

Цифровое моделирование электромагнитных процессов в технологических индукционных устройствах

ДЕМИДОВИЧ В.Б.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Ведущее место при моделировании индукционных устройств занимает разработка метода электрического расчета. При моделировании электротехнических устройств и комплексов часто возникает необходимость одновременно решать как цепные, так и полевые задачи, т.е. оперировать как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. Рассмотрен метод интегральных уравнений для индукционных систем с немагнитной и ферромагнитной загрузкой, основанный на теории дальнего действия и заключающийся в том, что поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Другой метод конечных элементов основан на теории ближнего действия, описывающей распространение электромагнитной волны от точки к точке, ее преломление и отражение на границах сред. Обосновывается разработка комбинированного метода, основанного на использовании метода интегральных уравнений для расчета входных параметров индукторов (внешняя задача), и метода конечных элементов для расчета распределения поля в нагрузке (внутренняя задача). Комбинированный метод хорошо себя зарекомендовал при моделировании индукционного нагрева и плавки металлов и оксидов, нагрева ленты в поперечном магнитном поле, индукционных плазмотронов, литья алюминия в электромагнитный кристаллизатор.

К л ю ч е в ы е с л о в а: компьютерное моделирование, численные методы, комбинированный метод, электромагнитное поле, индукционные устройства, индукционный нагрев

Бесконтактное (индуцированное) воздействие электромагнитного поля на проводящие материалы лежит в основе многих перспективных энергосберегающих технологий. Наиболее распространенное и известное воздействие переменного электромагнитного поля на проводящие материалы (металлы, графит и др.) связано с тепловым эффектом при прохождении наведенных токов и получило название индукционный нагрев (ИН).

На заре электротехники при разработке генераторов и двигателей, трансформаторов и других электромеханических устройств вихревые токи рассматривались как паразитные и принимались меры для их подавления. Только значительно позднее нагрев индуцированными токами стал использоваться для технологических целей. Одним из первых и наиболее успешных промышленных применений ИН перед войной в СССР стала технология индукционной поверхностной закалки деталей машиностроения токами высокой частоты (ТВЧ), предложенная в 1935 г. профессором В.П. Вологдиным и инженером Б.Н. Романовым [1, 2].

В настоящее время технологии обработки металлов в переменном электромагнитном поле и оборудования для его осуществления составляют важную часть технологий и оборудования, которые применяются в научном и промышленном комплексе развитых стран [3–7]. Мощности современных установок ИН достигают нескольких МВт, а частота тока лежит в диапазоне от нескольких Гц до нескольких МГц. Реализация

промышленных комплексов с использованием ИН уже невозможна без детального моделирования и построения цифровых двойников в рамках концепции Индустрия 4.0 [8].

Ведущее место при моделировании индукционных устройств занимает разработка метода электрического расчета. Это объясняется тем, что при индукционном нагреве металлов первичным и основным фактором, влияющим на формирование температурного поля нагреваемого объекта, является распределение внутренних источников теплоты (индуцированных токов) по объему заготовки. Электрический расчет должен дать количественную картину распределения электромагнитного поля в объеме нагреваемого тела и тем самым создать необходимые предпосылки для решения тепловой задачи. С другой стороны, электрический расчет должен включать определение интегральных параметров индукционной установки, характеризующих ее как потребителя энергии. Указанные задачи являются наиболее общими при моделировании любой индукционной нагревательной системы, и без их решения невозможен сколько-нибудь точный анализ процесса нагрева. Конкретизация требований, которым должна удовлетворять математическая модель, связана с анализом особенностей исследуемой индукционной системы.

При моделировании многих электротехнических устройств и комплексов часто требуется одновременно решать как цепные, так и полевые задачи. Необходимо оперировать как сосредоточенными параметрами, та-

кими как индуктивность, емкость, активное сопротивление, которые характеризуют цепные схемы, а токи и напряжения используются в качестве переменных, так и системами с распределенными параметрами, которые характеризуются в качестве переменных напряженностью электрического и магнитного полей в пространстве.

Установки индукционного нагрева (УИН) металлов могут служить примером таких электротехнических комплексов. В состав УИН входят источники питания (как правило, это статические преобразователи частоты на базе силовых тиристорных и транзисторных), согласующие устройства (трансформаторы и конденсаторы) и технологический узел (индукторы различной конструкции для нагрева проводящих изделий).

Все численные методы расчета электромагнитных полей в УИН можно отнести к двум различным постановкам задачи. Первая основана на описании электромагнитного поля дифференциальными уравнениями Максвелла [9]. В ходе расчета учитывается взаимодействие только близлежащих микрообъемов. Такая постановка соответствует теории ближнего действия, описывающей распространение электромагнитной волны от точки к точке, ее преломление и отражение на границах сред. На этом подходе основано применение методов конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) для расчета электромагнитного поля [10–13].

Вторая постановка задачи основана на теории дальнего действия и заключается в том, что поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Первичными являются сторонние источники, вносимые в систему. Вторичные источники определяют поле реакции тел, составляющих систему, на поле первичных источников. При этом все тела заменяются распределенными в их объеме источниками, взаимодействие между которыми определяется в вакууме [12]. Метод вторичных источников приводит к интегральным уравнениям и может быть назван также методом интегральных уравнений (МИУ).

Метод интегральных уравнений удобен для расчета квазистационарных систем, в которых можно пренебречь запаздыванием сигнала. Все индукционные устройства этому условию подчиняются. Важным достоинством метода является то, что расчет проводится только для областей, занятых вторичными источниками, вследствие чего не требуется задания краевых условий и расчета электромагнитного поля вне проводящей среды.

МИУ очень эффективен при сложном характере соединений индукторов и в случае сильно выраженного поверхностного эффекта в загрузке, когда порядок системы алгебраических уравнений относительно велик и, соответственно, время счета мало. В качестве достоинства метода следует отметить возможность просто определять входные параметры индуктора:

КПД, коэффициент мощности, активное и реактивное сопротивление индукторов. Благодаря этим преимуществам метод интегральных уравнений занял лидирующее положение на первой стадии развития численных методов в теории индукционного нагрева [14, 15].

Электромагнитный расчет устройств с осесимметричной немагнитной загрузкой. Для цилиндрической индукционной системы, состоящей из немагнитной загрузки A и двухвиткового индуктора B , распределение тока в котором известно (рис. 1), естественными вторичными источниками являются круговые токи проводимости загрузки, плотность которых заранее неизвестна. Выделим трубки тока P , Q и T с малыми сечениями ΔS_P , ΔS_Q , ΔS_T .

ЭДС $\dot{\mathcal{E}}_{QP}$ и плотность тока \dot{J}_{QP} , создаваемые в элементе Q током элемента P , связаны соотношением:

$$\dot{\mathcal{E}}_{QP} = 2\pi R_Q \rho_Q \dot{J}_{QP} = -j\omega M'_{QP} \dot{J}_P \Delta S_P, \quad (1)$$

где M'_{QP} – взаимная индуктивность колец Q и P .

Чтобы учесть воздействие на элемент Q всех токов, надо проинтегрировать (1) по сечению обмотки S_B с известными токами и по сечению загрузки S_A . Получаем интегральное уравнение Фредгольма второго рода относительно плотности тока \dot{J}_Q , справедливое для всех элементов загрузки:

$$2\pi R_Q \rho_Q \dot{J}_Q + j\omega \int_{S_A} M'_{QP} \dot{J}_P dS_P = -j\omega \int_{S_B} M'_{QT} \dot{J}_T dS_T. \quad (2)$$

Ядро уравнения M'_{QP} обладает слабой особенностью логарифмического типа, так как при $P \rightarrow Q$ $M'_{QP} \rightarrow \infty$. Эта особенность является интегрируемой. Разработан ряд методов решения (2). Заменив в (2) распределенные токи сосредоточенными токами \dot{I}_Q и \dot{I}_P в центрах элементов, получаем простейший вариант расчета [14]. Он пригоден только при квадратных сечениях элементов P и Q , что приводит к системам алгебраических уравнений высокого порядка.

Хорошо зарекомендовал себя метод, предложенный в [15] и основанный на полном осреднении ядра.

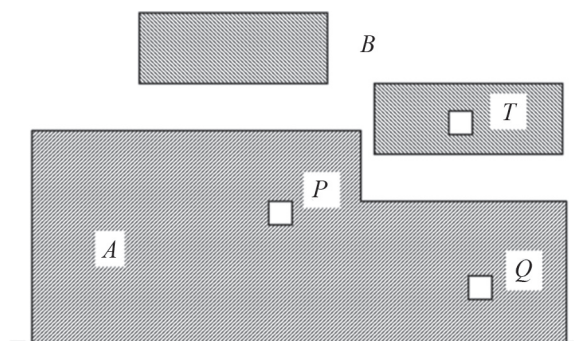


Рис. 1. К расчету индуктора с немагнитной загрузкой методом вторичных источников

Fig. 1. To calculate the inductor with non-magnetic loading by the method of secondary sources

Будем считать Q , P и T элементами с конечными сечениями, размеры которых ограничены лишь условием постоянства плотности тока. При этом плотность тока \dot{J}_Q в любой точке элемента Q подчиняется уравнению:

$$\begin{aligned} 2\pi R_Q \rho_Q \dot{J}_Q + j\omega \sum_{P \in A} \dot{J}_P \int_{\Delta S_P} M'_{QP} dS_P = \\ = -j\omega \sum_{T \in B} \dot{J}_T \int_{\Delta S_T} M'_{QT} dS_T. \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнении (3) ядро осреднено по сечениям источников ΔS_P и ΔS_T . Суммирование проводится по всем индексам P , включая $P = Q$. Уравнение (3) целесообразно преобразовать, проинтегрировав его по сечению ΔS_Q :

$$\begin{aligned} 2\pi R_Q \rho_Q \dot{J}_Q + j\omega \sum_{P \in A} \dot{J}_P \int_{\Delta S_Q} \int_{\Delta S_P} M'_{QP} dS_P dS_Q = \\ = -j\omega \sum_{T \in B} \dot{J}_T \int_{\Delta S_Q} \int_{\Delta S_T} M'_{QT} dS_T dS_Q. \end{aligned} \quad (4)$$

При делении (4) на площадь сечения ΔS_Q и переходя к токам \dot{I}_Q и \dot{I}_P , получаем:

$$r_Q \dot{I}_Q + j\omega \sum_{P \in A} M_{QP} \dot{I}_P = -j\omega \sum_{T \in B} M_{QT} \dot{I}_T,$$

где r_Q – активное сопротивление кольца Q ; M_{QP} и M_{QT} – взаимные индуктивности объемных колец Q и P , Q и T с равномерным распределением тока в них.

Полное осреднение позволяет избавиться от особенностей ядра M'_{QP} , повышает устойчивость решения, дает возможность резко увеличить размеры сечений элементов и снизить их число. Для обмотки с равномерным распределением тока можно вообще взять один элемент T . Это особенно удобно для многovitковых обмоток, которые с небольшой погрешностью часто можно заменить тонкими соленоидами.

Обычно для индукторов известны не токи обмоток, а напряжения, поэтому, считая токи \dot{I}_B неизвестными, перенесем их в левую часть уравнения, а (4) распространим также на обмотки ($Q \in B$). Получим систему:

$$\dot{Z}_Q \dot{I}_Q + j \sum_{P \in A, B} X_{QP} \dot{I}_P = \dot{U}_Q, \quad (5)$$

где X_{QP} – сопротивление взаимной индукции; $\dot{Z}_Q = r_Q$ и $\dot{U}_Q = 0$, если $Q \in A$; $\dot{Z}_Q = Z_B$ и $\dot{U}_Q = \dot{U}_B$, если $Q \in B$.

Уравнение (5) можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{BA} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_B \\ \dot{I}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ 0 \end{bmatrix},$$

где \dot{Z}_{BB} – квадратная матрица взаимодействия элементов массива обмоток B ; \dot{Z}_{AA} – аналогичная матрица для массива элементов A ; $\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{BA}$ – прямоугольные матрицы взаимодействия элементов массивов A и B ; $\dot{I}_B, \dot{I}_A, \dot{U}_B$ – векторы-столбцы токов и приложенных напряжений.

Матрицы \dot{Z}_{BB} и \dot{Z}_{AA} содержат активные сопротивления на главной диагонали, а все остальные члены матриц являются чисто мнимыми.

Система (5) выражает второй закон Кирхгофа для индуктивно связанных контуров, в связи с чем метод получил название «метод связанных контуров». Используется также название «метод полного осреднения ядра», так как он основан на двойном осреднении ядра по сечениям элементов источников (Q) и приемников (P и T).

Достоинствами этой записи являются также физическая наглядность и симметрия системы ($X_{QP} = X_{PQ}$), облегчающая расчет.

Электромагнитный расчет методом импедансных граничных условий устройств с ферромагнитными телами. Индукционные системы часто содержат частично или полностью ферромагнитные тела и магнитопроводы, требующие введения источников, связанных с намагниченностью материала.

Импедансные граничные условия позволяют решить задачу просто и эффективно (впервые были предложены М.А. Леонтовичем). Применительно к индукционным системам этот метод был развит В.С. Немковым. Импедансные граничные условия позволяют не рассматривать поле внутри тела. В то же время поле в окружающем пространстве, а следовательно и на поверхности тела, сохраняется прежним. Сохраняется и распределение мощности по его поверхности, определяемое вектором Пойнтинга. Импедансные граничные условия при строгой постановке должны быть заданы для всей поверхности тела, а значения импеданса на ней определяться распределением поля внутри тела. Возможны два способа вычисления сопротивлений \dot{Z} на поверхности. Первый путь, полностью справедливый при сильном поверхностном эффекте, состоит в аналитическом решении одномерной задачи. Однако его можно использовать при неярко выраженном поверхностном эффекте, если градиент плотности тока вдоль оси значительно меньше, чем по радиусу. В этом случае метод становится приближенным. Второй путь – поочередное решение внешней и внутренней задач с их сшиванием на границе с помощью импедансных условий – относится к комбинированным методам расчета.

Присвоим телам с импедансными граничными условиями обозначение N , а магнитопроводам с кусочно-постоянной проницаемостью – обозначение F . Тогда в общем случае индукционная система может состоять из объектов четырех типов: A , B , F и N (рис. 2). Такое обозначение облегчает описание системы, составление алгоритмов расчета и ввод исходных данных.

Введем на поверхности тела N вторичные источники в виде простого слоя тока с плотностью \dot{I}'_N . Так как сопротивление \dot{Z}_0 задано на всей поверхности, то для любой ее точки Q соблюдается соотношение

$$\dot{E}_Q - \dot{Z}_0 \dot{H}_{tQ} = 0. \quad (6)$$

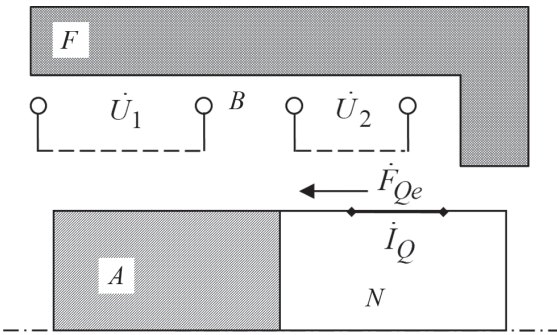


Рис. 2. Индукционная система с магнитно-немагнитной нагрузкой и магнитопроводом

Fig. 2. Induction system with magnetic-non-magnetic loading and magnetic core

Выразив \dot{E}_Q и \dot{H}_{tQ} через неизвестные токи \dot{I}'_N и известные токи индуктора, после подстановки в (6) получаем интегральное уравнение Фредгольма второго рода относительно \dot{I}'_Q . Однако опыт расчетов показал, что и в этом случае целесообразно использовать метод полного осреднения ядра интегрального уравнения, расчетное соотношение для которого можно получить из физических соображений.

Разделим поверхность тела N на кольцевые элементы с кусочно-постоянными напряженностями \dot{H}_{ie} и \dot{E} . Тогда для элемента Q вместо (6) можно написать:

$$\dot{\Delta}_Q - \dot{Z}_Q \dot{F}_{Qe} = 0, \quad (7)$$

где $\dot{\Delta}_Q$ и \dot{F}_{Qe} – ЭДС и тангенциальная составляющая МДС у поверхности; \dot{Z}_Q – сопротивление кольцевого элемента $\dot{Z}_Q = \dot{Z}_{0Q} 2\pi R_Q / l_Q$; R_Q и l_Q – радиус и длина кольцевого элемента.

Выразим $\dot{\Delta}_Q$ и \dot{F}_{Qe} через токи элементов всей системы:

$$\dot{\Delta}_Q = j \sum_P X_{QP} \dot{I}_P; \quad (8)$$

$$\dot{F}_{Qe} = \dot{H}_{tQ} \dot{I}_Q = \sum_P N_{QP} \dot{I}_P W_P. \quad (9)$$

где N_{QP} – безразмерный коэффициент, связывающий МДС на участке Q с током элемента P . Коэффициент N_{QP} является аналогом взаимной индуктивности M_{QP} . Из уравнений (7) – (9) получаем:

$$\sum_P (jX_{QP} - \dot{Z}_Q N_{QP} W_P) \dot{I}_P = 0. \quad (10)$$

Число витков $W = 1$, за исключением обмоток ($P \in B$). Система уравнений (5), (10) образует составленную методом полного осреднения математическую модель индукционного устройства, содержащего тела типов A , B и N .

Решив полученную систему, находим токи всех элементов. Чтобы определить мощности в элементах тела N , следует вычислить \dot{F}_{Qe} по формуле (9), тогда

$$\dot{S}_Q = P_Q + jQ_Q = \dot{F}_{Qe}^2 \dot{Z}_Q.$$

Учет магнитопровода можно выполнить аналогично. Условием для определения поверхностных токов является обеспечение скачка тангенциальной составляющей индукции при переходе через границу сред:

$$\dot{I}_Q = \dot{F}_{Qe} (\mu_{Qi} - \mu_{Qe}) / \mu_{Qe} = \dot{F}_{Qe} / \delta_Q. \quad (11)$$

Если внешняя среда – воздух, то

$$\mu_{Qe} = 1 \text{ и } \dot{I}_Q = \dot{F}_{Qe} (\mu_{Qi} - 1).$$

Из (9) и (11) получаем:

$$\delta_Q \dot{I}_Q - \sum_P N_{QP} \dot{I}_P W_P = 0. \quad (12)$$

Полная система уравнений для устройства по рис. 2 состоит из уравнений (5), (10) и (12):

$$\left. \begin{aligned} Q \in A, B \quad \dot{Z}_Q \dot{I}_Q + j \sum_P X_{QP} \dot{I}_P &= \dot{U}_Q; \\ Q \in N \quad \sum_P (jX_{QP} - \dot{Z}_Q N_{QP} W_P) \dot{I}_P &= 0; \\ Q \in F \quad \delta_Q \dot{I}_Q - \sum_P N_{QP} \dot{I}_P W_P &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Суммирование проводится по всем элементам, включая цепи индуктора и сами элементы Q .

Опыт расчетов показал, что при длине тела l не меньше его диаметра элементы с импедансными условиями можно вводить только на боковой поверхности, пренебрегая торцевыми токами, что упрощает расчет.

Систему уравнений (13) можно рассматривать как обобщение метода индуктивно связанных контуров для устройств, содержащих ферромагнитные тела и немагнитные тела с произвольной степенью поверхностного эффекта.

Комбинированные методы. Применение метода интегральных уравнений показало высокую эффективность во многих приложениях. Однако в то же время выявился и ряд недостатков вычислительного характера. При относительно слабо выраженном поверхностном эффекте и сильной неоднородности загрузки требуется разбиение загрузки на большое число элементов дискретизации N . Поскольку матрица системы алгебраических уравнений при использовании МИУ плотно заполненная, то время решения стремительно растет с увеличением порядка системы ($\sim N^3$), так же как и требуемая память ($\sim N^2$) темы (700–1500). Особенно это проявляется при разработке электротепловых моделей, когда необходимо многократное решение электрической задачи и детальная дискретизация загрузки.

Методы МКР и МКЭ позволяют детально исследовать распределение электромагнитного и температурного полей в загрузке. Время счета при использовании

этих методов решения и требуемый объем памяти обычно пропорциональны первой степени от числа N элементов дискретизации. Краевые условия на поверхности загрузки обычно не известны, и пространственную сетку приходится распространять на окружающую среду вплоть до границ, где допускается принять условия, связанные с затуханием поля при удалении от индукционной системы. Число узлов пространственной сетки становится во много раз больше, чем при решении только внутренней задачи. Определение входных и интегральных параметров системы и постпроцессорная обработка результатов требуют дополнительных затрат времени.

Можно предположить, что наиболее эффективным и экономичным способом расчета будут комбинированные методы, при которых расчет входных параметров индукторов (внешняя задача) проводится на базе МИУ, а расчет распределения электромагнитного и температурного полей в нагрузке (внутренняя задача) – на базе МКР или МКЭ. Поэтому были предложены так называемые экономичные методы для расчета электромагнитного поля в индукционных нагревательных системах [15, 16].

Рассмотрим модель, хорошо себя зарекомендовавшую при моделировании таких устройств, как индукционные плазматроны и устройства для плавки оксидов в холодных тиглях.

Выделим в индукционной системе (рис. 1) область A , связанную с нагрузкой, где требуется детальное знание распределения электромагнитного поля для последующего расчета температурного поля, и область B , связанную с индуктирующими катушками и другими проводящими элементами конструкции (экранами, водоохлаждаемыми кольцами и т. д.). В данной системе распределение напряженности электрического поля \dot{E} описывается интегральным уравнением Фредгольма второго рода:

$$2\pi R_Q \dot{E}_Q + j\omega \int_S \sigma_Q \dot{E} M_{QP} dS_P = \varepsilon_Q, \quad (14)$$

где M_{QP} – взаимная индуктивность нитей Q и P ; $S = A \cup B$ – сечение проводников; A – сечение загрузки; B – сечение индуктора и других проводящих элементов; ε_Q – внешняя ЭДС, приложенная к элементу Q :

$$\varepsilon_Q = \begin{cases} 0, & Q \in A; \\ \varepsilon_Q, & Q \in B. \end{cases}$$

Выделим в области A тонкий слой L по периметру загрузки. Запишем уравнение (14) относительно напряженности электрического поля в области L в индукторе, считая распределение напряженности электрического поля в остальной области известным:

$$\begin{aligned} 2\pi R_Q \dot{E}_Q + j\omega \int_{B+L} \sigma_Q \dot{E} M_{QP} dS_P = \\ = \varepsilon_Q - j\omega \int_{A-L} \sigma_Q \dot{E} M_{QP} dS_P. \end{aligned} \quad (15)$$

Система уравнений, полученная при записи уравнения (15) для неизвестных в области $(B + L)$ и их алгебраизации, имеет невысокий порядок и просто решается. Таким образом находится распределение напряженности электрического поля в области L , которое служит граничным условием для решения внутренней задачи, описываемой уравнением

$$\frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{E}}{\partial R} - \frac{\dot{E}}{R^2} = j\omega \mu_0 \mu \sigma \dot{E}. \quad (16)$$

Уравнение (15) решается поочередно с уравнением (16) до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность в определении напряженности электрического поля. Для решения уравнения (16) с граничными условиями первого рода использовались разнообразные методы. Уравнение (16) может быть решено методом конечных элементов. В этом случае энергетический функционал имеет вид:

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \dot{E}}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right)^2 + 2\dot{E} \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{E}}{\partial R} + \frac{\dot{E}^2}{R^2} + j\omega \mu_0 \mu \sigma \dot{E}^2 \right] dV.$$

Сходимость метода зависит от связи между элементами внешней и внутренней областей, и она тем выше, чем слабее эта связь. Практическая реализация метода при расчете индукционных плазматронов показала, что процесс сходится за 3–5 итераций. Этот метод прошел апробацию и хорошо себя зарекомендовал при моделировании разных индукционных устройств [17–20].

Следует отметить, что моделирование электромагнитных полей в устройствах индукционного нагрева очень часто осуществляется с использованием универсальных пакетов *ANSYS*, *FLUX*, *COMSOL*, *JMAG* и др. Все они построены на использовании метода конечных элементов. Исторически это объясняется тем, что МКЭ первоначально был теоретически разработан для решения задач механики и теплофизики [21]. Поэтому казалось, что и при расчете электромагнитных полей можно легко и просто использовать МКЭ. Однако, анализируя конкретные индукционные системы, многие авторы позднее, рассматривая интегральные методы как альтернативные, отмечают их высокую эффективность и отдают им предпочтение [22]. Учитывая высокую потребность специализированных моделей при разработке цифровых двойников, комбинированные методы будут находить еще большее применение в рамках концепции Индустрия 4.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологдин В.П. Поверхностная индукционная закалка. М.: Оборонгиз, 1947, 291 с.
2. Muehlbauer A. History of Induction Heating and Melting. Essen: Vulkan Verlag, 2008, 212 p.
3. Lucia O., Maussion P., Dede E., Burdío J.M. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, vol. 61.5, pp. 2509–2520.

4. **Frolov V.Ya., Ivanov D.V.** Calculation of a plasma composition and its thermophysical properties in cases of maintaining or quenching of electric arcs. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1058(1), 012040.
5. **Pigani A., Bobig P., Knights M., Martinis S.** Danieli Universal Endless (DUE): The new evolution of Danieli Thin Slab Casting and Rolling plant. – *Proceedings of the AISTech International Conference*, Pittsburgh Pennsylvania, USA, 2016.
6. **Schulze M., Nacke B., Nikanorov A.** Design of an one-sided transverse flux induction coil by using a numerical optimization algorithm. – *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 424, 012065, DOI:10.1088/1757-899X/424/1/012065.
7. **Kichigin, V., Nacke, B., Pozniak, I.** New process for continuous melting and pouring of oxides with skull melting crucible. – *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2017, vol. 53, pp. 89–94, DOI:10.3233/JAE-162247.
8. **Соколов Д., Соловьев С.** Цифровые двойники в эпоху Индустрии 4.0. – *Connect WIT*, 2019, № 5–6.
9. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1964, 754 с.
10. **Демирчян К.С., Чечурин В.Л.** Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа, 1986, 240 с.
11. **Silvester P.P., Ferrari R.L.** Finite elements for electrical Engineers: 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996, DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170611>.
12. **Chari M.V.K., Salon S.J.** Numerical methods in electromagnetism. London: Academic Press, 2000, 783 p.
13. **Тозони О.В.** Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975, 296 с.
14. **Lupi S., Forzan M., Aliferov A.** Analytical and Numerical Methods for Calculation of Induction and Conduction Heating Systems. – *Induction and Direct Resistance Heating*, 2015, pp. 303–359, DOI: 10.1007/978-3-319-03479-9_5.
15. **Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 271 с.
16. **Demidovich V.B.** Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals. – *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, No. 14, pp. 1023–1034.
17. **Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В.** Численное моделирование электромагнитных полей: мультифизические задачи, инструментарий и обучение. – *Электричество*, 2019, № 6, с. 51–58.
18. **Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Andrushkevich V.V., Rastvorova I.I.** 3D-simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters. – *Coupled Problems 2015 – Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering*, 2015, pp. 976–984.
19. **Frolov V., Ivanov D., Shibaev M.** Mathematical modeling of plasma technology for TiO₂ fine powder production. – *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2014, 9(3), pp. 1233–1240.
20. **Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Чмиленко Ф.В. и др.** Моделирование индукционных нагревателей с учетом особенностей работы тиристорного преобразователя частоты с параллельным инвертором. – *Электричество*, 2013, № 10, с. 52–59.
21. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979, 392 с.
22. **Sablic M.J., Beissner R.E., Choy A.** An alternative numerical approach of computing eddy currents: Case of the double-layered plate. – *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, No. 3, pp. 500–506.

[15.04.2021]

Автор: Демидович Виктор Болеславович – доктор техн. наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).



Elektrichestvo, 2021, No. 7, pp. 26–32

DOI:10.24160/0013-5380-2021-7-26-32

Digital Modeling of Electromagnetic Processes in Technological Induction Devices

DEMIDOVICH Viktor B. (St. Petersburg State Electrical Engineering University «LETI», St. Petersburg, Russia) – Chief Research Officer; Dr. Sci. (Eng.).

Development of an electrical calculation method plays the leading role in simulating induction devices. In modeling electrical devices and complexes, it is often necessary to simultaneously solve both chain and field problems, i.e., to deal with both lumped and distributed parameters. The article considers the method of integral equations for induction systems with non-magnetic and ferromagnetic loading, which is based on the theory of long-range action. The method's key statement is that the field at any point is determined as the sum of the fields produced by all sources, including primary and secondary ones. Another finite element method is based on the theory of short-range action, which describes the electromagnetic wave propagation from point to point, its refraction and reflection at the boundaries of media. The article substantiates the development of a combined method based on using the method of integral equations for calculating the input parameters of inductors (an external problem) and the finite element method for calculating the field distribution in the load (an internal problem). The combined method has well proven itself in modeling induction heating and melting of metals and oxides, heating a tape in a transverse magnetic field, induction plasmotrons, and casting aluminum into an electromagnetic crystallizer.

Key words: computer modeling, numerical methods, combined method, electromagnetic field, induction devices, induction heating

REFERENCES

1. **Vologdin V.P.** *Poverhnoznaya induktsionnaya zakalka* (Surface induction quenching). M.: Oborongiz, 1947, 291 p.
2. **Muehlbauer A.** *History of Induction Heating and Melting*. Essen: Vulkan Verlag, 2008, 212 p.
3. **Lucia O., Maussion P., Dede E., Burdio J.M.** Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, vol. 61.5, pp. 2509–2520.
4. **Frolov V.Ya., Ivanov D.V.** Calculation of a plasma composition and its thermophysical properties in cases of maintaining or quenching of electric arcs. – Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1058(1), 012040.
5. **Pigani A., Bobig P., Knights M., Martinis S.** Danieli Universal Endless (DUE): The new evolution of Danieli Thin Slab Casting and Rolling plant. – Proceedings of the AISTech International Conference, Pittsburgh Pennsylvania, USA, 2016.
6. **Schulze M., Nacke B., Nikanorov A.** Design of an one-sided transverse flux induction coil by using a numerical optimization algorithm. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 424, 012065, DOI:10.1088/1757-899X/424/1/012065.
7. **Kichigin, V., Nacke, B., Pozniak I.** New process for continuous melting and pouring of oxides with skull melting crucible. – International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, vol. 53, pp. 89–94, DOI:10.3233/JAE-162247.
8. **Sokolov D., Solov'ev S.** Connect WIT, 2019, No. 5–6.
9. **Bessonov L.A.** *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). M.: Vysshaya shkola, 1964, 754 p.
10. **Demirchyan K.S., Chechurin V.L.** *Mashinnye raschety elektromagnitnyh poley* (Machine calculations of electromagnetic fields). M.: Vysshaya shkola, 1986, 240 p.
11. **Silvester P.P., Ferrari R.L.** *Finite elements for electrical Engineers*: 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996, DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170611>.
12. **Chari M.V.K., Salon S.J.** *Numerical methods in electromagnetism*. London: Academic Press, 2000, 783 p.
13. **Tozoni O.V.** *Metod vtorichnyh istochnikov v elektrotehnike* (The method of secondary sources in electrical engineering). M.: Energiya, 1975, 296 p.
14. **Lupi S., Forzan M., Aliferov A.** Analytical and Numerical Methods for Calculation of Induction and Conduction Heating Systems. – Induction and Direct Resistance Heating, 2015, pp. 303–359, DOI: 10.1007/978-3-319-03479-9_5.
15. **Nemkov V.S., Demidovich V.B.** *Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva* (Theory and calculation of induction heating devices). L.: Energoatomizdat, 1988, 271 p.
16. **Demidovich V.B.** Computer simulation and optimal designing of energy-saving technologies of the induction heating of metals. – Thermal Engineering, 2012, vol. 59, No. 14, pp. 1023–1034.
17. **Butyrin P.A., Dubitskiy S.D., Korovkin N.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 6, pp. 51–58.
18. **Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Andrushkevich V.V., Rastvorova I.I.** 3D-simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters. – Coupled Problems 2015 – Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, 2015, pp. 976–984.
19. **Frolov V., Ivanov D., Shibaev M.** Mathematical modeling of plasma technology for TiO₂ fine powder production. – Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2014, 9(3), pp. 1233–1240.
20. **Demidovich V.B., Grigor'ev E.A., Chmilenko F.V. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 10, pp. 52–59.
21. **Seegerlind L.** *Primenenie metoda konechnykh elementov* (Application of the finite element method). M.: Mir, 1979, 392 p.
22. **Sablic M.J., Beissner R.E., Choy A.** An alternative numerical approach of computing eddy currents: Case of the double-layered plate. – IEEE Transactions on Magnetics, 1984, vol. 20, No. 3, pp. 500–506.

[15.04.2021]