

Л. И. САХНО, д-р техн. наук, **О. И. САХНО**, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет
С. Д. ДУБИЦКИЙ, инж.
ООО "Тор", г. Санкт-Петербург
В. В. ВАЛЬКОВ, инж., **Р. Г. ЗАРЫВАЕВ**, инж.
ЗАО "Псковэлектросвар", г. Псков
E-mail: lsahno2010@yandex.ru

Использование метода конечных элементов для комплексного расчета трансформаторов машин контактной сварки

Рассматривается методика электромагнитного и теплового расчета трансформатора для машины контактной сварки. Существующая методика расчета таких трансформаторов основана на принципах расчета обычных силовых трансформаторов, а особенности, присущие машинам контактной сварки, учтены в форме эмпирических поправок. Предлагается дополнить существующую методику алгоритмами численного моделирования электромагнитного и температурного поля. На примере трансформатора для крупной машины контактной стыковой сварки показано вычисление импеданса короткого замыкания, выполнен температурный анализ в повторно-кратковременном режиме. Обсуждаются методические вопросы численного моделирования и степень совпадения результатов моделирования и классического расчета.

The electromagnetic and thermal calculation methodology of the transformer for resistance-welding machines is considered. The existing calculation methodology of such transformers is based on the calculation principles for ordinary power transformers and features inherent resistance-welding machines, are taken into account in the form of empirical data corrections. It is proposed to supplement the existing methodology with numerical simulation algorithms of electromagnetic and temperature fields. The calculation of the short-circuit impedance and thermal analysis in iteratively short-time mode are shown as an example of a transformer for large resistance-welding machine. Methodical questions of numerical simulation and the coincidence degree of the modeling and classical calculation results are discussed.

Ключевые слова: контактная сварка, трансформатор, температурное и электромагнитное поле, импеданс короткого замыкания, метод конечных элементов

Key words: resistance-welding, transformer, temperature and electromagnetic field, the impedance of the short circuit, the finite element method

Для расчета трансформаторов машин контактной сварки используются методы, изложенные в классических учебниках по трансформаторам [1]. Они дополнены некоторыми эмпирическими коэффициентами, полученными на основе экспериментальных данных для конкретных конструкций, и обобщены в ряде работ [2]. Наличие эмпирических коэффициентов в известных методиках ограничивает область их применения характерными частными случаями. На базе классических методов разработаны специальные методики расчета для трансформаторов конденсаторных машин, низкочастотных машин, для сварки импульсом постоянного тока, машин постоянного тока, многоэлектродных машин [3], инверторных машин контактной сварки [4]. В указан-

ных методиках используются аналитические методы расчета, основанные на ряде допущений. Например, при электромагнитных расчетах токи в параллельно соединенных секциях предполагаются одинаковыми, поверхностный эффект в обмотках трансформаторов с частотой 50 Гц считается слабым, магнитное поле в магнитопроводе под нагрузкой не отличается от поля при холостом ходе. К настоящему времени возможности улучшения методик расчета на базе аналитических методов анализа электромагнитных, тепловых и механических явлений в трансформаторах машин контактной сварки (МКС) практически исчерпаны.

Новый импульс для развития методик расчета дают программы численного моделирования

электромагнитного поля, использующие, как правило, метод конечных элементов. Привлечение численных методов расчета полей дает возможность учесть реальные геометрические размеры обмоток в окне магнитопровода, сильное проявление поверхностного эффекта в обмотках, неравномерность распределения токов между параллельно соединенными частями обмоток, влияние нагрузки на магнитное поле в магнитопроводе, влияние насыщения магнитопровода на эффективность работы трансформатора. Необходимость учитывать эти явления особенно остро проявляется при проектировании инверторных машин, частота в которых доходит до десятков килогерц.

Применение методов численного расчета поля не сводится только к электромагнитным процессам. Важным этапом проектирования эскизного и рабочего проектирования трансформатора является оценка его теплового состояния, в установившихся, переходных и повторно-кратковременных режимах. При разработке нестандартных высоконагруженных изделий расчет температурного поля оказывается единственным надежным средством прогнозирования термической надежности. Кроме того, для некоторых типов трансформаторов важное значение имеет оценка механической прочности элементов конструкции под действием нагрузок, вызванных электромагнитными силами и термическими деформациями. Поэтому полноценный расчетный анализ трансформатора методами численного моделирования имеет мультидисциплинарный характер, учитывающий взаимодействие процессов разной физической природы.

Целью статьи является демонстрация возможности и полезности применения численного моделирования поля к расчету трансформаторов МКС и обсуждение возникающих при этом методических проблем. В качестве инструмента выбрана программа ELCUT [5, 6] отечественной разработки. ELCUT представляет собой развитую современную среду конечно-элементного моделирования в интересах научных исследований, проектирования электротехнического и электрофизического оборудования и для обучения студентов. Возможности ELCUT позволяют рассчитывать двумерные электромагнитные, тепловые и механические поля, а также трехмерное электростатическое поле. В статье приводятся основ-

ные уравнения электромагнитного, теплового и механического полей трансформатора и пример расчета параметров трансформатора КСМ-01. Трансформаторы этого типа входят в комплексы для сварки морских магистральных газопроводов, выпускаемых ЗАО "Псковэлектросвар" [8]. Этот трансформатор хорошо поддается аналитическому расчету, что позволяет верифицировать результаты численного моделирования.

В качестве первоочередных задач для полевого моделирования выбраны задачи вычисления импеданса короткого замыкания $Z_{кз}$, и оценки теплового состояния трансформатора при повторно-кратковременной нагрузке.

1. Электромагнитный расчет

Полную информацию о картине электромагнитного поля в трансформаторе дает трехмерный анализ электромагнитного поля. Ввиду высокой требовательности к вычислительным ресурсам, дороговизне и сложности освоения программного обеспечения, трехмерный электромагнитный анализ пока не стал рутинной инженерной практикой, несмотря на то, что в исследовательской работе и при проведении уточненных поверочных расчетов он вполне осуществим и желателен. С другой стороны, благодаря доступности и простоте современных программных инструментов двумерного анализа [5, 6], этот метод может быть использован в ежедневной инженерной расчетной практике, в том числе и для оптимизационных расчетов.

Двумерное моделирование электромагнитного поля для целей данной статьи состоит в решении уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = j\omega\gamma A + i_{\text{стор}}, \quad (1)$$

записанного относительно комплексного векторного магнитного потенциала, который в двумерной постановке имеет единственную ненулевую координатную компоненту. Остальные переменные в (1) имеют следующий смысл: μ — абсолютная магнитная проницаемость (может зависеть от индукции магнитного поля для приближенного учета эффекта насыщения ферромагнитных элементов); γ — удельная электропроводность; ω — циклическая частота питающей сети; j — мнимая единица; $i_{\text{стор}}$ — плотность сторонних токов, вызванных приложенным напряжением.

Во многих случаях уравнения электромагнитного поля необходимо решать совместно с уравнениями присоединенной электрической цепи. Закон Ома для ветви цепи, содержащей массивный проводник, помещенный в магнитное поле, имеет вид:

$$I = \frac{U}{R} - \gamma \int_S j\omega A ds, \quad (2)$$

где U — разность потенциалов на концах массивного проводника; R — омическое сопротивление на постоянном токе; S — площадь поперечного сечения проводника.

В (2) плотность тока в сечении каждого проводника является суммой потенциального и вихревого слагаемых. Потенциальная часть $i_{\text{стор}} = U/(RS)$ одинакова по всему сечению, в то время как второе слагаемое — плотность вихревого тока — имеет в каждой точке сечения разную величину и фазу. Если, как в нашей задаче расчета импеданса, заданным источником поля является полный ток в проводнике, он автоматически подбирается путем итераций, на каждой из которых задается некоторое значение плотности стороннего тока и вычисляется следующее приближение, с учетом как индуцированных вихревых токов, так и цепной схемы соединений.

Результатом электромагнитного расчета являются локальные и интегральные значения характеристик электромагнитного поля трансформатора. По картине электромагнитного поля вычисляются параметры выбранной эквивалентной схемы, в частности активное и реактивное сопротивление короткого замыкания, а также ток и потери холостого хода, основные и добавочные потери под нагрузкой и пр.

1.1. Расчет импеданса короткого замыкания трансформатора КСМ-01

Трансформатор КСМ-01 создан заводом "Псковэлектросвар" и используется в составе машины контактной стыковой сварки морских трубопроводов большого диаметра.

Конструкции обмоток и магнитопровода трансформатора показаны на рис. 1. Первичная обмотка содержит 56 витков и состоит из 8-ми дисковых катушек, включенных последовательно. Катушки намотаны проводом ПСДКТ-Л прямоугольного сечения $4,0 \times 11,2$ мм. Изоляция провода выполнена двойной стекловолоконной намоткой с пропиткой термостойким кремний-органическим лаком.

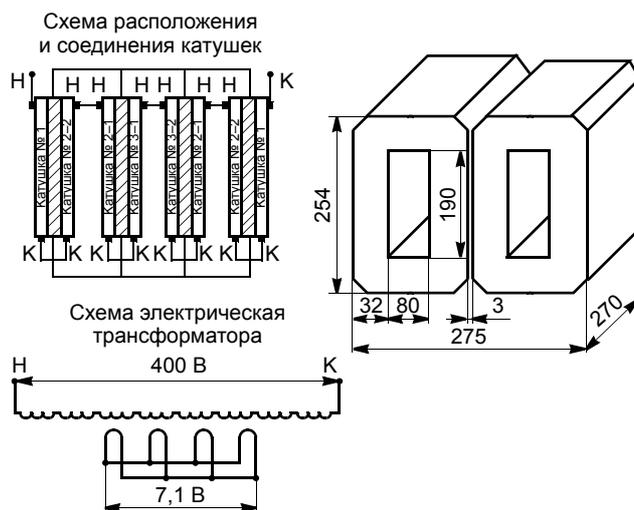


Рис. 1. Конструктивная схема сварочного трансформатора

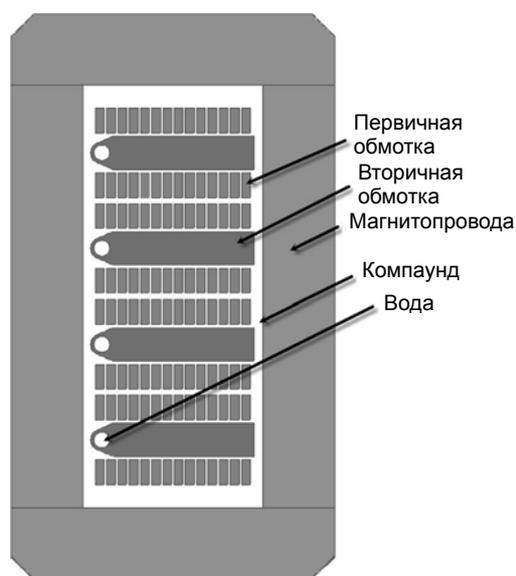


Рис. 2. Расположение обмоток

Температурный индекс провода ПСДКТ-Л составляет 200°C .

Вторичная обмотка содержит один виток, образованный 4-мя параллельно соединенными сплошными дисковыми катушками. Диски размещены между секциями первичной обмотки, как показано на рис. 2.

1.1.1. Численная модель импеданса короткого замыкания

Для оценки импеданса КЗ использовано численное моделирование опыта противовключения. Поскольку в опыте противовключения сердечник трансформатора не насыщен, задача имеет линейный характер, и мы вправе выбрать любое

удобное значение тока I_1 в соотношении (2). Выберем амплитудное значение тока первичной обмотки $I_1 = 100$ А, тогда МДС каждой из обмоток составит $I_1 w_1 = 5600$ Ампер-витков. Картина поля в режиме противовключения.

Индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке и отнесенная к единице ее длины, определяется по формуле

$$L_{кз} = \frac{2W_M}{I_1^2}, \quad (3)$$

где W_M — энергия магнитного поля; I_1 — действующее значение первичного тока.

По результатам расчета поля получена энергия магнитного поля на единицу длины модели $W_M = 0,13$ Дж/м. Индуктивность рассеяния по (3) с учетом средней длины обмоток $l_{cp} = 0,979$ м составляет $L_{кз} = 0,0166$ мкГн. Активное сопротивление обмоток на единицу длины модели вычисляется через мощность омических потерь. Омические потери в первичной обмотке $P_1 = 61$ Вт, а во вторичной обмотке $P_2 = 72,5$ Вт. Активные сопротивления обмоток:

$$r_1 = \frac{P_1}{I_1^2} = 0,0122 \text{ Ом/м}; \quad r_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = 4,6 \text{ мкОм/м},$$

где I_2 — действующее значение тока во вторичной обмотке.

Активные сопротивления обмоток с учетом средней длины витка составляют $r_1 = 0,012$ Ом, $r_2 = 4,5$ мкОм.

Коэффициент увеличения сопротивления первичной обмотки при 50 Гц по сравнению с сопротивлением при постоянном токе составляет 1,09, вторичной 1,03. В результате получаем импеданс короткого замыкания на частоте 50 Гц, приведенный к вторичной обмотке:

$$z_{кз} = r_{кз} + jx_{кз} = 8,3 + j \cdot 5 \text{ мкОм}.$$

1.1.2. Аналитический расчет импеданса короткого замыкания

В [2] рекомендуется найти активные сопротивления обмоток при постоянном токе и умножить его на соответствующий коэффициент поверхностного эффекта.

$$r_i = \frac{w_i l_{cp}}{\gamma s_i}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2$; w_i — количество витков обмотки; s_i — площадь поперечного сечения обмотки;

$\gamma = 56 \cdot 10^6$ 1/(Ом · м) — удельная электрическая проводимость меди.

Активное сопротивление первичной обмотки составляет 0,011 Ом, вторичной 4,5 мкОм. Коэффициенты поверхностного эффекта этих обмоток, рассчитанные по [2], не превышают 1 %, следовательно, активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке 8 мкОм. Это значение отличается от численного расчета приблизительно на 3 %.

Формула для расчета индуктивности рассеяния трансформатора с чередующимися обмотками, приведенной к первичной обмотке, дана во многих книгах по расчету трансформаторов [1]:

$$L_{кз} = \frac{\mu_0 l_{cp} W_1^2}{n l_{\sigma}} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right), \quad (5)$$

где a_{12} — расстояние между дисками, a_1, a_2 — толщины дисков первичной и вторичной обмоток.

Основное допущение, заложенное в этой формуле, состоит в том, что линии магнитного поля — это прямые, перпендикулярные магнитопроводу. Индуктивность трансформатора КСМ-01 по формуле (5) составляет:

$$L_{кз} = 47 \text{ мкГн}.$$

Индуктивность рассеяния и индуктивное сопротивление рассеяния, приведенные к вторичной обмотке:

$$L_{кз} = \frac{L'_{\sigma 12}}{k_{тр}^2} = 0,015 \text{ мкГн},$$

$$x_{кз} = 314 \cdot 0,015 = 4,71 \text{ мкОм}.$$

Расхождение численного и аналитического расчета индуктивного сопротивления не превышает 6 %, поскольку линии магнитного поля в окне магнитопровода близки к прямым.

2. Тепловой расчет

Тепловой расчет трансформатора использует в качестве исходных данных полученное в ходе электромагнитного анализа распределение потерь по сечению трансформатора и известные условия теплоотдачи с поверхности. Решается дифференциальное уравнение теплопроводности, которое описывает перенос тепла внутри тела:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где T — температура; λ — теплопроводность; c и ρ — плотность и удельная теплоемкость материала, учитываемые при нестационарном расчете.

Результатом решения уравнения (6) является точное знание температурного поля во всех элементах трансформатора в зависимости от времени. Для того чтобы решить уравнение (6), надо знать геометрическую форму системы тел и краевые условия. Краевые условия состоят из начальных и граничных условий.

Учитывая повторно-кратковременный режим работы трансформатора, после окончания фазы включения моделируется процесс остывания заданной продолжительности. Это позволяет не только оценить тепловое состояние трансформатора при различных циклах нагрузки в среднем, но и указать места локальных перегревов и максимальные значения температуры в них.

2.1. Оценка параметров конвекции

Исходными данными для расчета являются плотность мощности тепловых потерь, распределение которых берется из электромагнитного расчета при номинальных значениях токов в обмотках, и условия охлаждения трансформатора. Трансформатор КСМ-01 охлаждается путем естественной конвекции с внешней поверхности, а также непосредственным водяным охлаждением вторичной обмотки. Конвективный теплообмен в уравнении (6) учитывается граничным условием конвекции:

$$F_{\text{п}} = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение	Наименование
Определяющий размер	$L_{\text{ст}}$	0,27	м
Температурный коэффициент плотности	$\beta_{\text{возд}}$	0,003663	$1/^\circ\text{C}$
Температура воздуха	$T_{\text{возд}}$	30	$^\circ\text{C}$
Ожидаемая температура стенки	$T_{\text{стен}}$	90	$^\circ\text{C}$
Определяющая температура	T_0	60	$^\circ\text{C}$
Кинематическая вязкость воздуха при T_0	ν_0	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$(\text{м}^2/\text{с})$
Плотность воздуха	$\rho_{\text{в}}$	1,067	$(\text{кг}/\text{м}^3)$
Теплоемкость воздуха	$C_{\text{рв}}$	1009	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
Теплопроводность воздуха	$\lambda_{\text{в}}$	0,0285	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
Число Грасгофа	Gr	$1,188 \cdot 10^8$	
Число Прандтля	Pr	0,709	
Число Рейли	Ra	$8,423 \cdot 10^7$	

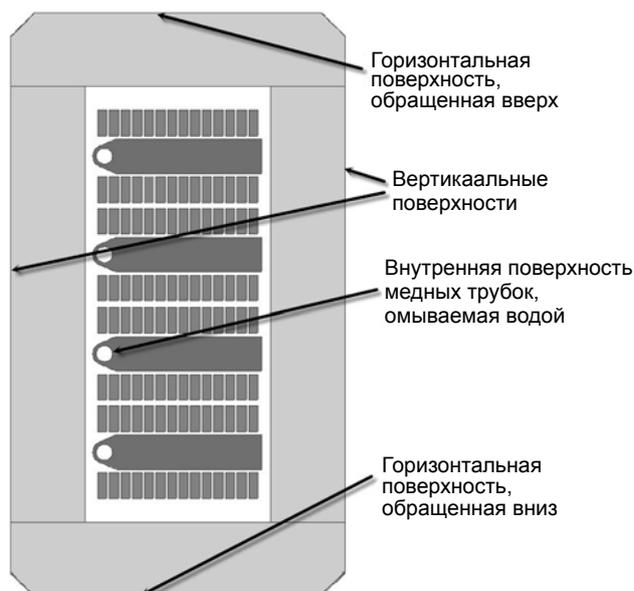


Рис. 3. Поверхности конвективного теплообмена

где $F_{\text{п}}$ — плотность теплового потока, нормального к границе; α — коэффициент конвективного теплообмена; T , T_0 — температура тела близ поверхности и омывающей среды соответственно.

Наибольшую трудность представляет правильный выбор коэффициента конвективного теплообмена. Ниже дается методика расчета коэффициентов конвективного теплообмена для рассматриваемого трансформатора.

Как видно из рис. 3, поверхности, с которых осуществляется конвективный теплообмен, можно разбить на 4 группы:

1. Горизонтальная поверхность, обращенная вверх;
2. Вертикальная и наклонные плоскости;
3. Горизонтальная плоскость, обращенная вниз;
4. Внутренняя поверхность медных трубок, омываемых принудительным потоком воды.

Для вычисления коэффициентов свободной конвекции в окружающий воздух (поверхности 1, 2, 3) исходные данные приведены в табл. 1.

Для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, используем формулу

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{0,25} = 51,73,$$

что соответствует коэффициенту теплообмена $\alpha = Nu \cdot \lambda / L_{\text{ст}} = 5,46 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для вертикальной поверхности используем формулу:

$$Nu = 0,13 \cdot Ra^{0,33} = 53,62,$$

что соответствует коэффициенту теплообмена $\alpha = 5,66 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

для горизонтальной поверхности, обращенной вниз, используем формулу (12а)

$$Nu = 0,27 \cdot Ra^{0,25} = 25,87,$$

что соответствует коэффициенту теплообмена $\alpha = 2,73 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Вычисление коэффициента вынужденной конвекции с внутренней поверхности трубы опирается на исходные данные (табл. 2).

Прежде всего, необходимо определить характер течения жидкости в трубе, чтобы выбрать подходящую критериальную формулу. Вычислим значение критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{wd}{\nu} = 2615.$$

Это значение не превосходит характеристической границы $Re = 2300$ между ламинарным и переходным режимами. Следовательно, режим течения воды следует считать, скорее, ламинарным.

Тогда, используя эмпирическое критериальное соотношение, получаем:

$$Nu_{lam} = 0,33 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} = 42,$$

что соответствует коэффициенту теплоотдачи $\alpha = 3420 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2.2. Нагрев из холодного состояния при включенной нагрузке

Проведем нестационарный тепловой расчет с начальной температурой $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Предположим, что трансформатор включается на номинальную сварочную нагрузку $I_2 = 20 \text{ кА}$ в момент времени $t = 0$.

Расчет показывает, что период времени $t = 18...20 \text{ мин}$ достаточен для достижения установившегося распределения температур.

Таблица 2

Внутренний диаметр трубы	d_1	7,0 мм
Толщина стенки трубы	Δ	1,5 мм
Длина трубы = длина витка \times число витков	L	4 м
Материал трубы		красная медь
Коэффициентом теплопроводности	λ	378 Вт/(м \cdot К)
Средняя скорость воды в трубе	w	0,3 м/с
Средняя температура воды в трубе	$T_{ж}$	20 $^\circ\text{C}$
Примерная температура стенки трубы	T_c	35 $^\circ\text{C}$

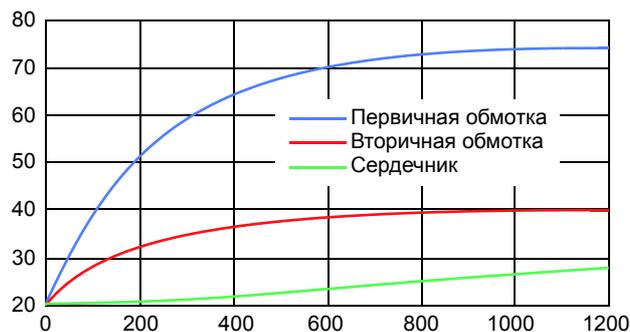


Рис. 4. Временной ход температуры при длительной номинальной нагрузке

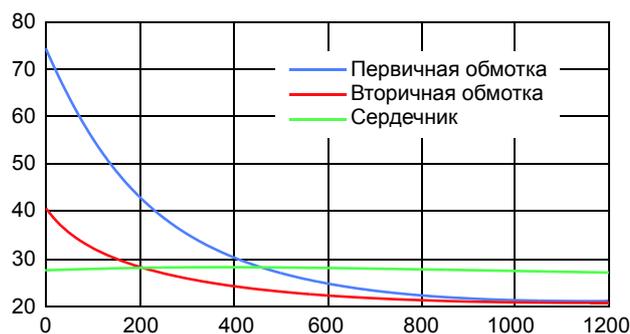


Рис. 5. Остывание трансформатора после длительной работы на номинальную нагрузку

Установлено, что наиболее нагретой зоной является первичная обмотка и компаунд вокруг нее, а именно витки, расположенные в центральной зоне. Температура в зоне первичной обмотки достигает $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Охлаждаемая водой вторичная обмотка в среднем на $35...40 \text{ }^\circ\text{C}$ холоднее.

Временной ход температуры при нагреве показан на рис. 4.

На графике рис. 4 синяя кривая соответствует температуре первичной обмотки, красная кривая — вторичной обмотке и синяя линия — температуре сердечника. Эти результаты хорошо согласуются с результатами испытаний трансформатора.

Рассмотрим остывание из нагретого состояния при выключенной нагрузке. В качестве начального состояния примем режим установившегося нагрева при длительной работе с номинальным сварочным током, т. е. конечное состояние режима, описанного в предыдущем разделе. Предположим, что водяное охлаждение вторичной обмотки продолжает действовать в обычном режиме и после отключения нагрузки.

Температурный ход характерных точек активной зоны трансформатора показан на рис. 5. Как и

следовало ожидать, быстрее всего остывает охлаждаемая водой вторичная обмотка (красная кривая). Чуть медленнее остывает первичная обмотка (синяя кривая). Наиболее инерционным в тепловом отношении является стальной сердечник (зеленая кривая), температура которого за 20 минут меняется мало.

2.3. Нагревание при повторно-кратковременном режиме работы

По техническим условиям трансформатор КСМ-01 работает в повторно-кратковременном режиме. Полный цикл (период) составляет $T = 20$ мин, в том числе интервал нагрузки $T_{\text{нагр}} = 2$ мин, и период охлаждения $T_{\text{охл}} = 18$ мин. Технически расчет каждого периода выполняется в два этапа: нагревание и охлаждение. Разница между ними состоит в уровне тепловой нагрузки, вычисляемой в ходе электромагнитного расчета. Начальным условием каждого следующего расчетного этапа является температурное состояние, вычисленное в конце предыдущего этапа.

Результаты расчета теплового режима трансформатора КСМ-01 хорошо согласуются с результатами испытаний.

3. ВЫВОДЫ

В статье продемонстрирована методика расчета основных параметров трансформатора машины контактной сварки.

Основное внимание уделено методической стороне мультифизического моделирования полей методом конечных элементов. Такое моделирование требует привлечения современной программы конечно-элементного анализа, например ELCUT [5, 6]. Показано, что несмотря на то, что электромагнитное поле в трансформаторе имеет трехмерный характер, в практически важных задачах можно с успехом использовать двумерное моделирование.

Полевая методика использует стандартные дифференциальные уравнения электромагнитного, теплового поля и уравнение плоско-напряженного состояния с минимумом дополнительных предположений и допущений. Уравнение переменного электромагнитного поля решается совместно с уравнениями присоединенной электрической цепи, что позволяет формулировать задачу в напряжениях и учитывать ряд важных

эффектов, таких как импеданс концевых зон, шин токоподводов и т. п.

Проведено сопоставление полевого подхода с классической методикой расчета. Выявлено хорошее совпадение обоих подходов при условии соблюдения допущений, заложенных в основу инженерной методики. Вместе с тем показано, что применение полевого мультифизического моделирования позволяет с практической точностью оценить тепловое при произвольной нагрузке, в том числе в импульсных, циклических и аварийных режимах работы.

Практическое применение разработанной методики возможно в проектных организациях после обучения специалистов. Более того, трудоемкость расчетов может быть существенно снижена путем разработки специализированной программы-надстройки к конечно-элементной программе общего назначения. Программа ELCUT содержит необходимый для такой разработки развитый программный интерфейс AcctiveField.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Изд. третье. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
2. Рыськова З. А., Федоров П. Л., Жимерова В. И. Трансформаторы для контактной сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 423 с.
3. Смирнов В. В. Оборудование для контактной сварки: Справочное пособие. СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2000. 848 с.
4. Сахно Л. И., Сахно О. И., Лихачев Д. И. Инженерный метод расчета критической толщины дисков обмоток трансформаторов машин контактной сварки // Сварочное производство. 2010. № 1. С. 17—18.
5. ELCUT — Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. Программа ELCUT [Официальный сайт] URL: http://elcut.ru/free_doc_r.htm (дата обращения 15.01.2015)
6. Дубилкий С. Д. Elcut 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. 2004. № 1. С. 14—20.
7. ГОСТ 16110—82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.
8. Хоменко В. И., Теренин А. Н., Кучук-Яценко С. И., Швец Ю. В. Контактная стыковая сварка оплавлением современных трубопроводов большой мощности // Журнал нефтегазового строительства. 2014. № 3. С. 52—58.
9. Журавлев С. И. Пути решения проблем внедрения контактной стыковой сварки оплавлением на магистральных трубопроводах больших диаметров (обзор) // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 64—71.
10. Лукин М. А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России // Вестник Псковского государственного университета. Серия Экономические и технические науки. 2014. № 4. С. 36—41.