

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе приведен обзор аналитико-эмпирических методов расчета потерь и нагревов элементов конструкции силового трансформаторного оборудования с масляным охлаждением, указаны основные упрощающие допущения. Представлены методические подходы, разработанные практические процедуры и опыт уточненных численных исследований с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS.

Ключевые слова: трансформаторы, элементы конструкции, электромагнитные и тепловые расчеты, ANSYS

ВВЕДЕНИЕ

Задача уточненных взаимосвязанных расчетов потерь и нагрева элементов конструкции (ЭК) является актуальной для современных силовых трансформаторов и электрических реакторов с повышенными удельными электромагнитными нагрузками. Ее решение сложно в силу сопряженной зависимости от температуры электрической проводимости материалов, определяющей вихревые токи и потери.

Практика инженерных расчетов показывает, что решение этой задачи допустимо разделить на две последовательные процедуры расчета с итерационным уточнением проводимостей, потерь и нагревов. Традиционно при расчетном проектировании трансформаторного оборудования максимально применяются аналитико-эмпирические методы, обобщенно представленные, в частности, в книгах [1-6]. Большинство из них основано на ряде упрощающих допущений. Поэтому достоверность практических расчетов обеспечивается возможным использованием эмпирических данных. Такие методы входят, в частности, в состав программно-методических комплексов промышленной системы САПР ТЭР [7], применяемой на ПАО «Запорожтрансформатор». Повышение точности расчетов в настоящее время возможно путем численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов с применением современных развитых инвариантных систем конечно-элементного анализа (КЭА), в частности, ANSYS [8]. К примеру, комплексный численный анализ трехмерных электромагнитных и тепловых моделей трансформаторов приведен в публикации [9].

Целью настоящей работы является представление основных подходов, разработанных практических процедур и опыта численных исследований потерь и нагревов ЭК в трансформаторном оборудовании с масляным охлаждением с применением системы КЭА ANSYS.

Аналитико-эмпирические методы расчетов. Приведем краткое описание практически применяемых при расчетном проектировании [7] аналитико-эмпирических

методов расчета потерь и нагревов ЭК и основных упрощающих допущений, которые приняты при разработке соответствующих методов.

Расчет электромагнитного поля. Основой для расчетов потерь в ЭК является расчет электромагнитного поля. В [7] используются аналитические и численно-аналитические методы, основанные на упрощении геометрии и задания параметров расчетных моделей. Применяются известные модели обмоток в виде плоских шин, цилиндрических моделей обмоток в ферромагнитных туннелях и на бесконечных стержнях [2-4, 6, 10]. При использовании метода вторичных источников ферромагнитные детали конструкции трансформаторов и реакторов упрощенно заменяются дискретными телами с конечной магнитной проницаемостью [2, 10]. Суперпозицией полей отдельных стержней и участков отводов определяется квазитрехмерное магнитное поле трансформаторов и реакторов в области обмоток, на ярмовых балках из немагнитной стали [11] и на поверхности баков [12].

Добавочные потери и нагревы ЭК. Аналитические процедуры, применяемые в [7], позволяют провести упрощенные оценки потерь и нагревов в следующих ЭК трансформаторов и реакторов.

Прессующие (подъемные) пластины (ПП) из немагнитной стали на стержнях МС. Используются решения [13] двумерной краевой задачи относительно вихревых токов в тонкой прямоугольной полосе из немагнитной стали в зоне продольных вырезов ПП, а для расчета нагревов – трехмерной задачи при заданных коэффициентах теплоотдачи (КТО) с поверхностями ПП [14]. Методики доведены до инженерных расчетов с применением номограмм, которые получены для ряда упрощенных типов эпюр воздействующего магнитного поля (треугольник, трапеция, синусоида). Произвольное распределение внешнего поля по высоте ПП для расчета потерь учтено в [15], нагревов – в [16]. Подобным образом определяются вихревые токи, потери и нагревы в проводящих листах электростатических экранов на стержнях МС реакторов.

ПП из ферромагнитной стали. В силу редкого применения ПП из ферромагнитной стали данный вопрос в [7] не рассматривается. Упрощенный анализ представлен, в частности, в [4].

Крайние пакеты МС. Расчет распределения вихревых токов, потерь от внешнего магнитного поля обмоток, оценка нагревов проводится с использованием также модели проводящей полосы [13, 14, 16]. При этом ее эквивалентная толщина определяется по эмпирической зависимости глубины проникновения магнитного поля по нормали к плоскости листов электротехнической стали. Дополнительно учитываются потери от основного магнитного потока в МС.

Прессующие кольца. Расчет разрезных ферромагнитных колец основан на эмпирических и теоретических исследованиях потерь в ферромагнитных тороидах от «настила» магнитного потока [3].

Для расчета потерь в кольцах из немагнитной стали используется упрощенная аналитическая методика, которая рассматривает кольцо как часть бесконечной тонкой проводящей пластины. Более точная модель кольца с учетом вытеснения и обратного влияния вихревых токов на внешнее магнитное поле обмоток рассмотрена в [17] с применением метода интегральных уравнений. Методом КЭА проводится расчет нагрева кольца при заданных КТО с поверхностями кольца [18].

Ярмовые балки из немагнитной стали. Расчетная модель [11] определяет вихревые токи от трехмерного магнитного поля обмоток в системе тонких проводящих пластин, которые соответствуют упрощенным формам горизонтальных полок и вертикальной стенки балки. Расчет предусматривает также упрощенную оценку нагревов по локальным значениям потерь.

Ярмовые балки с частями из ферромагнитной стали. В ряде конструкций ярмовые балки выполняются полностью из ферромагнитной стали или как составные, в которых полки немагнитные, а стенки ферромагнитные. Упрощенные оценки максимальных потерь и нагревов в полках выполняются в [7] – как в тонких немагнитных пластинах [11], в ферромагнитных стенках – по «настилу» магнитного потока [3].

Баки из ферромагнитной стали. Расчетная методика [12] основана на определении касательной составляющей напряженности квазитрехмерного магнитного поля и поверхностных потерь в баках трансформаторов и реакторов с использованием комплексной эквивалентной магнитной проницаемости для ферромагнитных сталей [19, 7]. Учитывается локальное расположение магнитных экранов (шунтов) на стенках баков [12]. Отношением локальных поверхностных потерь к КТО проводится упрощенная оценка нагревов.

Вставки в баках. В зоне действия интенсивных магнитных полей отводов с токами порядка 10–25 кА основным конструктивным решением является выполнение в крышках баков вставок из немагнитной стали [20]. Возможные варианты конструкции крышки бака и отводов

с токами приводят к необходимости рассмотрения аналитическими методами соответствующих краевых задач для вихревых токов в упрощенных моделях проводящих пластин различной конструкции – прямоугольных пластин с кусочно-периодическим распределением внешнего магнитного поля, пластин с круговыми отверстиями, сопряженных пластин из немагнитной и ферромагнитной стали и т.п. [15]. По величине локальных потерь выполняется оценка нагревов.

Стяжные шпильки в стержнях реакторов. Вне общих концевых участков шпильки представляют собой систему автономных стержней круглого или прямоугольного сечения из немагнитной стали. Потери от вихревых токов в шпильке определяются по продольной составляющей магнитного поля по длине стержня [3]. Учитывается локальное увеличение поля в местах выпучивания магнитного потока в зазорах между вставками стержня. Проводится оценка максимальных нагревов.

Электромагнитные экраны, применяемые для защиты ЭК от магнитного поля обмоток, отводов. Вихревые токи и потери в экранах конечных размеров могут быть определены с использованием модели пластины [15] при упрощающем допущении, что кусочно-периодическое распределение внешнего магнитного поля на ее поверхности известно, то есть без обратного влияния вихревых токов. Оценка нагревов проводится по локальным значениям потерь.

Электромагнитные замкнутые экраны токоограничивающих реакторов. Основой является расчет распределения токов проводимости в замкнутых горизонтальных экранах на торцах обмотки и в вертикальном экране у стенки бака реактора [21]. Используется цилиндрическая модель системы круговых элементов, которые представляют собой обмотку и индуктивно связанные с ней параллельные части экранов, в пределах размеров которых токи можно считать равномерной плотности. По расчетному распределению токов определяются локальные потери, по заданным КТО – нагревы.

Нагрев МС. Задача о распределении температуры в МС трансформатора сводится к рассмотрению нагрева при равномерных потерях от основного магнитного потока в сечениях стержня и ярм. Отделенные охлаждающими каналами группы пакетов из электротехнической стали упрощенно представляются эквивалентным анизотропным прямоугольником с известными КТО на его сторонах [1]. В [7] используются уточненные решения задачи методами конечных интегральных преобразований и разделения переменных [22].

Нагрев отводов. В [7] применяется методика, в которой по структуре проводников и изоляции определяются теплопроводности и термические сопротивления отводов с известными потерями. Для разных систем охлаждения по положению отводов (вертикальные, горизонтальные), по их расположению (вне обмотки, в промежутке между обмоткой и изоляционным цилиндром и т.п.) определяются функциональные зависимости эмпирических КТО с поверхности отводов.

Численные электромагнитные модели. Для уточненных численных исследований электромагнитных процессов в трансформаторах и реакторах с применением средств ANSYS разработаны практические процедуры, которые предусматривают формирование расчетных моделей, задание материальных параметров и граничных условий, выбор соответствующих уравнений и методов расчета, дополнительную (при необходимости) обработку результатов [23–25]. Приведем их краткое описание.

Расчет электромагнитного поля трансформаторного оборудования основывается [2–6] на решениях уравнений Максвелла относительно напряженности магнитного H , электрического E полей, магнитной индукции B и полного тока, равного сумме сторонних (заданных) токов J_{CT} и вихревых токов J_B в проводящих телах (токи смещения при питании напряжением промышленной частоты пренебрегаются)

$$\nabla \times H = J_{CT} + J_B, \quad \nabla \times E = -\partial B / \partial t, \quad \nabla \cdot B = 0. \quad (1)$$

Для областей с магнитной проницаемостью μ и электрической проводимостью σ уравнения (1) дополняются материальными уравнениями

$$B = \mu H, \quad j_B = \sigma E. \quad (2)$$

Для анизотропных сред величины электрической проводимости σ и магнитной проницаемости μ должны рассматриваться как тензоры. Электрическая проводимость нелинейно зависит от температуры $\sigma(\theta)$. Зависимость между индукцией и напряженностью магнитного поля для ферромагнитных сред нелинейная и даже гистерезисная.

С использованием уравнений (1), (2) и соответствующих граничных условий формируются краевые задачи относительно векторного магнитного потенциала A , вводимого по известному определению $B = \nabla \times A$. Используются также граничные соотношения на поверхности раздела двух сред для касательных составляющих напряженности и нормальных составляющих индукции электрического и магнитного полей, условия на бесконечности и симметрии.

Практические процедуры разработаны методами стационарного, гармоничного линейного и гармонического нелинейного анализа ANSYS [8]. Численному моделированию подлежат уравнения (1), (2) при разных допущениях, в зависимости от целей расчетов. Так для задач магнитостатики (метод стационарного анализа) моделируются уравнения Пуассона при линейных и нелинейных свойствах материалов (в (1) заданы только сторонние токи). Метод гармонического анализа обеспечивает моделирование уравнений Гельмгольца (с учетом в (1) сторонних и искомым вихревых токов) при линейных свойствах материалов. Метод гармонического нелинейного анализа применяется для моделирования с учетом поверхностного нелинейного эффекта в конструкционных ферромагнитных сталях.

Средствами ANSYS определяются составляющие электрического и магнитного поля, необходимые и достаточные для последующих расчетов электромагнитных

сил и потерь в обмотках, потерь в ЭК. Интегральные параметры поля используются для определения индуктивных параметров устройств.

Расчет потерь в конструкционных сталях. Расчет локальных потерь $p_{v,j}$ в элементарных объемах v расчетных моделей проводящих тел конструкции из немагнитной стали проводится методами гармонического анализа по величине вихревых токов j_v , определяемых уравнением (2). Потери вычисляются стандартными средствами ANSYS [8] путем усреднения их значения за период T

$$p_{v,j} = \frac{1}{\sigma} \frac{2}{T} \int_0^T j_v^2(t) dt. \quad (3)$$

После определения локальных значений специальными разработанными макросами вычисляются суммарные потери в проводящих телах конструкции.

Для протяженных частей конструкции из ферромагнитной стали, например, баков апробирован средствами ANSYS [23] расчет поверхностных потерь W , вычисляемых по касательной составляющей напряженности магнитного поля H_τ и значениях поверхностного импеданса $Z(H_\tau)$ с использованием известной нелинейной характеристики комплексной эквивалентной магнитной проницаемости для ферромагнитных сталей [19, 3]

$$W = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z \left| \overline{H_\tau} \right|^2. \quad (4)$$

Метод поверхностных потерь, однако, вызывает затруднения при расчете ЭК в тех случаях, когда их необходимо рассматривать как тела ограниченных размеров. Поэтому разработаны практические процедуры [23] на основе так называемого метода объемных потерь. При этом в модели ANSYS ферромагнетик характеризуется основной кривой намагничивания. Средствами нелинейного гармонического анализа вычисляются значения индукции магнитного поля, вихревые токи. Дополнительно средствами управляющего языка ANSYS написаны вычислительные макросы, которые для проводящих тел подобно (3) определяют плотности объемных потерь от вихревых токов $p_{v,j}$ как усредненные за период T значения периодической, но нелинейной функции $j_v(t)$. Затем дополнительно вычисляются средние за период потери на намагничивание ферромагнитной стали

$$p_{v,h} = \frac{2}{T} \int_0^T p_h(B_{m,v}) dt. \quad (5)$$

При этом для каждого значения индукции с амплитудой $B_{m,v}$ в элементе v потери $p_h(B_{m,v}) = S(B_{m,v}) f / \rho$ на намагничивание с частотой f в теле с плотностью ρ определяются площадью $S(B_{m,v})$ петли гистерезиса, которая образована восходящей и нисходящей ее ветвями [19]. Суммарные потери в проводящих ферромагнитных телах вычисляются суммированием потерь (3) и (5).

Опыт численного моделирования магнитного поля, потерь, нагревов элементов конструкции. Выработаны два основных подхода к численным расчетам электромагнитных процессов в ЭК, исходя из последующих задач расчета их нагревов.

Первый подход заключается в том, что для расчета вихревых токов в частях конструкции из немагнитной стали допустимым и достаточным является расчет магнитного поля с использованием трехмерных моделей на поверхностях, которые соответствуют так называемым центральным плоскостям таких тел без их присутствия. Основной особенностью таких тел является достаточно большая их протяженность по двум (балки) или одной (полосы подъемной пластины) пространственным координатам при малой толщине тела. Такой расчет предполагает, что можно пренебречь обратным влиянием вихревых токов на первичное внешнее магнитное поле. В последующем вихревые токи могут быть определены по соответствующим двумерным моделям на основании численного моделирования уравнений (1), (2), а расчет потерь – по выражению (3). Это касается таких ЭК как прессующие пластины и крайние пакеты э.т.с. на стержнях МС [16], как проводящие пластины электростатических экранов, как плоские развертки стенок и полок с возможными выступами немагнитных ярмовых балок и т.п. [24].

Второй подход заключается в совместном расчете электромагнитного поля по уравнениям (1), (2) и потерь по выражениям (3), (4) с применением трехмерных моделей, в которых исследуемые ЭК учтены в необходимой и достаточной полноте. Это относится к задачам расчета поля и потерь в составных ярмовых балках (полки – немагнитные, стенка – ферромагнитная), балок из ферромагнитной стали, к задачам расчета потерь в баках, в том числе с учетом магнитного экранирования (шунтов), к задачам моделирования процессов в крышках баков, находящихся под действием магнитных полей обмоток и токопроводов со значительными токами [23, 24], распределения вихревых токов, потерь в замкнутых экранах реакторов.

При наличии высших гармоник в токах обмоток трансформаторов для передач и вставок постоянного тока, преобразовательных трансформаторов увеличение потерь в обмотках, в немагнитных и в ферромагнитных стаях учитывается с использованием повышающих коэффициентов, определяемых по заданному гармоническому составу токов [3].

Необходимо указать, что существуют определенные аварийные режимы трансформаторов, для которых расчеты потерь, нагревов в настоящее время изучены недостаточно. К таким режимам следует отнести процессы перевозбуждения МС при повышенных напряжениях [3], при действии геомагнитных токов [26].

В качестве примера численного моделирования магнитного поля, потерь с применением ANSYS на рис. 1а показана расчетная трехмерная модель однофазного автотрансформатора мощностью 500 МВА. Выделена четвертая часть симметричной конструкции. МС представлена телом упрощенной формы – без детального представления зон стыковки пластин планарной шихтовки МС. В плоскости пластин э.т.с. магнитные свойства описаны основной кривой намагничивания. По нормали к плоскости пластин – константой с учетом коэффициента заполнения как для слоистой среды. Полки ярмовых балок выполнены из немагнитной стали, стенки – из ферромагнитной. Нижняя полка верхней балки имеет выступы (рис. 5а) для прессовки обмоток. Распределение намагничивающих сил в обмотках задано равномерным по сечению. На нижней балке и на баке учитываются дискретные шунты из э.т.с.

Численная модель токоограничивающего реактора с электромагнитными экранами показана на рис. 1б. Однофазные реакторы данного типа обладают полной осевой симметрией и содержат обмотку, замкнутые верти-

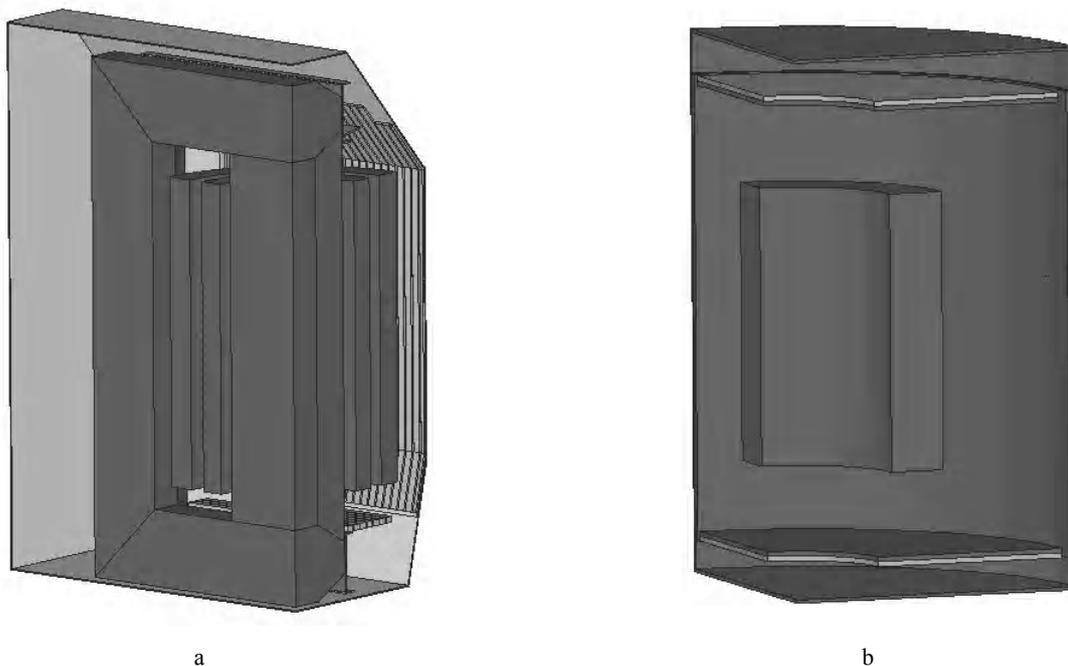


Рисунок 1

кальный и горизонтальные экраны из алюминия. Из конструкционной ферромагнитной стали выполняются прилегающие к горизонтальным экранам нажимные плиты и цилиндрический бак – для однофазных и облегающих – для трехфазных реакторов. Численная модель предназначена для уточненных, по сравнению с [21], расчетов распределения токов, потерь и нагревов.

Подобным образом с использованием трехмерных расчетных моделей исследуются электромагнитные процессы шунтирующих реакторов с зазорами в стержне [23].

Полученная в настоящее время практика моделирования трансформаторных устройств показала, что численные электромагнитные модели обеспечивают необходимую и достаточную информацию для расчетов нагревов ЭК трансформаторов и реакторов.

Численные тепловые модели. Для исследования задач тепломассопереноса в трансформаторном оборудовании с масляным охлаждением в последние годы применяются методы Computational Fluid Dynamics (CFD) численного моделирования системы уравнений Навье-Стокса, состоящие из уравнений движения и неразрывности охлаждающей жидкости. В настоящее время получен практический опыт [27] CFD-моделирования с применением ANSYS FLUENT [8] поля скоростей охлаждающего масла и полей температур в обмотках трансформаторов и реакторов при допущении, что реальные конструкции МС, обмоток, бака могут быть эквивалентированы осесимметричными расчетными моделями.

Рассмотреть нелинейные и трехмерные процессы нагревов ЭК с использованием ограниченных средств вычислительной техники, эксплуатируемой в настоящее время при промышленном проектировании трансформаторного оборудования, не представляется возможным.

Поэтому в данной работе используется широко применяемый подход [1–6], который состоит в том, что при допущении о стационарных условиях нагрев ЭК может быть определен из решения уравнения теплопроводности [1]

$$\nabla(\lambda \nabla \theta) + Q_v = 0, \quad -\partial \theta / \partial n = \alpha(\theta - \theta_0), \quad (6)$$

где θ – функция распределения температуры тела с теплопроводностью λ , Q_v – объемное распределение в нем

плотности источников тепла (потерь), α – известные на его поверхности с нормалью n КТО в окружающую среду (масло, воздух), θ_0 – заданная температура внешней среды.

При этом основная проблема переносится на определение КТО, которые достаточно сложно зависят от многих факторов: вид охлаждающей среды (газ или жидкость), свойства среды (теплоемкость, плотность, вязкость), вид движения среды (ламинарный или турбулентный), параметры охлаждаемой поверхности (степень черноты, шероховатость, геометрические размеры, расположение) и т.д. Поэтому известные практически используемые аналитико-экспериментальные КТО имеют достаточно разрозненный характер. Рассмотрим ряд подходов их определения.

Определение коэффициентов теплоотдачи с поверхности ЭК. При конвективном теплообмене в масле КТО определяется [1] через критерий Нуссельта Nu , коэффициент теплопроводности λ и характерный линейный размер охлаждаемой поверхности h

$$\alpha = Nu \lambda h^{-1}, \quad Nu = C(GrPr)^n, \quad Gr = g\beta \Delta \theta h^3 \nu^{-2}, \quad Pr = \rho v c \lambda^{-1}, \quad (7)$$

где Gr , Pr – критерии Грасгофа и Прандтля; ρ , c и β – плотность, теплоемкость и объемный коэффициент расширения, ν – кинематическая вязкость охлаждающей среды; $\Delta \theta$ – перепад температур между нагреваемой поверхностью и охлаждающей средой; g – ускорение свободного падения, C , n – эмпирические коэффициенты, зависящие от величины $GrPr$.

Значения коэффициентов C, n для вертикальной пластины в большом объеме со свободным движением охлаждающей среды по различным источникам представлены в табл. 1.

По параметрам C, n из источников [1, 4, 30], параметрам масла [29] в рассматриваемом диапазоне температур (30–100 °С) и характерном геометрическом параметре $h = 2$ м с использованием определений (7) получены выражения для КТО в масло, которые приведены в первых трех пунктах табл. 2. В пунктах 4–6 указаны выражения, используемые в отраслевых методиках [7]. Для срав-

Таблица 1 – Значение коэффициентов C, n в критерии Нуссельта

Тип движения среды	Источник	Диапазон $GrPr$	Охлаждающая среда	C	n
Пленочный	[28]	$1 \cdot 10^{-3}$	жидкость	0,5	0
Переходной к ламинарному	[28]	$1,1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	жидкость	1,18	0,125
Ламинарный	[28]	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	жидкость	0,54	0,25
	[1]		воздух	0,525	0,25
	[29]	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	масло	0,54	0,25
	[30]		жидкость	0,63	0,25
Турбулентный	[28]	$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	жидкость	0,135	0,333
	[1]		масло	0,129	0,333
	[4]	$10^9 - 10^{13}$	воздух, масло	0,021	0,4

нения исходные формулы по разным источникам представлены в зависимости от превышения температур при $q = \alpha \cdot \Delta\theta$. Анализ табл. 2 подтверждает утверждение [29] о том, что в номинальных условиях охлаждения трансформаторного оборудования практически КТО являются те, которые определяются средними между ламинарными и турбулентными условиями движения масла.

Для частных случаев могут быть проведены численные исследования КТО моделированием CFD задачи теплопереноса с применением ПО ANSYS FLUENT [8].

В качестве примера выполнены экспериментальные и расчетные исследования специальной физической модели в виде изготовленной из конструкционной ферромагнитной стали протяженной ванны, заполненной трансформаторным маслом – рис. 2.

Внутри ванны параллельно ее крышке расположен отвод с током промышленной частоты. Величина тока и расстояние между отводом и крышкой подобраны из условия, при котором нагрев крышки соответствует значениям, наблюдаемым обычно на баке трансформаторов при их работе в номинальных режимах. На рис. 2а показано расчетное распределение температур, которое на поверхности крышки достаточно близко к величинам, полученным дистанционным измерителем температур (тепловизором). Наибольший нагрев порядка 96 °С сосредоточен в центре крышки в соответствии с характером

выделения потерь от магнитного поля токопровода.

Поле скоростей масла (в м/с), показанное на рис. 2б, имеет неоднородный характер с большими значениями у поверхности крышки. При этом расчетное распределение КТО на верхней плоскости по рис. 2с имеет значительные колебания, что может быть объяснено неустойчивым движением масла у горизонтальной поверхности. В зоне наибольших нагревов КТО составляет величину порядка 70 Вт/(м²°С).

На рис. 3 показаны результаты CFD исследования подобной расчетной модели, но с прохождением отвода параллельно ее вертикальной стенке. Интенсивность и характер выделения на стенке потерь от магнитного поля отвода соответствует модели по рис. 2. На рис. 3а показано распределение температур, на рис. 3б – поле скоростей, рис. 3с – значения КТО. Распределение КТО по высоте стенки достаточно плавное, что объясняется устойчивым движением масла с характерным полем скоростей [29] в узкой полосе вблизи охлаждаемой вертикальной поверхности. На участке стенки в пределах ±0,1 м от точки с наибольшим нагревом КТО меняется от 60 до 90 Вт/(м²°С). Получено снижение максимального нагрева до 84 °С, что коррелируется с увеличением КТО в центральной точке примерно до 85 Вт/(м²°С).

При воздушном охлаждении нагретых тел КТО в воздух определяется суммой составляющих на лучеиспус-

Таблица 2 – Расчетные формулы КТО в масло

Элемент	Зависимости $\alpha(\Delta\theta)$
1 Тело с постоянными потерями в среде с постоянной температурой [1]	$\alpha = 50\Delta\theta^{0,25}$
2 Поверхность вертикальной стенки [30]	$\alpha = 21,7\Delta\theta^{0,25}$
3 Вертикальная стенка бака [4]	$\alpha = 70$
4 Бак, прессующие кольца, неактивные детали [7]	$\alpha = 44,7\Delta\theta^{0,25}$
5 Остов МС [7]	$\alpha = 55,9\Delta\theta^{0,25}$
6 Отводы [7] для систем охлаждения М и Д – вертикальные – горизонтальные для систем охлаждения ДЦ – вертикальные – горизонтальные	$\alpha = 11,4\Delta\theta^{0,667}$
	$\alpha = 6,3\Delta\theta^{0,667}$
	$\alpha = 19,3\Delta\theta^{0,493}$
	$\alpha = 11,3\Delta\theta^{0,493}$
7 FLUENT (рис. 3), вертикальная пластина – турбулентная модель, – ламинарная модель	$\alpha = 41,9\Delta\theta^{0,345}$
	$\alpha = 24,2\Delta\theta^{0,315}$

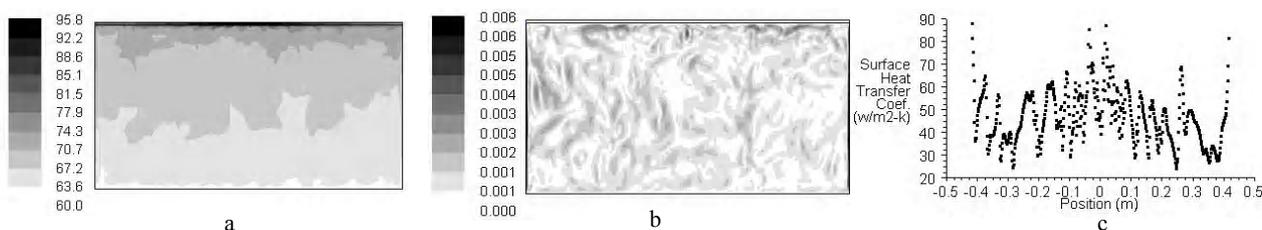


Рисунок 2

кание и конвективный теплообмен $\alpha = \alpha_l + \alpha_k$.

Для вычисления лучистой составляющей КТО в воздухе в [1, 2, 29] используется следующее выражение

$$\alpha_l = 5,77\varepsilon(T_c - T_{oc})^{-1} \left[(T_c/100)^4 - (T_{oc}/100)^4 \right], \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,95$ – коэффициент поглощения для окрашенных поверхностей серого, черного и зеленого цветов, T_c, T_{oc} – абсолютные температуры стенки и окружающей среды.

Конвективная составляющая КТО в воздухе зависит от условий охлаждения. Так для поверхностей без обдува используются, в частности, следующие определения

$$\alpha_k = 10^4 \sqrt{\Theta^{-1} T_{oc} h} \quad [1], \quad \alpha_k = 1,3\Theta^{0,33} \quad [29], \quad (9)$$

где Θ – превышение температуры стенки над T_{oc} , h – высота вертикальной нагретой стенки.

Для условий с обдувом конвективный КТО в воздух при малых скоростях $v \leq 5 \text{ м/с}$, температуре охлаждающей среды $\vartheta_{oc} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и средней температуре стенки $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ по [1] оценивается по упрощенным формулам: $\alpha_k \approx 5,7 + 4v$ – для гладких поверхностей, $\alpha_k \approx 6,2 + 4,2v$ – для шероховатых поверхностей.

Конвективный КТО от стенок бака к окружающему воздуху может быть определен при температуре окружающего бак воздуха T_B , температуре поверхности T_{II} по эмпирической зависимости [31]

$$\alpha_k = A \cdot \sqrt[3]{|T_B - T_{II}| + 60v_B^2/h}. \quad (10)$$

Коэффициент A зависит от расположения, температуры и теплопроводности теплоотдающей поверхности. При температуре поверхности порядка $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $A = 1,66$ для вертикальной поверхности конструкционной стали; $A = 1,16$ – для горизонтальной поверхности, обращенной вниз; $A = 2,26$ – для горизонтальной поверхности, обращенной вверх.

В табл. 3 приведены значения КТО, которые получены по выражениям (8) – (10) при температуре охлаждающей среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$, средней температуре поверхности $50 \text{ }^\circ\text{C}$, скорости воздуха 2 м/с и параметре $h = 2 \text{ м}$.

Табл. 3 подтверждает известное положение о том, что при естественном охлаждении большая теплоотдача приходится на излучение, при искусственном – на конвекцию. Полученные значения КТО используются, в частности, при расчетных исследованиях нагревов крышек бака, в том числе их частей (рис. 7а), которые выступают за стенки бака и находятся в условиях воздушного охлаждения.

Примеры электротепловых расчетов ЭК. В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены примеры расчетов ряда ЭК трансформаторов и реакторов в виде полей распределения абсолютных температур по их поверхностям или в сечениях.

На рис. 4а показана верхняя часть двумерной модели [16] общей и разрезной части прессующей пластины на стержне МС трансформатора. Обычно предполагается, что максимальные температуры имеют место от наибольших магнитных полей против верхних торцов обмоток, которые расположены ниже начала вертикального разреза. В данном случае область высоких температур захватывает и часть пластины выше разреза. Это объясняется тем, что в этой части, несмотря на уменьшенные магнитные поля, ширина ПП в два раза больше, чем полус с разрезом.

Совместная трехмерная модель верхней части ПП, картонной прокладки, крайнего и последующих пакетов стержня МС [16] показана на рис. 4б. ПП и крайний пакеты выполнены без разрезов, зоны повышенных нагревов сосредоточены на их вертикальных краях против торцов обмоток.

Таблица 3 – Значения КТО в воздухе

Источник, условия	α_l	α_k	α
Естественное охлаждение			
[4]	–	–	13,0
[1, 2]	6,4	4,8	11,2
[29, 2]	6,4	4,0	10,4
Искусственное охлаждение			
[1] – гладкая поверхность			13,7
– шероховатая поверхность			14,6
[14] – вертикальная стенка,	5,6	8,8	14,4
– горизонтальная вниз,		6,2	11,8
– горизонтальная вверх		12,0	17,5

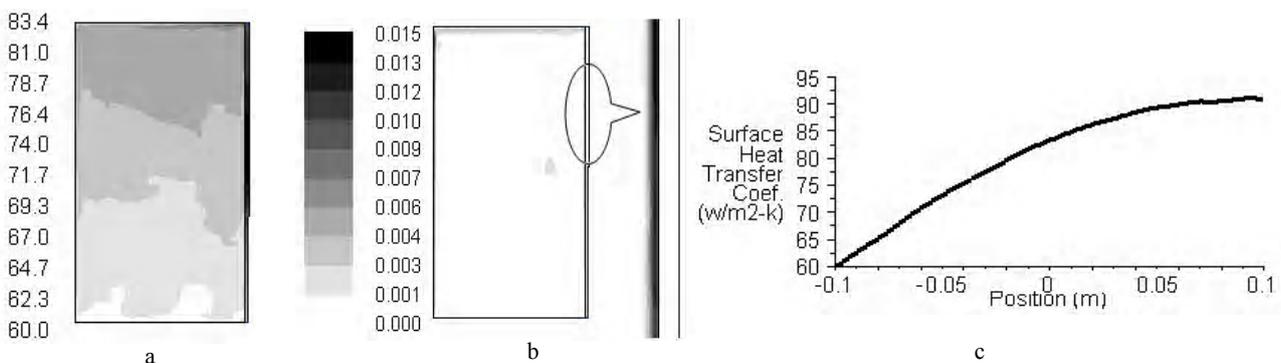


Рисунок 3

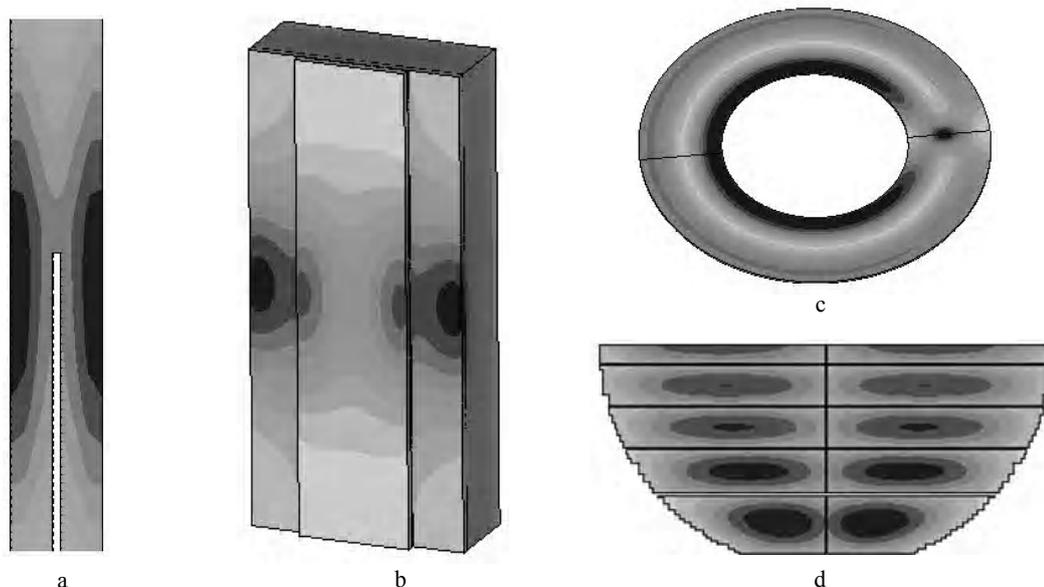


Рисунок 4

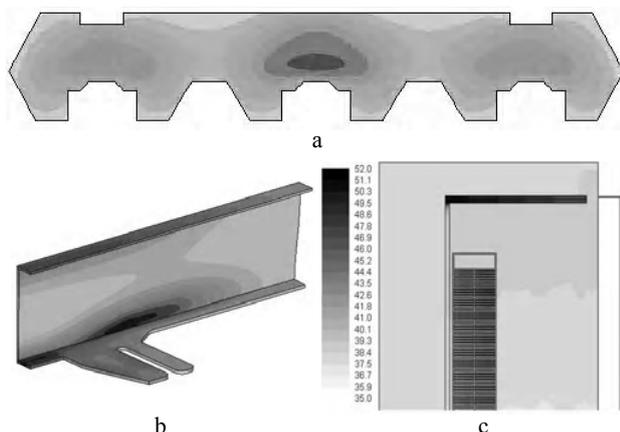


Рисунок 5

На рис. 4с приведено распределение температур разрезного прессующего кольца из немагнитной стали, расположенного у верхнего торца обмоток испытательного трансформаторного устройства. Наблюдаются повышенные нагревы внутренней части кольца за счет неравномерного распределения вихревых токов.

Распределение температур по сечению пакетов стержня МС показано на рис. 4d. В численной модели [22] учтена реальная (ступенчатая) форма внешней поверхности пакетов.

На рис. 5а показан результат расчета нагрева двумерной плоской модели развертки полок и стенок ямовой балки из немагнитной стали в заданном трехфазном поле обмоток [24].

Распределение температур в трехмерной модели яровой балки автотрансформатора по рис. 1а с ферромагнитной стенкой и полками из немагнитной стали приведено на рис. 5b. Наибольшие нагревы сосредоточены в зоне стыка стенки и полки балки.

Численные исследования яровых балок, как с немагнитной, так и с ферромагнитной стали шунтирующих реакторов показали подобный характер распределения вихревых токов, потерь и нагревов.

На рис. 5b приведено поле температур в масле, в катушках обмоток, в вертикальном и горизонтальном экране верхней части токограничивающего реактора по рис. 1b, полученное в результате исследования CFD тепловой модели с использованием основных подходов [27]. Предварительный электромагнитный расчет распределения вихревых токов и потерь подтвердил известную [21] неравномерность их выделения в экранах. Наибольшие потери и нагревы горизонтальных экранов локализируются на их внутренних краях в области максимального осевого магнитного поля обмотки. Уменьшению нагревов горизонтальных экранов способствует их тепловой контакт с нажимными плитами, в которых из-за наличия экрана потери практически отсутствуют. Вертикальный экран также имеет тепловой контакт со стенкой бака. Поэтому в тепловой модели рис. 5b вертикальный экран не присутствует. Его потери включены в тепловую модель бака и рассеиваются в воздух с его наружной поверхности. Укажем также, что согласно [27] в модели содержится специальный расчетный элемент, осуществляющий теплосъем потерь в активной части реактора внешней системой охлаждения с панельными радиаторами.

Расчет нагрева стенок бака показан на примере модели автотрансформатора 500 МВА по рис. 1а. Расчетные температуры с максимальными значениями порядка 133°C показаны на рис. 6а в специальном испытательном режиме с повышенной кратностью токов в обмотках. При тепловых испытаниях тепловизором сняты термограммы распределения температур. На рис. 6b цифрами отмечен наибольший нагрев в верхнем наклонном участке бака, на рис. 6с – в его нижней части под линией разъема бака. Измеренные значения соответствуют результатам расчетов.

Определение КТО CFD моделированием апробировано для преобразовательного трансформатора 45 МВА при расчете нагревов горизонтальных опорных ребер, которые крепятся на стенке нижней ярмовой балки под обмотками – рис. 8. Расположение опорного ребра в активной части трансформатора вместе с вертикальной поверхностью стенки балки (прилегающей через изоляцию к горизонтальному ярму МС), вертикальной поверхностью стенки бака и нижней плоскостью дна бака позволяют рассмотреть расчетную плоскопараллельную CFD–модель.

На верхней плоскости модели задано отсутствие условий теплопередачи, что соответствует расположения ярмовой изоляции обмоток непосредственно на горизонтальных поверхностях ребер. Распределение поля скоростей масла и поля температур показано на рис. 8а и 8б. Направления входа и выхода масла показаны стрелками, скорость на входе 0,001 м/с.

Исследования упрощенной плоскопараллельной расчетной модели обеспечили определение усредненных значений КТО на ребрах и стенке балки, которые были использованы при расчете комплексной электротепловой модели совместного нагрева вертикальной стенки нижней ярмовой балки трансформатора и системы опорных ребер под обмотками. Измеренные термопарами значения превышений температур горизонтальных полок ребер над маслом порядка 70°С соответствуют результатам расчетов по рис. 8с.

ВЫВОДЫ

Представленные основные подходы и разработанные авторами на ПАО «Запорожтрансформатор» практические процедуры численного моделирования с применением программного обеспечения ANSYS обеспечивают комплексную уточненную оценку потерь и нагревов практически всех видов элементов конструкции трансформаторного оборудования за счет максимального учета основных влияющих факторов.

Численные методы являются предпочтительными при исследовании сложных элементов конструкции, которыми надо считать ярмовые балки из немагнитной и ферромагнитной стали, участки баков при локальных интенсивных магнитных полях на их поверхности и т.п.

Представленные в настоящей работе численные процедуры уточненного конечно-элементного анализа потерь и нагревов элементов конструкции обеспечивают ПАО «Запорожтрансформатор» разработку и поставку для силовой энергетики надежного оборудования, что подтверждается опытом испытаний и успешной эксплуатации широкой номенклатуры силовых трансформаторов и электрических реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер // Пер. с нем. – М.- Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.

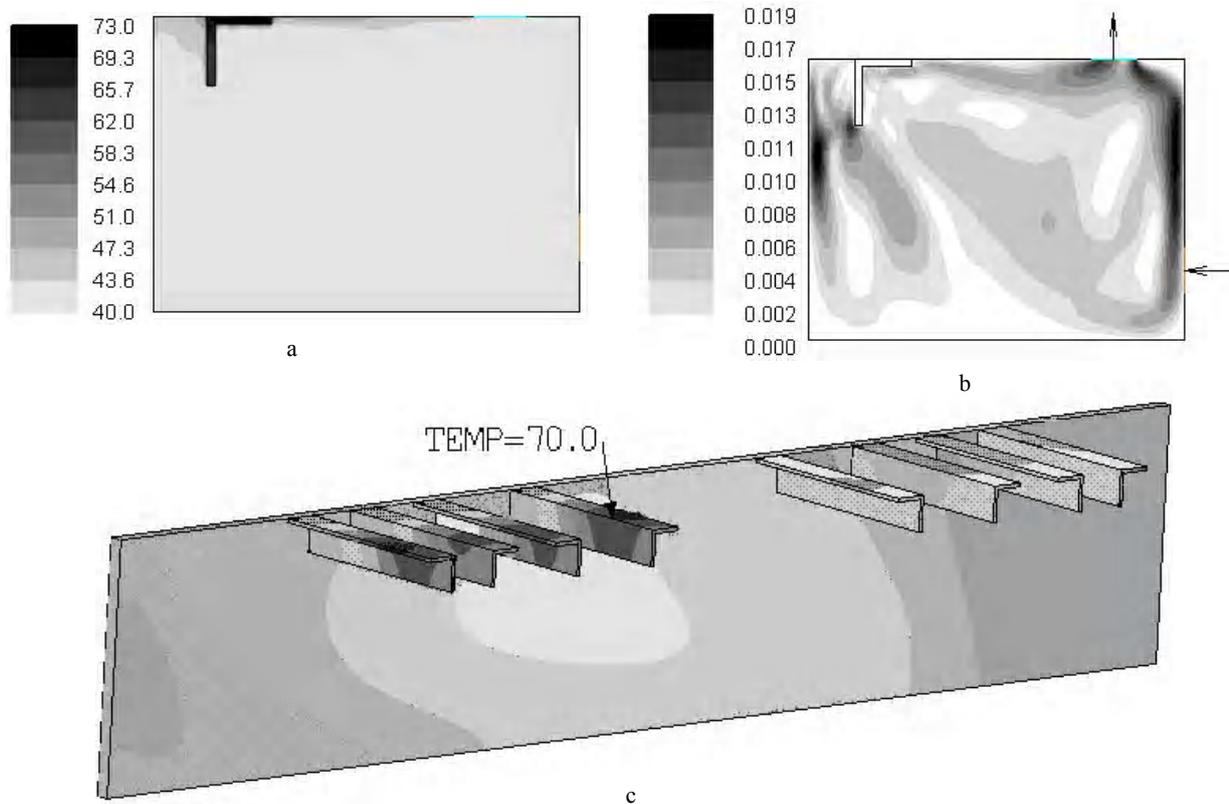


Рисунок 8

2. Бики М. А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчеты основных параметров / М. А. Бики. – М. : «Знак» – 2013. – 612 с.
3. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с.
4. Del Vecchio Robert M. Transformer design principles: with application to core–form transformers / [Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah and Rajendra Ahuija]. – Gordon and Breach Science Publishers. – 2001. – 599 p.
5. Kulkarni S. V. Transformer Engineering. Design and Practice / S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. – Marcel Dekker, Inc., New York – Basel, 2004. – 477 p.
6. Turowski J. Obliczenia elektromagnetyczne elementow maszyn i urzadzen elektrycznych / J. Turowski. – Warszawa, 1982. – 316 s.
7. Іванков В. Ф. Розрахункова підсистема автоматизованого проектування трансформаторів і реакторів / В. Ф. Іванков, Ю. Н. Шафір // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України. – 2008. – № 18. – С. 123–131.
8. ANSYS software: <http://www.ansys.com>.
9. Ionescu B. Multiphysics-based simulation reduces transformer size, cost and noise / Bogdan Ionescu // ANSYS Advantage. Vol. Y, Issue 3, 2011. – P. 30–33.
10. Іванков В. Ф. Математические модели электромагнитных полей в трансформаторах / В. Ф. Іванков, Л. П. Нижник // Математические проблемы энергетики: Сб. науч. тр./ АН УССР. Ин-т математики; Редкол. : Митропольский Ю.А. (отв. ред.) и др. – К. : Наук. Думка, 1988. – 168 с. – С. 50–60.
11. Іванков В. Ф. Расчет магнитной индукции, вихревых токов и потерь в немагнитной ярмовой балке силового трансформатора / В. Ф. Іванков, В. Л. Каналюк // Техническая электродинамика. – 1987. – № 6. – С. 34–40.
12. Іванков В. Ф. Расчет магнитного поля, потерь в баках трансформаторов и электрических реакторов / В. Ф. Іванков // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України. – 2005. – № 1 (10). – С. 91–104.
13. Морозов Д. Н. Расчет общих и местных потерь в пластинах, принизываемых потоком рассеяния трансформатора или реактора / Д. Н. Морозов // Электричество. – 1967. – № 12. – С. 32–38.
14. Морозов Д. Н. Нагрев вставок стержневого реактора от потоков выпучивания / Д. Н. Морозов // Вопросы трансформаторостроения. Труды ВЭИ. – М. : Энергия, 1969. – Вып. 79. – С. 192–205.
15. Іванков В. Ф. Математические модели к расчету вихревых токов в элементах конструкции из немагнитной стали трансформаторов и электрических реакторов / В. Ф. Іванков // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Электродинамика. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України. – 2001. – С. 9–25.
16. Басова А. В. Розрахунок нагріву пресувальної пластини і крайнього пакету стрижня магнетної системи трансформатора / А. В. Басова, В. Ф. Іванков // Техн. електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – К. : Ін-т електродинаміки НАН України. – 2010. – Ч. 1. – С. 157–162.
17. Воеводина Е. И. Расчет вихревых токов и потерь в немагнитных прессующих кольцах трансформаторов / Е. И. Воеводина, В. Ф. Іванков // Электротехника. – 1983. – № 10. – С. 38–39.
18. Іванков В. Ф. Расчет электромагнитных и тепловых параметров прессующего кольца трансформатора из немагнитной стали / В. Ф. Іванков // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 4. – С. 56–59.
19. Кравченко А. Н. Электромагнитные расчеты в энергетике / А. Н. Кравченко, Л. П. Нижник. – К. : Техніка, 1977. – 184 с.
20. Furman Ya.I. Losses in tanks of lagre power transformers, caused by magnetic field and method of their reduction / [Ya.I. Furman, V.L. Bereza, V.F. Ivankov, L.P. Nizhnik]. International Conference on Lagre High Voltage Electric Systems (CIGRE.). Report 12–07. – 1988 Session (Paris, 28 th August – 3 rd September). – 1988.
21. Рапцун Н. В. Модели и методы расчета электромагнитного поля электрического реактора с проводящими экранами / [Н. В. Рапцун, А. К. Мовсесян, В. Ф. Іванков, Г. И. Калайда, А. А. Кобылецкий] // Генерирование, преобразование, потребление электроэнергии. – К. : Ин-т проблем энергосбережения АН УССР, 1989. – С. 86–92.
22. Басова А. В. Розрахунок температури в перерізі стрижнів магнетних систем трансформаторів та реакторів / А. В. Басова, В. Ф. Іванков // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 52–60.
23. Ivankov V. F. Numerical simulation of losses and heating in the constructional elements of transformers of ferromagnetic steel / V. F. Ivankov, A. V. Basova, I. V. Khimjuk // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 19–27.
24. Basova A. Numerical modeling of eddy currents and heating in nonmagnetic stell structural elements of powerful transformers and electric reactors / [A. Basova, V. Ivankov, S. Kokoshyn, I. Khimjuk, M. V. Myslovich] // Computational Problems of Electrical Engineering. Науково–технічний журнал «Обчислювальні проблеми електротехніки». Львів: Національний університет «Львівська політехніка». – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 5–7.
25. Basova A. V. Losses, heating in tank covers of transformers / A. V. Basova, V. F. Ivankov, I. V. Khimjuk // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 4. – С. 74–80.
26. Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System // GMDTF Interim report: Norton American Electric Reliability Corporation, February 2012. – 137 p. : <http://www.nerc.com>.

27. Круковский П. Г. Методические подходы с CFD-моделированию тепловых режимов силовых масляных трансформаторов / [П. Г. Круковский, В. А. Яцевский, Л. Н. Конторович, В. Ф. Иванков, Д. Д. Юрченко] // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 57–66.
28. Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах / Г. Н. Дульнев. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 288 с.
29. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш // Пер. с венгерского М.А.Бики. Под ред. Г. Е. Тарле. – М. : Энергия, 1980. – 208 с. – (Трансформаторы. Вып. 36).
30. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сухомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
31. Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.

*Статья поступила в редакцию 23.05.2014.
После доработки 20.12.2014.*

Иванков В. Ф.¹, Басова А. В.², Шульга Н. В.³

¹Канд. техн. наук, начальник лаборатории ПАТ «Запоріжтрансформатор», Україна,

²Провідний інженер-конструктор ПАТ «Запоріжтрансформатор», Україна

³Провідний інженер-конструктор ПАТ «Запоріжтрансформатор», Україна

ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИ РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНОГО УСТАТКУВАННЯ

У роботі приведений огляд аналітико-емпіричних методів розрахунку втрат і нагрівів елементів конструкції силового трансформаторного устаткування з масляним охолодженням, вказані основні спрощуючі допущення. Представлені методичні підходи, розроблені практичні процедури і досвід уточнених чисельних досліджень із застосуванням системи скінчено-елементного аналізу ANSYS.

Ключові слова: трансформатори, елементи конструкції, електромагнітні та теплові розрахунки, ANSYS

Ivankov V.¹, Basova A.², Shulga N.³

¹PhD, chief of laboratory of PJSC «ZTR», Ukraine,

²Leading engineer-designer of PJSC «ZTR», Ukraine

³Leading engineer-designer of PJSC «ZTR», Ukraine

ELECTRIC-HEATINGS CALCULATION MODELS OF STRUCTURAL ELEMENTS OF TRANSFORMER EQUIPMENT

The work provides the review of analytical and empirical calculation methods for calculation of losses and heating of structural elements of oil-cooled power transformer equipment, and also specifies the basic simplifying assumptions. Methodical approaches, developed practical procedures and experience of specified computational investigations with application of finite element system ANSYS are presented.

Keywords: transformers, structural elements, electromagnetic and thermal calculations, ANSYS

REFERENCES

1. Hotter H. Nahrevanie i okhlazhdenie elektricheskikh mashin. Moskva-Leningrad, Hosenerhoizdat, 1961, 480 p.
2. Biki M. A. Proektirovanie silovykh transformatorov. Raschety osnovnykh parametrov, Moscow, «Znak», 2013, 612 p.
3. Leites L. V. Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov. Moscow, Enerhia, 1981, 392 p.
4. Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuija. Transformer design principles: with application to core-form transformers, Gordon and Breach Science Publishers, 2001, 599 p.
5. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. Transformer Engineering. Design and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York-Basel, 2004, 477 p.
6. Turowski J. Obliczenia elektromagnetyczne elementow maszyn i urzadzen elektrycznych, Warszawa, 1982, 316 p.
7. Ivankov V. F., Shafir Yu. N. Rozrakhunkova pidsistema avtomatizovanoho proektuvannya transformatoriv i reaktoriv, *Pratsi In-tu elektrodinamiki NAN Ukraini. Zbirnik naukovikh prats.* Kiev, In-t elektrodinamiki NAN Ukraini, 2008, No 18, pp. 123–131.
8. ANSYS software: <http://www.ansys.com>.
9. Ionescu B. Multiphysics-based simulation reduces transformer size, cost and noise, ANSYS Advantage, Vol. Y, Issue 3, 2011, pp. 30–33.
10. Ivankov V. F., Nizhnik L. P. Matematicheskie modeli elektromagnitnykh polei v transformatorakh, Matematicheskie problemy enerhetiki: Sb. nauch. tr., AN USSR. In-t matematiki; Redkol, Mitropolskii Yu. A. (otv. red.) i dr. Kiev, Nauk. Dumka, 1988, pp. 50–60.
11. Ivankov V. F., Kanaliuk V. L. Raschet mahnitnoi induksii, vikhrevykh tokov i poter v nemahnitnoi iarmovoi balke silovoho transformatora, *Tekhnicheskaiia elektrodinamika*, 1987, No. 6, pp. 34–40.
12. Ivankov V. F. Raschet mahnitnoho polia, poter v bakakh transformatorov i elektricheskikh reaktorov, *Pratsi In-tu elektrodinamiki NAN Ukraini. Zbirnik naukovikh prats*, K, In-t elektrodinamiki NAN Ukraini, 2005, No 1(10), pp. 91–104.
13. Morozov D. N. Raschet obshchikh i mestnykh poter v plastinakh, prinizyvaemykh potokom rasseianiia transformatora ili reaktora, *Elektrichestvo*, 1967, No. 12, pp. 32–38.

14. Morozov D. N. Nahrev vstavok sterzhnevoho reaktora ot potokov, Voprosy transformatorostroeniia. Trudy VEl. Moscow, Enerhiia, 1969. Vyp. 79, pp. 192–205.
15. Ivankov V. F. Matematicheskie modeli k raschetu vikhrevykh tokov v elementakh konstruktsii iz nemahnitnoi stali transformatorov i elektricheskikh reaktorov, Pratsi In-tu elektrodinamiki NAN Ukraini. Elektrodinamika. Kiev, In-t elektrodinamiki NAN Ukraini, 2001, pp. 9–25.
16. Basova A. V., Ivankov V. F. Rozrakhunok nahrivu presuvalnoi plastini i krainoho paketu strizhnna mahnetnoi sistemi transformatora, Tekhn. elektrodinamika. Tematichnii vipusk «Problemi suchasnoi elektrotekhniki». Kiev, In-t elektrodinamiki NAN Ukraini, 2010, Ch. 1, pp. 157–162.
17. Voevodina E. I. Ivankov V. F. Raschet vikhrevykh tokov i poter v nemahnitnykh pressuiushchikh koltsakh transformatorov, 1983, No. 10, pp. 38–39.
18. Ivankov V. F. Raschet elektromahnitnykh i teplovykh parametrov pressuiushcheho koltsa transformatora iz nemahnitnoi stali, Tekhnichna elektrodinamika, 2001, No. 4, pp. 56–59.
19. Kravchenko A. N., Nizhnik L. P. Elektromahnitnye raschety v enerhetike. Kiev, Tekhnika, 1977, 184 p.
20. Furman Ya. I., Bereza V. L., Ivankov V. F., Nizhnik L. P. Losses in tanks of lagre power transformers, caused by magnetic field and method of their reduction, International Conference on Lagre High Voltage Electric Systems (CIGRE)., Report 12–07–1988 Session (Paris, 28 th August–3 rd September), 1988.
21. Raptun N. V., Movsesian A. K., Ivankov V. F., Kalaida H. I., Kobyletskii A. A. Modeli i metody rascheta elektromahnitnoho polia elektricheskoho reaktora s provodiashchimi ekranami, Henerirovanie, preobrazovanie, potreblenie elektroenerhii. Kiev, In-t problem enerhosberezheniia AN USSR, 1989, pp. 86–92.
22. Basova A. V., Ivankov V. F. Rozrakhunok temperaturi v pererizi strizhniv mahnetnikh sistem transformatoriv ta reaktoriv, Tekhn. Elektrodinamika, 2010, No 5, pp. 52–60.
23. Ivankov V. F., Basova A. V., Khimjuk I. V. Numerical simulation of losses and heating in the constructional elements of transformers of ferromagnetic steel, Tekhnichna elektrodinamika, 2014, No. 3, pp. 19–27.
24. Basova A., Ivankov V., Kokoshyn S., Khimjuk I., Myslovich M. V. Numerical modeling of eddy currents and heating in nonmagnetic stell structural elements of powerful transformers and electric reactors, Computational Problems of Electrical Engineering, Naukovo-tekhnichnii zhurnal «Obchisliuvalni problemi elektrotekhniki». Lviv, Natsionalnii universitet «Lvivska politekhnika», 2011, Vol. 1, No. 1, pp. 5–7.
25. Basova A. V., Ivankov V. F., Khimjuk I. V. Losses, heating in tank covers of transformers, Tekhnichna elektrodinamika, 2013, No. 4, pp. 74–80.
26. Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System, GMDTF Interim report: Norton American Electric Reliability Corporation, February 2012, P 137, <http://www.nerc.com>.
27. Krukovskii P. H., Yatsevskii V. A., Kontorovich L. N., Ivankov V. F., Yurchenko D. D. Metodicheskie podkhody s CFD-modelirovaniu teplovykh rezhimov silovykh maslianykh transformatorov, Promyshlennaia teplotekhnika, 2008, Vol. 30, No. 6, pp. 57–66.
28. Dulnev H.N. Teploobmen v radioelektronnykh ustroistvakh. Moskva-Leningrad, Hosenerhoizdat, 1963, 288 p.
29. Kish L. Nahrev i okhlazhdenie transformatorov, Per. s venherskoho M. A. Biki. Pod red. H.E. Tarle, Moscow, Enerhiia, 1980, 208 p.
30. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukhomel A. S. Teploperedacha. Moscow, Enerhoizdat, 1981, 416 p.
31. Bohoslovskii V. N. Teplovoi rezhim zdaniia. Moscow, Stroizdat, 1979, 248 p.