажем здесь же, что электромагнитная волна, падающая на внутреннюю поверхность цилиндра, несет энергию, определяемую вектором энергии – вектором Пойтинга. Если $\dot{E}$ и $\dot{H}$ изменяются во времени по синусоидальному закону, т.е. описываются комплексными выражениями, то выражение среднего за период значения вектора потока энергии будет иметь вид [1, 2]:

$$\dot{q}_0^S = \frac{1}{2} [\dot{\mathbf{E}} \cdot \dot{\mathbf{H}}^*], \quad (3)$$

где $\dot{\mathbf{H}}^*$ – сопряженная величина вектора $\dot{\mathbf{H}}$.

Физически вектор $\dot{q}_0^S$ является средним значением (за период) величины потока энергии в секунду через единицу площади, перпендикулярной направлению волны, и определяет развитие процессов нагрева жидкостей и газов, т.е. тепловое поле в системе нагрева.

На основании анализа магнитной схемы замещения системы индуктор – два коаксиальных цилиндра (рис. 1) можно провести постановку общей задачи для анализа распределения энергии в концентрических цилиндрах.

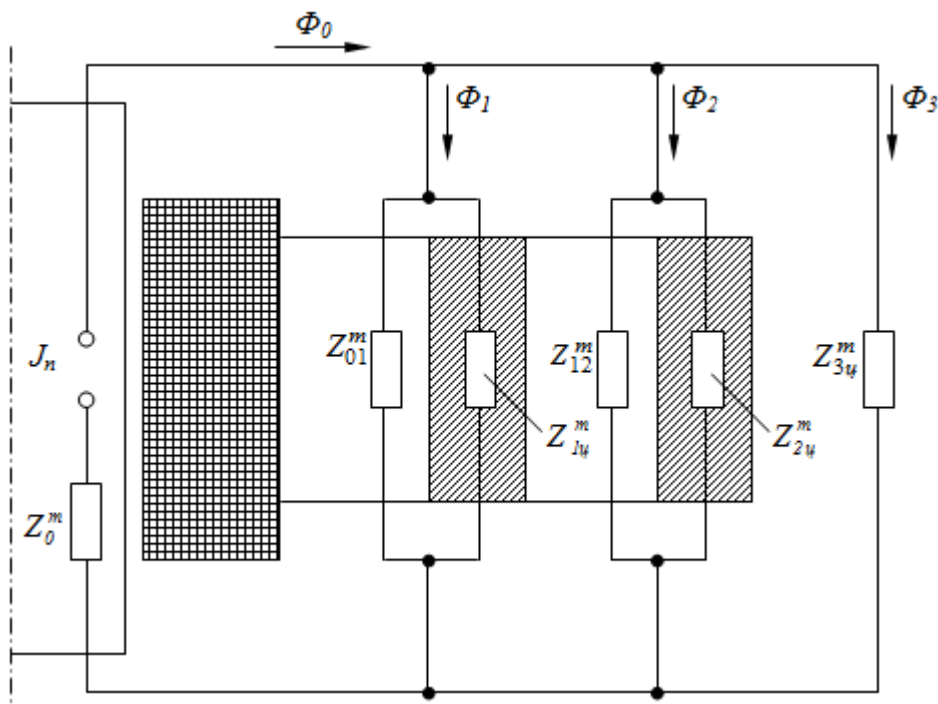


Рис.1. Магнитная схема замещения системы нагрева

В качестве исходного положения примем, что диаметры d_1 и d_2 и высота цилиндров h_2 много больше их радиальных размеров a_1 и a_2 . Кроме этого, основываясь на практике создания промышленных конструкций таких систем, будем учитывать, что расстояния между индуктором и внутренним цилиндром b_{01} ; и между цилиндрами b_{12} также меньше их диаметров, соизмеримы с толщиной цилиндров a , которая выбирается по величине меньше, чем глубина проникновения электромагнитной волны в металл цилиндров ($a < \Delta_3$). Это позволяет рассматривать задачу как плоскую с распространением гармонической линейно поляризованной электромагнитной волны, создаваемой индуктором в неоднородной по слоям среде по направлению одной оси z . Проходящие по цилиндрам магнитные потоки Φ_{1y} и Φ_{2y} сориентированы параллельно оси x . Схема такой системы приведена на рис. 2.

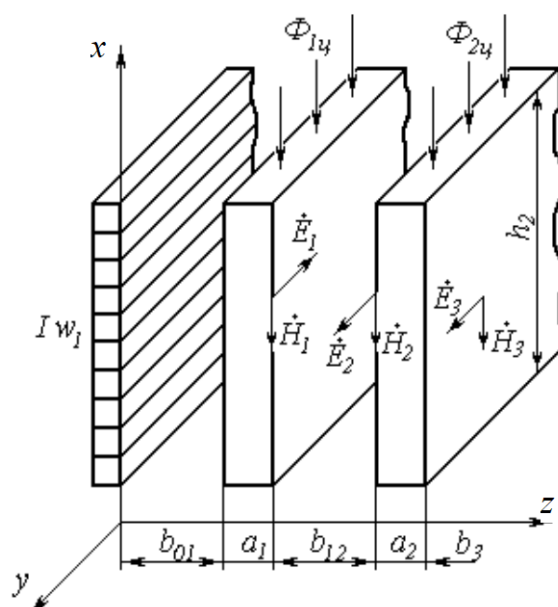


Рис. 2. Электромагнитное поле в системе индуктор – коаксиальные цилиндры

Области b_0 , b_{12} и b_3 представляются как диэлектрик, у которого $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$, $\gamma = 0$. Области a_1 и a_2 являются проводящими с удельными проводимостями γ , магнитной проницаемостью μ . Если рассматривать сравнение электромагнитных полей первого и второго цилиндров, то следует указать, что в общем случае для первого цилиндра эффект близости индуктора (слева) и второго цилиндра (справа) практически будет скомпенсирован. При решении уравнений Максвелла для каждой из областей будет иметь место падающая и отраженная волны, а в области b_3 (за пределами второго цилиндра) – только падающая волна, так как эта область не ограничена в направлении распространения энергии.

Процессы в металлической плите, находящейся в электромагнитном поле, достаточно подробно рассмотрены в литературе [1-3].

Список использованных источников

1. Чередниченко В.С., Хацевский К.В. Индукционные установки для нагрева и электрофизической обработки жидкостей // Индукционный нагрев. – №22. – 2012. – С. 47-48.
2. Хацевский К.В. Энергоэффективные технологии электронагрева жидкостей и газов [монография] / К.В. Хацевский, Т.В. Гоненко. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 176 с.
3. Khatsevskiy, K.V. Heating and electrochemical processing of liquids in induction systems with coaxial cylinders / K.V. Khatsevskiy, L.D. Fedorova, T.V. Gonenko // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2014). – Omsk, 2014. DOI 10.1109/Dynamics.2014.7005659.