

УДК 621.365.511

РЕШЕНИЕ ПОЛЕВЫХ ЗАДАЧ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНДУКТОРА С МАГНИТОПРОВОДОМ*

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Д.Н. Пименов

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru; aidanilushkin@yandex.ru

Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию электромагнитных и тепловых процессов в индукционном нагревателе, содержащем замкнутый магнитопровод. Специфика индукционных нагревателей, имеющих футеровку, обеспечивающую тепловую защиту обмотки и снижение тепловых потерь, отражается на увеличении зазора между индуктором и нагрузкой. Это приводит к замыканию магнитного потока непосредственно между зубцами, что сказывается на энергетических характеристиках индуктора. Для определения наиболее выгодных соотношений между размерами паза и зубца, паза и зазора между индуктором и нагрузкой проводятся исследования и строятся зависимости. Отдельным вопросом является определение заглубления нагрузки. Этот параметр влияет не только на распределение удельной мощности по длине нагрузки, но и на достижимую точность нагрева при ограничении времени процесса. Геометрическая сложность конструкции и наличие нелинейных зависимостей в распределении электромагнитных и тепловых полей делают основным инструментом трехмерные численные модели. При решении некоторых задач используется двумерная постановка.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитная проницаемость, векторный магнитный потенциал.

Системы индукционного нагрева применяются довольно длительное время, с большим успехом составляя конкуренцию другим видам нагрева. Вместе с тем такие особенности технологического процесса, как высокая температура и повышенная частота питающего напряжения, существенно ограничивают применение магнитопроводов при изготовлении индукторов. Это сказывается отрицательно на энергетических характеристиках устройств индукционного нагрева, главным образом за счет больших полей рассеяния магнитного поля. В последнее время несколько расширилось применение магнитопроводов из новых материалов, таких как магнитодиэлектрики, что положительно отражается на управлении распределением магнитного поля и внутренних источников тепла в нагрузке. Предлагаемая работа направлена на расширение возможностей индукционных устройств за счет использования замкнутых магнитопроводов. Конечной целью такого решения является повышение управляемости процесса формирования внутренних источников. На современном этапе ставится задача разработки

* Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-0305.

Александр Александрович Базаров (д.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александр Иванович Данилушкин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Данил Николаевич Пименов, аспирант.

математических моделей и алгоритмов проектирования процессов и устройств. Особенность рассматриваемых задач заключается в сложности математического аппарата и значительной ресурсоемкости вычислений. Ориентация на использование персонального компьютера предполагает оценку возможностей моделирования процессов, погрешностей вычислений и получения приемлемых в проектной практике результатов.

Конструкция индуктора с магнитопроводом (рис. 1) содержит магнитопровод, аналогичный статору двигателя переменного тока, с вложенными в пазы изолированными витками обмотки, футеровку и загрузку. Работы в данном направлении были посвящены исследованию отдельных вопросов, связанных с разработкой конструкции магнитопровода, выбором систем охлаждения проводников и железа [1]. В предлагаемой работе ставится задача более детального исследования характеристик.

Для простоты рассматривается обмотка с комбинацией прямого и обратного чередования фаз, чтобы исключить проявление вращающего момента на загрузку. Исследование характеристик индуктора с немагнитной загрузкой также позволяет не опасаться притяжения загрузки к футеровке за счет электромагнитных сил с возможностью ее быстрого разрушения ввиду ее хрупкости и низкой стойкости к истиранию.

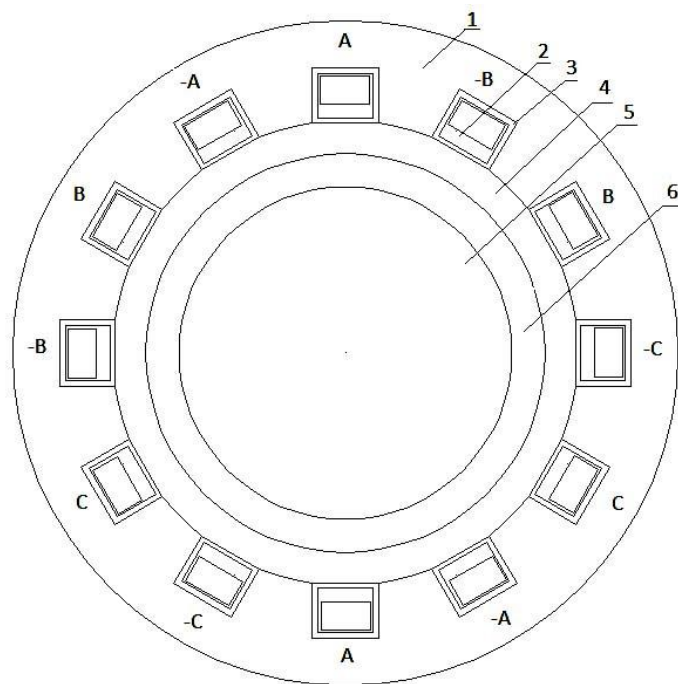


Рис. 1. Трехфазный индуктор с магнитопроводом:

1 — магнитопровод; 2 — водохлаждаемый виток обмотки; 3 — изоляция витка;
4 — футеровка; 5 — загрузка; 6 — воздушный зазор

Проектирование индуктора включает определение не только конструктивных параметров, таких как внутренний и внешний диаметр магнитопровода, длина индуктора, толщина футеровки, но и мощности индуктора, тока, напряжения, коэффициента мощности. Кроме того, необходимо согласовать функциони-

рование оборудования не только с другими технологическими узлами, например прессом, но и с питающей сетью. Такие режимы, как пусковой, могут серьезно усложнить работу. Анализ всех вопросов одновременно невозможен, требуется многократное уточнение параметров при более детальном рассмотрении различных аспектов.

Сходная по сложности картина наблюдается при исследовании влияния конструктивных параметров на энергетические характеристики индуктора.

В качестве исходных данных взяты физические свойства для алюминиевого сплава марки Д16. Размеры слитка: диаметр 0,42 м, длина 0,8 м. Температура максимально нагретой точки – 480 °С, температура центра – 430 °С. Допустимое отклонение температуры – ±12 °С.

Физические свойства: плотность 2700 кг/м³; температура плавления 660 °С; коэффициент теплопроводности $\lambda = 228 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$; коэффициент теплоемкости $C_p = 880 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°С)}$; удельное сопротивление $\rho = 2.7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В отличие от электрических машин в рассматриваемой задаче нет жестких ограничений на величину допустимой индукции магнитопровода. В то же время отсутствие магнитных свойств у загрузки делает непростой процедуру выбора ширины паза и зубца магнитопровода. Решение этой задачи достигается построением зависимостей от величины соотношения размеров паза и зубца. Для выполнения этой процедуры вполне возможно обойтись двумерной электромагнитной задачей. Перейдя от системы уравнений Максвелла [2] к формулировке с использованием векторного магнитного потенциала, можно записать дифференциальное уравнение с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega g A = -j_{ext}; \quad A|_L = 0. \quad (1)$$

Здесь: A – векторный магнитный потенциал; μ_x, μ_y – относительная магнитная проницаемость материала по осям x, y ; x, y – координаты; j – мнимая единица; ω – круговая частота тока; g – удельная электрическая проводимость; L – граница расчетной области; j_{ext} – плотность стороннего тока.

На базе уравнений (1) строится конечно-элементная формулировка [3] для плоской двумерной области. В качестве программной реализации используется пакет Elcut. В версиях начиная с 5.6 реализована поддержка нелинейной электромагнитной задачи, что позволяет корректно решать подобные задачи. Конечная система уравнений имеет вид

$$[K] \cdot \{u\} = \{I\}. \quad (2)$$

Здесь $[K], \{I\}, \{U\}$ – матрица жесткости и векторы источников и неизвестных величин.

При решении задачи моделирования электромагнитных процессов в системе «индуктор – загрузка» были приняты: число пазов, равное 12; суммарная ширина паза и зубца 123 мм; диаметр индуктора внутренний 470 мм; диаметр индуктора внешний 640 мм; диаметр загрузки 420 мм.

В результате расчетов были получены характеристики индукторов для пяти вариантов соотношения размеров паза и зубца (табл. 1).

Максимальное значение индукции в магнитопроводе B_{max} находится в пределах 1,19 – 1,33 Тл.

Полученные результаты отражают не только зависимость различных величин от соотношения размеров паза и зубца, но и в некоторых пределах явное влияние соотношения размеров паза и зазора между индуктором и загрузкой.

На втором этапе рассмотрим влияние длины индуктора на его характеристики при неизменной длине загрузки.

Таблица 1

Параметры индуктора при различной ширине паза

№	1	2	3	4	5
Ширина паза, мм	60	65	70	75	80
Ширина зубца, мм	63	58	53	48	43
Фазный ток, А	34 700	35 300	35 800	36 900	36 450
Фазное напряжение, В	30,6	28,6	27,6	27	27,2
Мощность в загрузке, кВт	152	150	149,8	150,8	149,8
Потери мощности в индукторе, кВт	178	168	160	159	236
Мощность индуктора, кВт	330	318	309,8	309,8	385,8
Полная мощность, кВА	3 185	3 028	2 964	2 989	2 974
КПД	0,46	0,47	0,483	0,487	0,388
Cos φ	0,103	0,105	0,105	0,104	0,13

Для классической конструкции индуктора, представляющей собой соленоидальную катушку, имеют место краевые эффекты. По краям загрузки в зависимости от заглубления, или, другими словами, от соотношения длин индуктора и загрузки может наблюдаться как значительное снижение удельной мощности, так и повышение [4]. Регулируя величину заглубления, можно добиться желаемого уровня повышения мощности на краях, чтобы скомпенсировать тепловые потери на торцах, где не предусмотрена тепловая изоляция.

Решение задачи моделирования электромагнитных, а также еще и тепловых процессов требует использования трехмерной постановки. Это существенно повышает требования к ресурсам компьютера. Если в двумерной постановке электромагнитная задача может содержать 2 млн элементов, то это не будет чрезмерной нагрузкой для компьютера. В случае трехмерных моделей соотношение числа конечных элементов и оперативной памяти совершенно другое. Так, для компьютера с оперативной памятью в 32 Гб для решения задачи с 100 000 элементами потребуются все ресурсы. Кроме того, подобная задача требует времени около 2 суток.

Для описания электромагнитного поля в трехмерной постановке требуется использовать не только векторный магнитный потенциал A , но и электрический скалярный потенциал V , чтобы обеспечить замыкание магнитных потоков и токов при изменении направления движения.

$$-\nabla(j\omega\sigma A + \sigma\nabla V - J^e) = 0;$$

$$j\omega\sigma A + \nabla \times \left(\frac{\nabla \times A}{\mu_0\mu_r} \right) + \sigma\nabla V = J^e. \quad (3)$$

Здесь: ∇ – оператор набла, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$, где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные

векторы по осям x, y, z соответственно.

Оператор набла при применении к вектору A записывается в виде векторного произведения $\nabla \times A$, а при применении к скалярной величине V – в виде скалярного произведения ∇V .

Расчетная система уравнений составляется аналогично (2), но с отличием в векторе неизвестных величин:

$$[\overline{K}] \left\{ \overset{\bullet}{u} \right\} = \left\{ \overline{J_i} \right\}; \quad (4)$$

$$\{u\} = \left\{ \begin{matrix} \{A_e\} \\ \{V_e\} \end{matrix} \right\}. \quad (5)$$

Как видно, размерность вектора $\{u\}$ существенно больше, чем у аналогичного в выражении (2). Конечно, изменения в размерах сказываются не только на векторах, но и на матрице жесткости. Как отмечалось выше, значительно возрастающие требования к вычислительным ресурсам заставляют корректировать подход к построению модели. Вместо рассмотрения всего объекта приходится ограничиться его фрагментом. В данном случае с некоторыми допущениями можно произвести расчет для сектора (рис. 2).

Граничные условия в этом случае приходится задавать не только на боковой поверхности вокруг индуктора и на торцах, но и на плоскостях среза. Из имеющихся вариантов наиболее подходящими являются условия антипериодичности:

$$V_{dst} = -V_{src}; \quad A_{dst} = -A_{src}. \quad (6)$$

Здесь индексы dst и src означают «назначение» и «источник», фактически отражая значения функций слева и справа от поверхности раздела.

Условия магнитной изоляции задаются на боковой поверхности и на торцах

$$n \times A = 0; \quad n \cdot J = 0. \quad (7)$$

Более правильным вместо (6) было бы задание магнитного потока с фазовым сдвигом, но такое в программе не предусмотрено.

При анализе расчетной модели (см. рис. 2) напрашивается аналогия с линейным двигателем. При кажущейся равноценности этот вариант намного предпочтительнее. Дело в том, что формируемые матрицы жесткости $[K]$ имеют отличие: для конструкции в виде сектора они являются несимметричными. Это приводит к тому, что метод решения является более трудоемким и ресурсоемким. На примере рассматриваемой задачи прямоугольная модель может содержать вместо 100 000 элементов 300 000. Кроме того, скорость решения несравнимо выше. Таким образом, при достаточном анализе результатов решения можно существенно сэкономить ресурсы при повышении точности расчетов за счет изменения модели.

Моделирование тепловых процессов само по себе не столь ресурсоемко. Однако при увеличении векторов источников и матриц жесткости аналогично выражениям (5, 6) при объединении электромагнитных и тепловых задач такая процедура существенно усложняет расчет. Гораздо экономичнее и быстрее выявить траекторию протекания тока и определить мощности тепловыделения, чтобы затем перенести в тепловую задачу. Конечно, это невыгодно делать при одноразовом решении или при двумерной постановке.

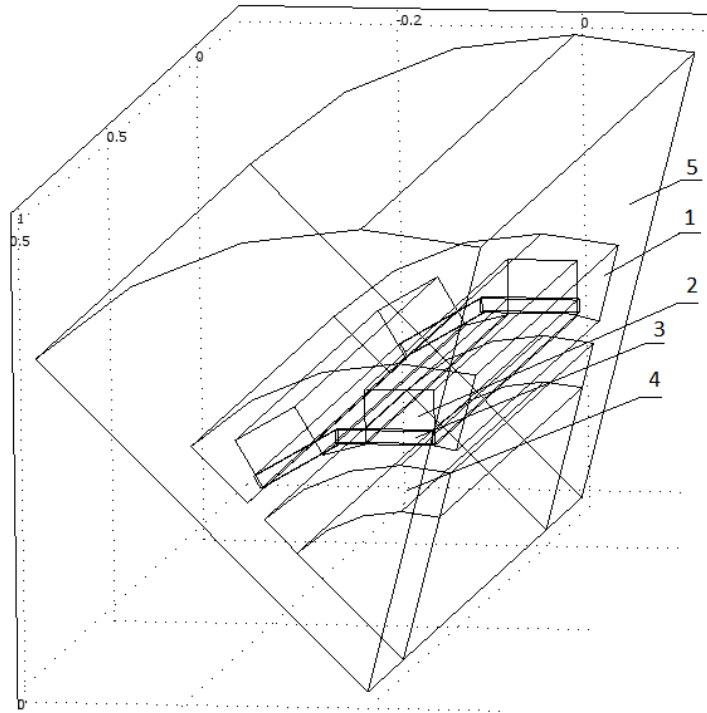


Рис. 2. Сектор индуктора с двумя витками:
1 – магнитопровод; 2 – паз; 3 – виток; 4 – загрузка; 5 – воздух

Уравнение теплопроводности для трехмерной области с внутренними источниками тепла имеет вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w. \quad (8)$$

Здесь: ρ – плотность материала; K_i – коэффициенты теплопроводности по осям x, y, z ; T – температура; w – удельная мощность тепловыделения.

В качестве граничных условий на боковой поверхности и торцах используется конвективный теплообмен в форме

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_c). \quad (9)$$

Здесь индекс x может принимать значения других координатных осей или нормали n по отношению к рассматриваемой поверхности.

На поверхностях среза задается условие тепловой изоляции

$$K_n \frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (10)$$

Таким образом, сформирован комплекс математических моделей для трехмерной постановки, позволяющий рассчитывать электромагнитные и тепловые процессы при исследовании свойств индукционного нагревателя с магнитопроводом.

Для определения влияния соотношения длин загрузки и индуктора был произведен ряд расчетов. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3. Нужно иметь в виду, что края витков индуктора находятся вне пределов магнитопровода (по аналогии с конструкцией электрических машин – лобовые части витков).

Распределение мощности для загрузки длиной 0,9 и 1 м совпадают. Отличие в том, что для загрузки длиной 0,9 м кривая начинается на расстоянии 0,05 м от края.

Таблица 2

Параметры индуктора при разной длине загрузки

№	Длина загрузки, м	Ток индуктора, кА	Мощность в загрузке, кВт	Удельная мощность, Вт/м ³ , $\times 10^7$
1	0,6	43,2	9,9	1,35
2	0,7	43,1	16,8	2
3	0,8	43,2	24,8	2,5
4	0,85	43,2	28,7	2,8
5	0,9	43,16	39,4	4
6	1	43,2	38,9	4

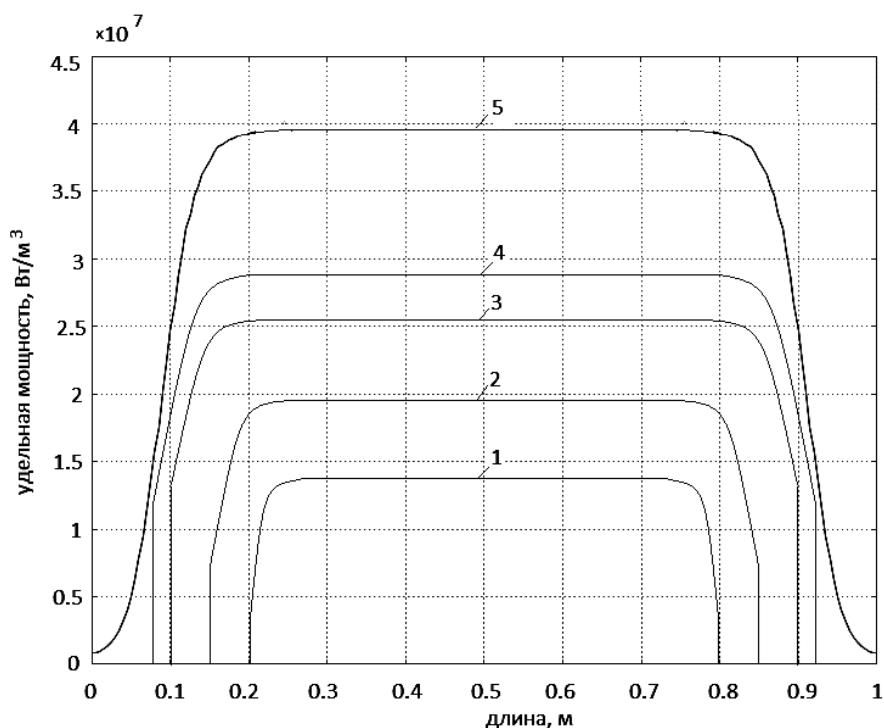


Рис. 3 Диаграммы распределения удельной мощности в загрузке под витком индуктора:
1 – при длине загрузки 0,6 м; 2 – при длине загрузки 0,7 м; 3 – при длине загрузки 0,8 м;
4 – при длине загрузки 0,85 м; 5 – при длине загрузки 1 м

Как и следовало ожидать, мощность в загрузке за пределами магнитопровода быстро снижается до нуля. Поэтому нагрев такой загрузки будет неэффективным, хотя полезная мощность возрастает до значения длины 0,9 м. Более детальный ответ может быть получен после моделирования тепловых процессов.

Для определения распределения мощности возле торцевой поверхности загрузки построен ряд диаграмм на линиях, параллельных торцу (рис. 4).

В торцевой зоне загрузки распределение плотности тока и удельной

мощности является более размытым, чем в регулярной зоне. Это в конечном счете приводит к уменьшению мощности.

Диаграммы температуры вдоль осевой линии под витком и посередине между витками приведены на рис. 5. При моделировании принято время нагрева, равное 1 000 с. Затем моделируется процесс охлаждения в естественных условиях в течение 200 с. Благодаря высокой теплопроводности сплава перепад температуры по длине даже для длинной загрузки (1 м) составляет 70°C в момент отключения нагрева. Выдержка в течение 50 с приводит к снижению перепада до 45°C , а через 100 секунд – до 30°C . При уменьшении длины загрузки до 0,8 м перепад температуры снижается до 25°C , что укладывается в заданные отклонения.

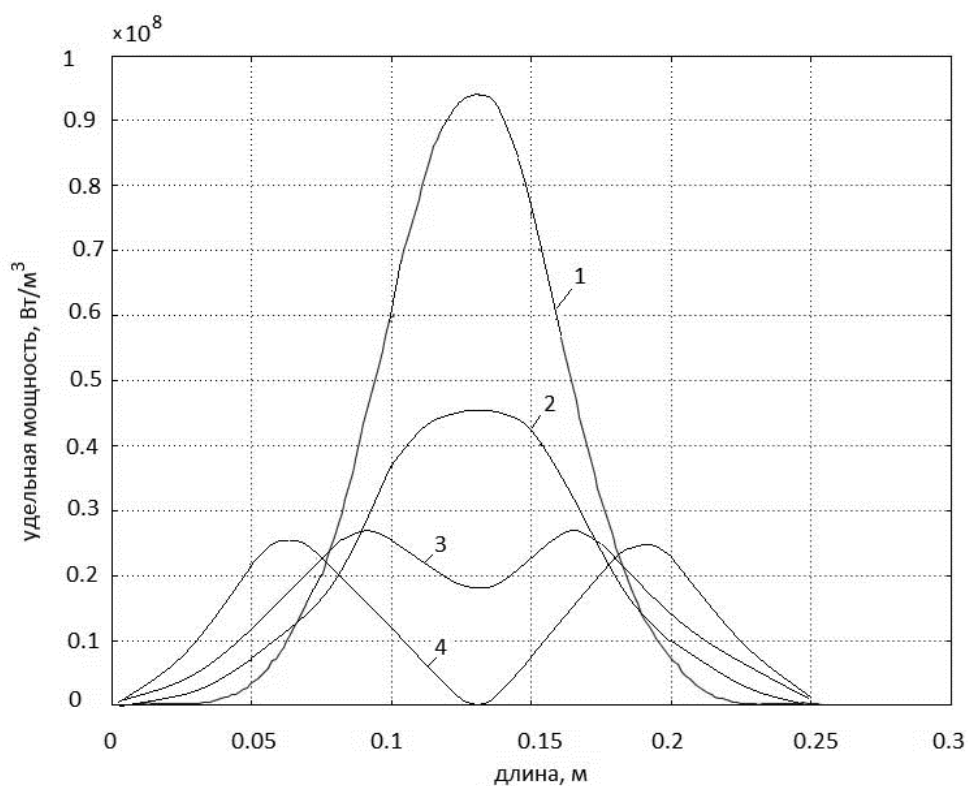


Рис. 4. Диаграммы распределения удельной мощности на поверхности загрузки на линии, параллельной торцу:
1 – на торце; 2 – на расстоянии 10 мм от торца; 3 – на расстоянии 20 мм от торца; 4 – на расстоянии 100 мм от торца

Результаты моделирования электромагнитных и тепловых процессов позволяют сделать несколько выводов, касающихся алгоритма поиска варианта, обеспечивающего максимум КПД и заданную точность нагрева.

1. Основная масса расчетов, связанная с поиском числа пазов, размеров паза и зубца, осуществляется на базе двумерных моделей. На этом этапе предварительно определяются КПД и интегральные характеристики индуктора.

2. С помощью трехмерных моделей рассчитываются краевые эффекты и определяется температурное распределение для различных длительностей ин-

тервалов управления. В случае необходимости производится корректировка размеров паза.

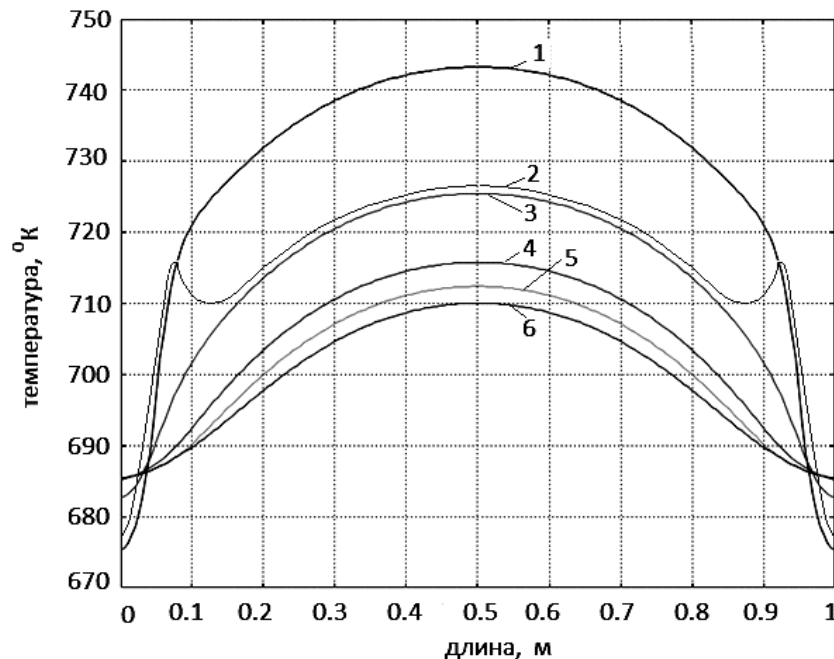


Рис. 5. Диаграммы температур на поверхности по длине загрузки: 1 – под витком в момент отключения нагрева; 2 – между витками в момент отключения нагрева; 3 – под витком через 50 с после отключения нагрева; 4 – под витком через 100 с после отключения нагрева; 5 – под витком через 150 с после отключения нагрева; 6 – под витком через 200 с после отключения нагрева

3. На основании уточненных данных по размерам паза и уровню мощности производится расчет параметров индуктора и поиск оптимального режима нагрева.

Представленный алгоритм помимо поставленных задач позволяет решить проблему сокращения затрат времени на поиск параметров индуктора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Никитина Е.А. Моделирование и расчет внутренних источников тепла в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – Вып. 2 (24). – С. 120–127.
2. Демирчян К.С., Солнышкин Н.И. Расчет трехмерных магнитных полей методом конечных элементов // Изв. АН СССР: Энергетика и транспорт. – 1975. – № 5. – С. 39–49.
3. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. – М.: МЭИ, 2003. – С. 100.
4. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

Статья поступила в редакцию 15 января 2015 г.

THE SOLUTION OF FIELD PROBLEMS AT DESIGNING INDUCTOR WITH A MAGNETIC CIRCUIT

A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin, D.N. Pimenov

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru; aidanilushkin@yandex.ru

A set of issues on simulating electromagnetic and thermal processes in a closed magnetic circuit induction heater is discussed. The specific features of induction heaters with a lining ensuring thermal protection of the winding and decrease in thermal losses decrease, are reflected in a positive allowance increase between the inductor and the heated body. It results in magnetic-flux short circuits directly among the teeth, which affects inductor power characteristics. To determine the most favourable ratios between the groove and tooth sizes, the groove and the positive allowance between the inductor and the heated body, research is being carried out, and dependences are being constructed. A separate issue is determining the heated body placement depth. This parameter influences not only the specific power distribution along the workpiece, but also the heating accuracy achieved under the process time limit. The geometrical complexity of the design and the presence of nonlinear dependences in the distribution of electromagnetic and thermal fields makes three-dimensional numerical models the basic tools. In solving some of the problems two-dimensional array is used.

Keywords: induction heating, a magnetic inductive capacity, the vector magnetic potential.

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Danil N. Pimenov, Graduate Student.*