

УДК 621.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИСКРЕТНОЙ СРЕДЕ

© 2020 г. А. Б. Кувалдин¹, М. А. Федин¹, * О. А. Поляков¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*E-mail: fedinma@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2019 г.

После доработки 16.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Исследуются особенности распределения параметров переменного электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого цилиндрическим индуктором в дискретной проводящей среде, образованной немагнитными электрически не связанными элементами.

DOI: 10.31857/S0367676520020192

Теоретическое и практическое значение в электротехнике имеет задача расчета параметров ЭМП в дискретной проводящей среде (ДПС), которая образована немагнитными электрически не связанными элементами. Например, при плавке металлов в индукционных тигельных печах (ИТП) в начальный период плавки загрузка, подвергаемая воздействию переменного ЭМП цилиндрического индуктора, представляет собой кусковую шихту – совокупность отдельных проводящих объектов. В работах [1–3] предлагались методы аналитического расчета параметров ЭМП в ДПС, но из-за большого числа допущений, влияющих на точность расчета, они не позволяют выявить особенности распределения параметров ЭМП в дискретной среде.

Цель работы – исследование параметров ЭМП в немагнитной ДПС с использованием численных методов на основе компьютерного моделирования [4–6]. Объектом исследования является электромагнитная система “индуктор–дискретная загрузка”, в которой загрузкой является совокупность металлических немагнитных цилиндров.

В общем случае расчет ЭМП в ДПС представляет собой трехмерную задачу. При таком подходе существует возможность моделирования ЭМП в отдельных элементах загрузки, форма, размеры и свойства которых могут различаться.

В качестве расчетного комплекса выбрана программа Comsol Multiphysics [7], в которой реализована возможность решать методом конечных-элементов трехмерные полевые и связанные (мультифизические) задачи, а пользователю доступна в явном виде математическая постановка

задачи (уравнения, описывающие процесс и краевые условия).

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала \vec{A} ($\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$, \vec{B} – вектор магнитной индукции).

Уравнение для осесимметричного случая запишется как

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_x} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_y} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_z} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) - i\omega\gamma\vec{A} = -\vec{j}_{\text{стор}},$$

где $\vec{j}_{\text{стор}}$ – вектор плотности стороннего тока, а удельная электропроводность γ и компоненты тензора магнитной проницаемости μ_x , μ_y и μ_z постоянны в пределах каждого блока модели.

На рис. 1а представлена одна восьмая часть исследуемой электромагнитной системы, а на рис. 1б – схема расположения точек анализа напряженности магнитного поля. Расчетная область поделена на конечные элементы. На плоскостях yz и xz задается граничное условие Неймана в виде $dH/dx = 0$ и $dH/dy = 0$ соответственно, на плоскостях xy – $dH/dz = 0$, на внешних границах – нулевое граничное условие Дирихле $A = 0$.

Загрузка в модели представляется в виде системы одинаковых цилиндров, расположенных вертикально в индукторе. Электрофизические свойства всех цилиндров одинаковы. В представленной модели не учитывается форма сечения и количество

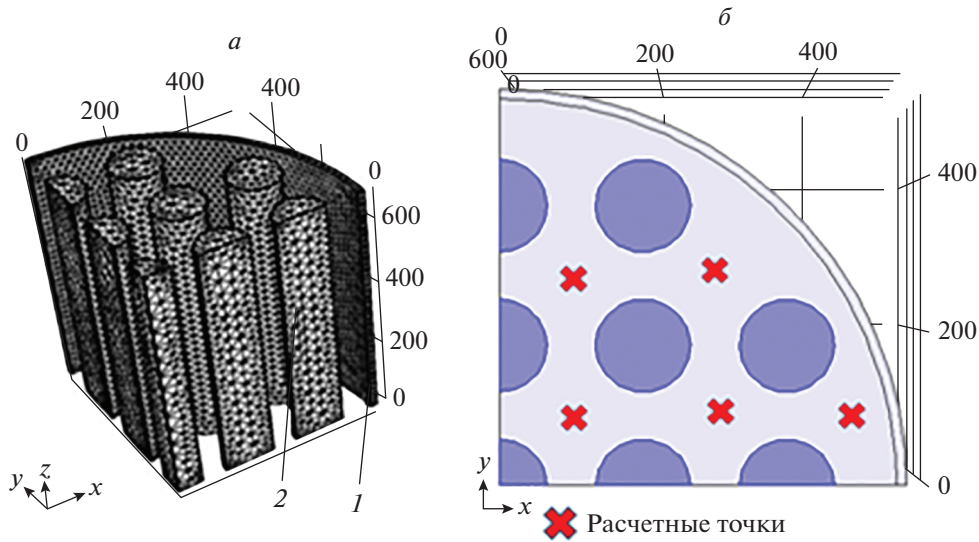


Рис. 1. Расчетная модель электромагнитной системы “индуктор–дискретная нагрузка”: *a* – разбиение модели на конечные элементы; *б* – схема расположения расчетных точек в поперечном сечении исследуемой системы.

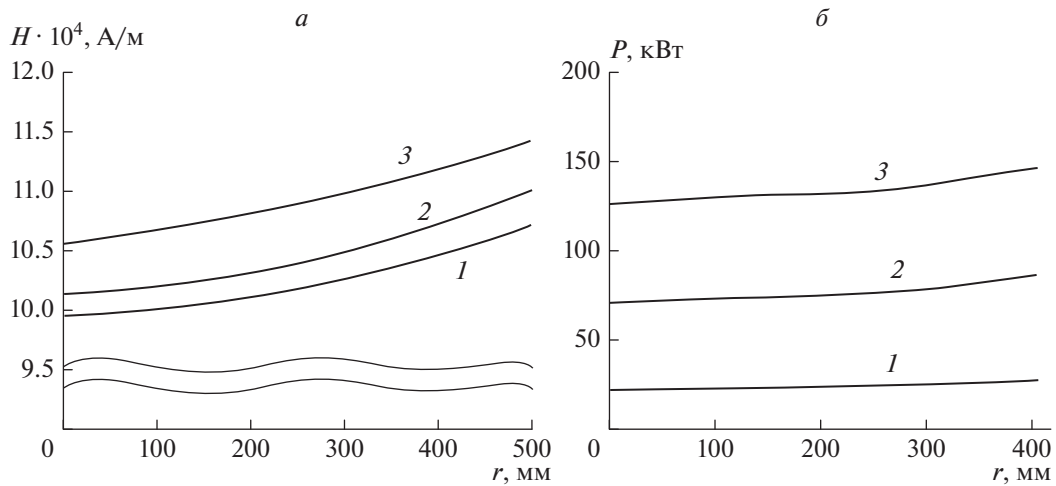


Рис. 2. Результаты расчета ЭМП в системе “индуктор–дискретная нагрузка”: *a* – напряженность магнитного поля H в поперечной плоскости симметрии; *б* – мощность тепловыделения P в цилиндрах. Диаметр цилиндров: 1 – 60, 2 – 120, 3 – 170 мм.

витков индуктора. ЭМП локализовано в пределах расчетной области и не учитывается наличие магнитопровода или электромагнитного экрана.

При исследовании электромагнитной системы приняты параметры индуктора для промышленной ИТП: внутренний диаметр $d = 1000$ мм, высота $h = 1400$ мм, ток – 4 кА, удельное электрическое сопротивление $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Параметры загрузки (немагнитная сталь): электрическое сопротивление $\rho = 7 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, количество цилиндров – 21, высота цилиндров – 1400 мм. Расчеты выполнены для диаметров цилиндров 60, 120 и 170 мм.

На рис. 2а в качестве примера представлены результаты расчета напряженности магнитного поля H в расчетных точках (см. рис. 1б) в зависимости от их расположения по радиусу внутри индуктора и диаметра. Установлено, что ЭМП эффективнее проникает в ДПС по сравнению со сплошной независимо от насыпной плотности и частоты.

Это объясняется тем, что индуцированные токи замыкаются только в пределах отдельных проводящих объектов, т. к. последние электрически не контактируют друг с другом. Наличие воздушных промежутков создает дополнительные пути

для проникновения магнитного потока в центр индуктора, что также было показано и в работе [8], при этом значения H увеличиваются в зазорах между цилиндрами вплоть до центральной оси симметрии системы.

На рис. 2б представлена зависимость мощности, выделяемой в одном цилиндре, от его положения по радиусу для трех различных значений диаметра цилиндров загрузки при исходных данных, описанных выше. Из графиков видно, что разница значений выделяемой мощности в ближайшем к индуктору и в центральном цилиндрах составляет не более 20%, что говорит о более равномерном нагреве дискретной загрузки по сравнению со сплошной.

Для проверки адекватности математической модели был проведен физический эксперимент на макетной установке ИТП мощностью 2 кВт. Экспериментальная установка состоит из медного водоохлаждаемого индуктора, транзисторного преобразователя частоты с микропроцессорной системой управления и лабораторного осциллографа.

Установка имеет следующие параметры: внутренний диаметр индуктора $d = 94$ мм, высота индуктора $h = 113$ мм, число витков индуктора – 6, действующее значение тока индуктора – 200 А, частота тока – 19.5 кГц.

В индуктор загружались в вертикальном положении 16 цилиндрических прутков диаметром 8 мм. Материал прутков – нержавеющая сталь.

Для измерения действующих значений напряженности ЭМП между прутками размещалась измерительная медная катушка со следующими параметрами: внутренний диаметр – 5 мм, количество витков – 20, диаметр витка – 1 мм. Значения напряженности рассчитывались по действующим значениям напряжения на измерительной катуш-

ке, измеряемого с помощью осциллографа в пяти точках в зазорах между прутками на различном расстоянии по радиусу от оси индуктора (рис. 1б) в среднем сечении по высоте катушки.

При анализе экспериментальных данных выявлено, что расхождение с расчетными значениями лежит в пределах 10%.

Разработанные модели позволяют производить расчет интегральных электрических и энергетических параметров системы “индуктор–дискретная проводящая среда”. Дальнейшие работы будут направлены на уточнение экспериментальных данных и получение универсальной модели, способной учитывать различные геометрические и физические параметры системы, в том числе для ферромагнитных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабат Г.И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.–Л.: Энергия, 1965. 550 с.
2. *Фомин Н.И., Затуловский Л.М.* Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Металлургия, 1979. 247 с.
3. *Кувалдин А.Б.* Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергия, 1988. 200 с.
4. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В.* Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб: Технолит, 2008. 219 с.
5. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В.* Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2013. 160 с.
6. *Chari M.V.K., Salon S.J.* Numerical methods in electromagnetism. London: Academic Press, 2000. 783 p.
7. *Kuvaldin A., Fedin M., Polyakov O. et al.* // Proc. 11th IFOST. (Novosibirsk, 2016). P. 91.
8. *Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э.* // Электротехника. 2013. № 3. С. 55.