

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО МАССЕ

Статья посвящена проектированию трансформаторов малой мощности для работы на повышенных частотах питающего напряжения, оптимальных по массе активных материалов – магнитопровода и обмотки. В работе представлены теоретические и экспериментальные исследования тепловых полей трансформаторов, анализ результатов, проектирование оптимальных по массе трансформаторов с использованием методов поисковой оптимизации.

Трансформаторы малой мощности (ТММ) находят широкое применение в энергетических устройствах. На их производство расходуется большое количество дорогостоящих активных материалов. Актуальность работы определяется все возрастающими требованиями к массогабаритным показателям изделий, в состав которых входят ТММ. При оптимизационном расчете актуальны вопросы повышения точности методов тепловых и электромагнитных расчетов ТММ. Существующие на сегодня методики дают погрешность в пределах 10-15%.

Данная работа является неотъемлемой частью научно-технических разработок, связанных с автоматизацией расчетного проектирования трансформаторно-реакторного оборудования для различных изделий и устройств. В настоящее время на кафедре «Электромеханика» Оренбургского государственного университета продолжается разработка данного направления научных работ под руководством доцента кафедры, к.т.н. А.М. Кутарева.

Известными способами снижения массы и габаритов ТММ являются:

- повышение их рабочей частоты;
- повышение точности методик проектирования;
- оптимальное проектирование.

Целью работы является улучшение технических показателей трансформаторов малой мощности промышленной и повышенной частоты путем разработки уточненных методик и алгоритмов с применением оптимизационных процедур, создания и внедрения программного обеспечения их автоматизированного проектирования.

Охлаждение трансформаторов является одной из проблем современной электромеха-

ники. Точность расчета на нагревание оказывает значительное влияние на их проектирование и эксплуатацию. Исследования теплового поля выполнялись на ЭВМ численным методом конечных разностей. В работе применялись также и экспериментальные методы исследования трансформаторов. За основу была взята ранее разработанная на кафедре «Электромеханика» ГОУ ОГУ математическая модель поля температур, недостатками которой являются положенные допущения:

- теплоотдача с нижних и верхних горизонтальных поверхностей магнитопровода (или каркаса-обмотки) определяется при одинаковых коэффициентах теплоотдачи;
- КТО с боковой поверхности обмотки и магнитопровода принимаются средними по высоте и не зависящими от координаты высоты обмотки.

Для оценки влияния принятых допущений произведено увеличение расчетного объема трансформатора до j общего объема. Расчетная область трудно поддается описанию в единой системе координат. Вся область расчета поля температуры ТММ разбита на две области – магнитопровод и катушку, которые можно рассматривать и описывать отдельно. Прямоугольные участки магнитопровода и катушки описываются в декартовой системе координат, а угловые – в цилиндрической системе координат. На расчетную область наносится сетка. Каждый узел сетки соответствует адресу трехмерного информационного массива. Линии сетки выходят за поверхности магнитопровода и катушки. Выбор размеров ячеек сетки производился таким образом, что после деформации прямоугольной призмы, описывающей катушку

ТММ, линии сетки в каркасе переходят в линии сетки обмотки, а в области зазора между магнитопроводом и катушкой происходит совмещение узлов двух сеток. Это позволяет учитывать в расчетах теплообмен между магнитопроводом и катушкой. При выборе количества линий сетки исходили из требуемой точности расчетов. Размеры ячеек сетки подбирались опытным путем, условием для которого служила сходимость итерационного процесса. Алгоритм расчета поля температур показан на рисунке 1.

В ходе расчетов поля температуры с помощью тепловых схем замещения, как правило, используют средние значения коэффициентов теплоотдачи (КТО). Методика определения средних значений КТО хорошо отработана [2, 3]. В расчетах трехмерного поля температуры ТММ численными методами есть возможность не только учитывать в процессе расчета влияние изменения температуры охлаждаемых поверхностей на КТО, но и изменение его по высоте вертикальных охлаждаемых поверхностей. В то же время методика определения локальных значений КТО при естественной конвекции отсутствует. Для определения локального значения КТО разработан подход расчета изменения его по высоте обмотки и создано программное обеспечение [4].

С целью оценки точности расчета теплового поля ТММ численным методом проведены опыты. В качестве экспериментальных образцов взяты трансформаторы, изготовленные на магнитопроводе ШЛ 25х40 на заводе ОАО «Инвертор» г. Оренбурга. Программой испытаний предусматривалось проведение опыта холостого хода, режима нагрузки, измерение сопротивлений обмоток постоянному току и измерение нагрева отдельных частей трансформатора. Испытание на нагрев трансформатора проводилось методом непосредственной нагрузки. Температура обмоток непосредственно не измерялась, а определялась косвенным методом по изменению сопротивления обмоток, измеренного перед включением трансформатора под нагрузку $R_{\bar{o}}$ и после отключения его от источника тока $R_{\bar{a}}$. Сопротивления обмоток определялись на ЭВМ графической экстра-

поляцией с помощью встроенных функций *Microsoft Excel*.

Произведены измерения значений абсолютных температур поверхности магнитопровода и катушки ТММ, а также определены распределения температуры по поверхности с использованием тепловизионных двухспектральных измерительных систем TRI-9400S и ThermaCAM TM PM 695.

С помощью созданного программного обеспечения выполнены расчеты температурных полей опытных образцов ТММ при $KTO = const$ и с расчетом локальных значений коэффициентов теплоотдачи.

Результаты расчета поля температуры на ЭВМ численным методом [5] для ТММ сопоставлены с полученными экспериментальными данными (рисунок 2). Отклонение средних температур обмоток (по расчету численным методом) от температур, рассчитанных из эксперимента по изменению сопротивлений из горячего в холодное состояния, не превысило 1%. Расчеты, в которых использовались локальные значения КТО для вертикальных поверхностей с корректировкой по температурам в узлах сетки и с учетом эффективности отдачи тепла с горизонтальных поверхностей, хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований температуры на поверхностях трансформаторов, полученными с помощью тепловизионной аппаратуры.

Исходя из полученных результатов, рекомендуется при автоматизированном проектировании ТММ в расчетах характеристик поля температуры задаваться постоянным значением КТО, корректируя его в ходе расчета по температуре в узлах сетки и размерам поверхностей охлаждения, что связано с экономией машинного времени. При проектировании оптимальных по массе активных материалов трансформаторов, работающих на повышенных частотах питающего напряжения, по окончании процедуры оптимизационного расчета за ней следует процедура поверочного расчета, по завершении которой имеет смысл выполнить проверку теплового поля спроектированного трансформатора при локальных КТО с корректировкой по температуре в узлах сетки.

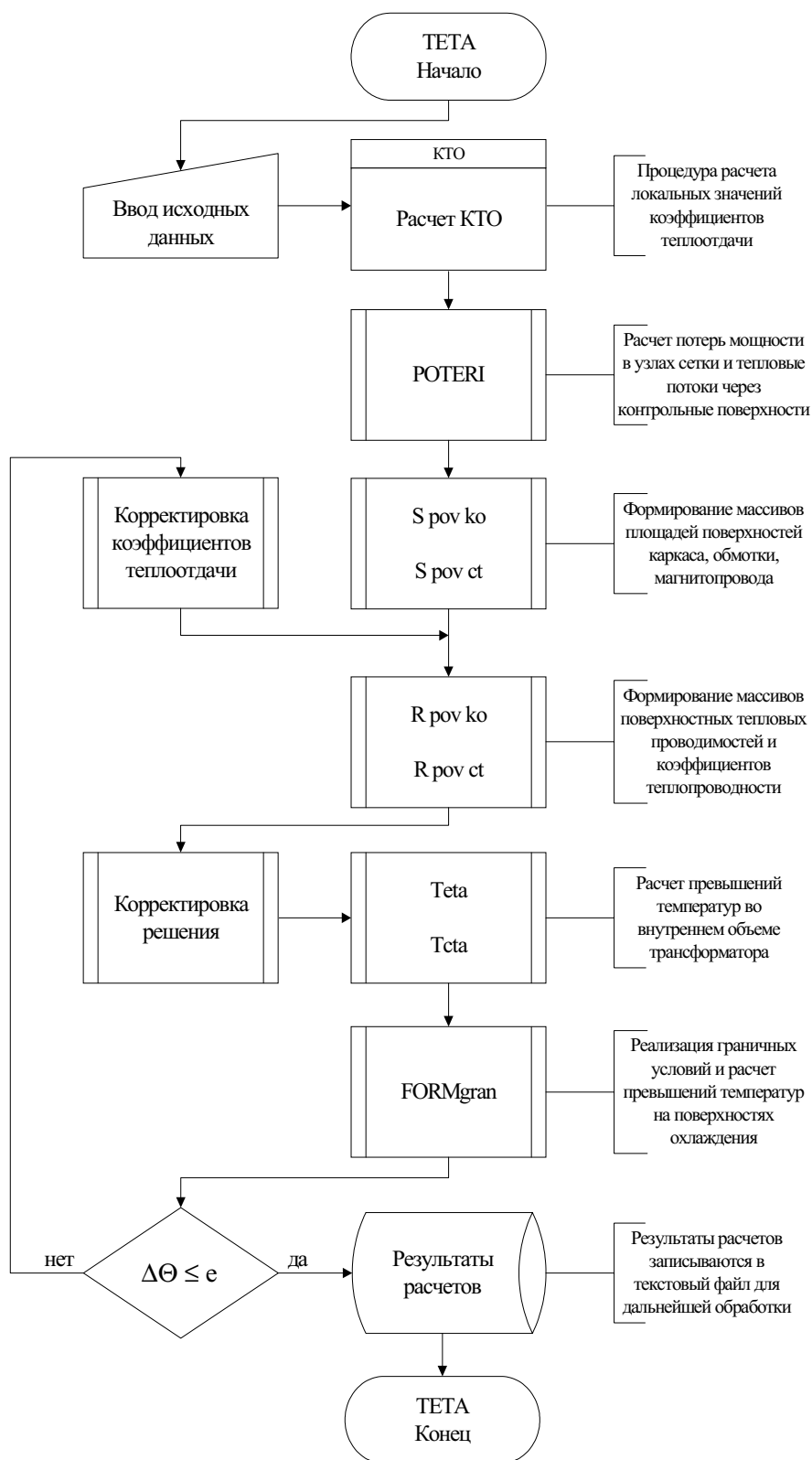


Рисунок 1. Алгоритм расчета поля температур

На кафедре «Электромеханика» ОГУ создано программное обеспечение для проектирования оптимальных по массе трансформаторов малой мощности. Основой послужила математическая модель, где массы активных материалов трансформатора сводятся к минимально возможным значениям при условии, что перегрев стали и обмоток не превышает допустимых значений, которые определяются классом нагревостойкости материала [6].

Произведены расчеты по программе, основанной на методе Бокса (метод условной оптимизации), оптимальных по массе трансформаторов полной потребляемой мощностью от 50 до 500 ВА для частот до 5 кГц при заданной ширине ленты от 16 до 64 мм (коэффициенты теплоотдачи в ходе расчета корректируются при изменении размеров поверхностей охлаждения). С увеличением частоты питающего напряжения значение целевой функции, т. е. масса трансформатора, значительно снижается. Снижение массы оптимальных трансформаторов по отношению к массе трансформаторов, выполненных на стандартном магнитопроводе, достигает до 15-20% на

повышенных частотах. Для промышленных частот масса «стандартного» трансформатора оказывается близкой к оптимальной.

Установлено, что масса активных материалов трансформатора зависит от выбранной ширины ленты. Определено, что оптимальная ширина ленты магнитопровода не зависит от частоты питающего напряжения для трансформаторов одной мощности. Результаты расчетов показали – с ростом мощности увеличивается «оптимальная» ширина ленты магнитопровода. При проектировании трансформаторов минимальной массы рекомендуется рассчитывать ширину ленты A в зависимости от требуемой расчетной мощности S_p (в Вт) по выведенному уравнению, мм:

$$A(S_p) = 0,1915 \cdot S_p + 17,111 \quad (1)$$

На повышенных частотах питающего напряжения при оптимальной геометрии трансформаторов наблюдается увеличение ширины окна магнитопровода и уменьшение его высоты по сравнению с размерами окна стандартного магнитопровода. Для промышленных частот оптимальные размеры магнитопровода трансформатора оказыва-

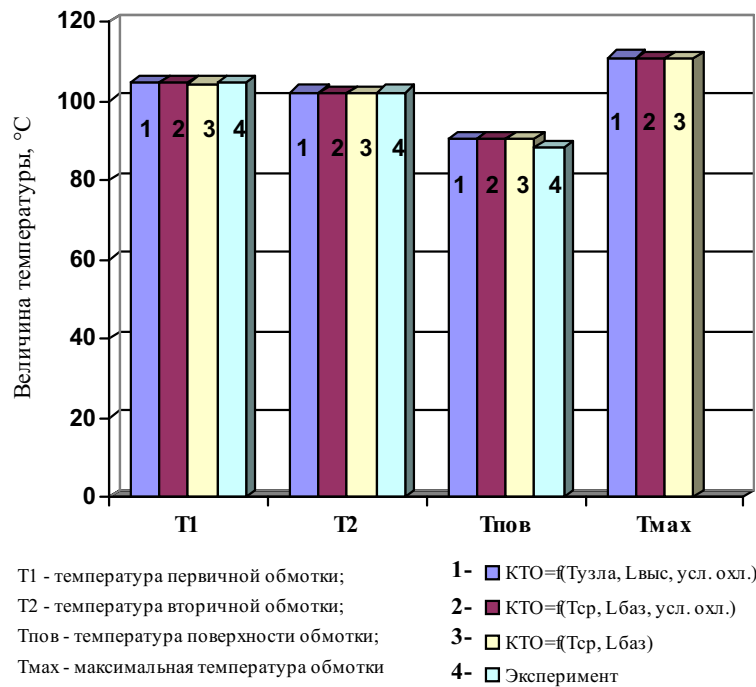


Рисунок 2. Анализ результатов

ются близкими к размерам стандартного ряда [7].

Установлено, что частота питающего напряжения для диапазона от 800 до 5000 Гц незначительно влияет на изменение относительных размеров магнитопровода трансформатора. При проектировании трансфор-

матора, оптимального по массе, или построении новых рядов сердечников представляется возможным задаваться шириной ленты магнитопровода по формуле 1; размеры окна магнитопровода и толщину навивки – определять, исходя из найденной ширины ленты и заданной мощности трансформатора.

Список использованной литературы:

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. Л., 1961.
2. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин, пер. с нем. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961.
3. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах.-М.: Госэнергоиздат, 1969.
4. Кутарев А.М., Патлахов В.Е. К определению коэффициентов теплоотдачи с поверхностей охлаждения трансформаторов малой мощности // Региональная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов Оренбуржья.- Оренбург, Издательство ОГУ, 2000. – С. 68-69.
5. Кутарев А.М., Патлахов В.Е. Математическая модель и алгоритм расчета трехмерного стационарного поля температур трансформатора малой мощности методом конечных разностей. // Всероссийская научно-практическая конференция «Социокультурная динамика региона» (наука, культура, образование), часть II. – Оренбург, Издательство ОГУ, 2000. – С. 89-95.
6. Кутарев А.М., Патлахов В.Е. Проектирование трансформаторов малой мощности с применением методов поисковой оптимизации. // Учебная, научно-производственная и инновационная деятельность высшей школы в современных условиях (материалы международной научно-практической конференции). Направление 2 – Научно-производственная и инновационная деятельность высшей школы в современных условиях. – Оренбург: ОГУ, 2001. – С. 219-220.
7. Макарова А.В. Оптимальные соотношения размеров трансформаторов с магнитопроводом прямоугольного сечения // Электротехника.-1988, №7, с. 2-6.