

УДК 669.71

ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНДУКТОРОВ

А.С. Егизарян

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

E-mail: epp@samgtu.ru

Рассмотрены подходы к проектированию индукционных нагревательных установок (ИНУ). Отмечено, что расчет конструкции индуктора надо проводить с учетом параметров нагреваемой заготовки и деформирующего оборудования. При этом описание электромагнитного поля возможно в трех эквивалентных формах, а именно в виде дифференциальных и интегральных уравнений и вариационных принципов. Проведен сравнительный анализ аналитических и численных методов и методов физического моделирования. Указано, что преимущество аналитического решения заключается в возможности применения хорошо разработанного аппарата эквивалентных преобразований. Рассмотрены возможные аспекты постановки задач проектирования и их влияние на конечный результат проекта. Отмечается, что многие проблемы решаются путем создания специализированной САПР ИНУ.

Ключевые слова: индуктор, моделирование, метод, уравнения, электромагнитное поле, поверхностный эффект, оптимизация.

К проблеме проектирования электротермических процессов можно подойти с «глобальной» точки зрения и со стороны отдельных частных задач. Глобальный подход – рассмотрение индукционного нагрева как части неразрывного производственного комплекса, состоящего из выработки и передачи электроэнергии, индукционного нагрева, производства полуфабрикатов, механической обработки и изготовления. Эффективное проектирование такого комплекса состоит в оптимальном синтезе процессов и оборудования, его составляющих, с целью получения максимального приведенного дохода.

Например, в случае индукционного нагрева металла под деформацию такая задача математически может быть представлена в многокритериальной форме

$$I_g(X) = \{I_1(X), I_2(X), \dots, I_k(X)\} \rightarrow \max; \quad X \in D$$

$$D: h_j(X) \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Здесь $I_i(X)$, ($i = 1, 2, \dots, k$) – критерии, определяющие величину дохода (капитальные и текущие издержки за год функционирования, производительность, стабильность экономических показателей и др.). $h_j(X)$ – ограничения (качество производства, финансовые и материальные ресурсы, экономические нормы и требования охраны труда, ограничения на площади и т. д.), которые определяют границы области D возможных изменений решения X . Решение представляет собой вектор параметров и функций, отражающих структуру и количественные характеристики системы электроснабжения электротермического участка, ос-

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-0305.

Александра Сергеевна Егизарян, старший преподаватель кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

новые конструктивные параметры нагревателей и режим их работы, скорость прессования, режим прокатки и прочие параметры механической обработки нагретого металла.

Из формулировки задачи хорошо видно, что оптимизировать весь процесс производства как единое целое – практически неразрешимая задача. С другой стороны, решение частных задач вне связи друг с другом, например расчет конструкции индуктора без учета параметров нагреваемой заготовки и деформирующего оборудования, разумеется, не даст практически полезных результатов. Конечной целью изучения переноса энергии в электромагнитном поле является определение плотности потока энергии (вектора Пойнтинга) и распределения выделяемой в металле мощности как функций пространственных координат и времени. Однако в электродинамике нет уравнений, из которых можно непосредственно найти плотность потока энергии в заданной системе тел. Чтобы вычислить значение вектора Пойнтинга в некоторой точке, необходимо предварительно определить напряженности электрического и магнитного полей.

Описание поля можно дать в трех эквивалентных формах, а именно в виде дифференциальных и интегральных уравнений и вариационных принципов. Дифференциальные уравнения выражают только локальные свойства поля. Поэтому для получения однозначного решения они должны быть дополнены краевыми (начальными и граничными) условиями. Интегральные уравнения охватывают всю проблему в целом, включая как локальные, так и дальние взаимодействия (в том числе краевые условия). Наконец, вариационные принципы утверждают, что некоторые величины, характерные для данной проблемы, при действительной эволюции системы достигают наименьшего (или наибольшего) значения в сравнении с любой другой эволюцией.

Расчет индукторов для нагрева заготовок в электромагнитном поле преследует двоякую цель: найти распределение выделяемой в металле энергии и согласовать параметры источника питания и нагрузки. В настоящее время первая часть расчета обычно решается в прямой постановке, а именно: заданы геометрические и физические параметры индуктора и заготовки, а также ток (или напряжение) в цепи питания; определяется плотность наведенных токов и распределение выделяемого джоулева тепла. Наибольший интерес представляют математические методы решения этой задачи в обратной постановке (задано требуемое распределение выделяемой энергии, определяется форма и размеры индуктора).

Если же описание алгоритма составлено с информационной целью, т. е. для ознакомления с особенностями вычислительного процесса, то оно должно состоять не из элементарных, а из достаточно содержательных операций. Такого рода описанием являются блок-схемы (графическое изображение структуры алгоритма) и операторные схемы. Операторная схема счета, дополненная специальными операторами управления, обеспечивающими автоматическое выполнение вычислительного процесса, образует логическую схему программы.

Конечный результат аналитического решения задачи, т. е. формулу, можно трактовать, вообще говоря, как сжатое символическое обозначение вычислительного алгоритма. Преимущество аналитического решения заключается в возможности применения хорошо разработанного аппарата эквивалентных преобразований. В этом случае сложный исходный алгоритм (соответствующий, например, дифференциальным или интегральным уравнениям) сводится к значительно более простому – к формуле, содержащей элементарные или специальные, но

хорошо табулированные функции [1].

Индукторы можно исследовать путем расчетов и моделирования – математического или физического. Физические методы моделирования осуществляются главным образом с сохранением природы изучаемых явлений в условиях геометрического подобия (или на натуральных образцах). К моделированию обычно прибегают в двух случаях: либо когда система настолько проста, что нет необходимости в расчетах, либо, напротив, когда теоретические методы оказываются бесильными ввиду особой сложности задачи. Результаты расчета индуктора могут быть представлены в аналитическом (формульном) или алгоритмическом виде.

Преимущество формульного решения – компактность и наглядность, алгоритмического – большая общность. Формульные решения уравнений электродинамики, например для пластины, цилиндра или сферы, имеют совершенно различный вид, так как выражаются через тригонометрические, цилиндрические и сферические функции соответственно. Алгоритмическое же решение во всех этих трех случаях представлено общей операторной схемой.

Однако общее достаточно точное решение для неравномерно нагретых металлических тел (особенно при слабом проявлении поверхностного эффекта) может быть представлено только рекурсивной функцией, т. е. функцией от системы заданных величин, вычисляемых с помощью фиксированного алгоритма.

При оценке степени проявления поверхностного эффекта единицей масштаба служит глубина проникновения тока – параметр, который зависит от свойств и поля (частота), и металла (магнитная проницаемость, электрическое сопротивление). Например, в круговом цилиндре, где токи текут в плоскостях, перпендикулярных оси, характерный размер равен половине радиуса, в длинной пластине – половине ее толщины. Оценка степени проявления поверхностного эффекта в телах с гладкой формой поверхности обычно однозначна. Некоторая неопределенность возникает при нагреве тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, например прямоугольных, когда возникает так называемый поперечный краевой эффект [2].

Значительный фактором трудоемкости решения является подход к формулированию проектной задачи. Именно этим во многих случаях объясняется тот факт, что проектные решения, получаемые в результате сложных исследований с использованием ЭВМ, очень часто обладают лишь незначительными преимуществами или не имеют их вообще по сравнению с аналитическими решениями, полученными инженером, не искушенным в математике, но хорошо знающим технологию проектирования. При имеющейся недостоверности физических или экономических данных такая позиция, конечно, обоснована: трудность заключается в умении своевременно увидеть конец работы. Навязчивая идея во что бы то ни стало добиться идеального оптимума может привести к неоправданным затратам в тех случаях, когда более дешевые альтернативные решения практически не отличаются от оптимального. Большинство инженеров удовлетворяется получением решения, достаточно близкого к оптимальному, предпочитая не тратить время на поиски путей к абсолютному и вряд ли достижимому совершенству. Надо уметь сформулировать ограничения, которые позволяют определить наступление момента, когда дальнейшие расчеты и анализ уже не дают полезных результатов.

Изложенные выше соображения положены в основу исследований авторов по проектированию энергоэффективных индукторов [3].

Широко известные программные комплексы ANSYS, MatCAD, MatLab ори-

ентированы на широкую область применения в различных областях науки и техники. Однако они слабо приспособлены для решения конкретных задач индукционного нагрева, учета взаимного влияния тепловых и электромагнитных полей и оптимизации режимов нагрева. Преодоление этих проблем возможно путем создания специализированной САПР ИНУ, объединяющей достоинства таких мощных расчетных пакетов, как MatCAD и др. и программы специального назначения, такие, например, как QuickField.

Очевидно, что эффективность процесса автоматизированного проектирования в рамках САПР определяется не только качеством проектирующих и обслуживающих подсистем, но и полнотой базы данных, наличие которой обязательно согласно известным принципам законченности и целостности САПР. Центральной проблемой при организации базы данных является создание корректной лексико-семантической модели предметной среды, в рамках которой оперируют теория и практика индукционного нагрева. Исходя из того, что характерной особенностью предметной среды индукционного нагрева является большое число лингвистических и теоретико-множественных отношений малой мощности, в качестве концептуальной модели среды целесообразно использовать проблемно-ориентированную семантическую сеть фреймов, которая благодаря «чувствительности» и «эстетичности» позволяет систематизированно вести процесс использования теории индукционного нагрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152-159. – ISSN 1991–8542.
2. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. (Щелочкова А.М.) Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – Вып. № 7 (28). – С. 231-233.
3. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев. – № 22. – СПб.: Комлиз-Полиграфия, 2012. – С. 41-43.

Статья поступила в редакцию 13 января 2015 г.

POSSIBLE APPROACHES TO DESIGN INDUCTORS

A.S. Eghiazaryan

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

Approaches to the design of induction heating units (INU) are discussed. It is noted that the calculation of the inductor should be conducted within the parameters of the heated work piece and deforming equipment. This description of the electromagnetic field may be in three equivalent forms and names-but in the form of differential and integral equations and variation principles. A comparative analysis of analytical and numerical methods and methods of physical modeling was made. Stated that the advantage of the analytical solution consists in the possibility of applying a well-developed apparatus of an equivalent turbulent transformation. The possible aspects of the tasking Pro-designing and their influence on the final result of the project are considered. It is noted that many problems can be solved by creating a specialized CAD INU.

Keywords: *inductor, modeling, method, equations, electromagnetic field, skin-effect, optimization.*

Alexandra S. Eghiazaryan, Senior Lecture.