

В. В. ВАХНИНА
В. Н. КУЗНЕЦОВ
В. А. ШАПОВАЛОВ
И. В. ГОРОХОВ
А. Н. ЧЕРНЕНКО

УЧЕТ КОНСТРУКЦИИ БАКА ОДНОФАЗНОГО СИЛОВОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЕГО ПОВЕРХНОСТЕЙ

DESIGN OF A SINGLE-PHASE POWER AUTOTRANSFORMER TANK OF ELECTRIC POWER SYSTEMS AND CALCULATION OF ITS SURFACES TEMPERATURE

Разработана математическая модель, адекватно описывающая сложный профиль бака силового однофазного автотрансформатора большой мощности свыше 100 МВА. Определены тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля рассеяния на поверхностях бака и дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в стенках бака при насыщении магнитной системы автотрансформатора постоянным током, протекающим по заземленным обмоткам. Найдено множество наиболее нагретых точек бака автотрансформатора. Установлена зависимость максимальных значений скорости изменения температуры наиболее нагретых точек поверхности бака автотрансформатора АОД-ЦТН-267000/500/220 от величины постоянного тока.

Ключевые слова: тепловая мощность, силовой автотрансформатор, моделирование бака, подмагничивание постоянным током, наиболее нагретые точки стенок бака

A mathematical model has been developed that adequately describes the complex profile of a high-power single-phase autotransformer tank over 100 MVA. The tangential components of the magnetic field of dispersion on the surfaces of the tank and additional losses of active power from eddy currents in the walls of the tank are determined when the magnetic system of the autotransformer is saturated with direct current flowing through grounded windings. Many of the hottest points of the tank autotransformer are found. The dependence of the maximum values of the rate of change in the temperature of the most heated points on the surface of the tank of the autotransformer AODTSTN-267000/500/220 on the magnitude of the direct current was established.

Keywords: thermal power, power autotransformer, tank modeling, direct current biasing, the most heated points of the tank walls

Введение. Во время работы силового однофазного автотрансформатора (АТ) в его активных материалах (металле обмоток, стали магнитной системы и в массивных конструктивных элементах из конструкционной стали) возникают потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. Часть тепла идет на их нагревание, а другая часть отводится в окружающую среду. По мере роста температуры накопление тепла постепенно уменьшается, а теплоотдача увеличивается. В конечном итоге при длительном сохранении режима нагрузки повышение температуры прекращается и все выделяющееся тепло отдается в окружающую среду [1].

Чувствительность силовых трансформаторов и автотрансформаторов к нагрузкам выше номинальной зависит от их мощности. С увеличением мощности увеличивается плотность потока рассеяния и, как следствие, роль добавочных потерь от вихревых токов в баке.

При эксплуатации силовых однофазных автотрансформаторов возможно насыщение их магнитных систем от различных факторов [2–4]. При насыщении магнитной системы увеличиваются потоки

рассеяния и токи намагничивания. В баке автотрансформатора возникают дополнительные добавочные потери активной мощности от вихревых токов, которые дополнительно нагревают его. Нормы нагрева конструктивных элементов силовых трансформаторов и автотрансформаторов устанавливаются исходя из допустимых температур изоляционных материалов, соприкасающихся с их металлическими частями. При этом учитывается явление старения изоляции, определяющее срок службы трансформатора и его нагрузочную способность.

Главным риском является снижение электрической прочности вследствие образования пузырьков газа в области высокой напряженности электрического поля. Газовые пузырьки также могут образовываться на поверхности неизолированных металлических деталей, когда их температура вследствие увеличения индукции потока рассеяния повысится более 180 °С, что приведет к разложению масла [5]. Кроме того, температура масла в верхних слоях может превысить предельно допустимое значение 115 °С, регламентированное нормативными документами [6, 7].

Математическая модель бака однофазного силового автотрансформатора. Однофазные силовые автотрансформаторы большой мощности свыше 100 МВА на напряжение 500 кВ и выше имеют сложную форму бака. При определении поля рассеяния на поверхности бака замена сложной формы бака на соответствующую модель бака овальной формы даст ошибку при расчетах более 10 % [8]. Поэтому была разработана математическая модель бака однофазного силового автотрансформатора, полностью учитывающая его профиль. На рис. 1 представлен профиль бака однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 в плоскости $z = 0$.

Направляющая боковой поверхности бака была представлена в виде совокупности 5 кривых, обозначенных на рис. 1 римскими цифрами: I – дуга окружности; II – отрезок прямой; III – дуга окружности; IV – отрезок прямой; V – дуга окружности. Соответствующие кривые, образующие направляющую боковой поверхности бака, изображены на рис. 2. Начало системы координат совпадает с центром окружности III.

Кривые, изображенные на рис. 2, математически описываются следующими функциями:

$$y_1(x) = \sqrt{r_1^2 - (x - x_{c1})^2}, \quad (1)$$

$$y_2(x) = y_1(x_1) + \operatorname{tg}\alpha_3 \cdot (x - x_1), \quad (2)$$

$$y_3(x) = \sqrt{r_2^2 - (x - 0)^2}, \quad (3)$$

$$y_4(x) = r_1, \quad (4)$$

$$y_5(x) = \sqrt{r_1^2 - (x - x_4)^2}, \quad (5)$$

где r_1, r_2 – радиусы окружностей I, III, V; x_{c1} – координата центра окружности I; α_3 – угол наклона прямой II к оси x ; x_1, x_4 – координаты конца участков I и IV.

Начало системы координат совпадает с центром окружности III.

Функции (1) – (5) описывают профиль бака в явном виде. Для получения развертки боковой стенки бака кривую, представленную на рис. 1, следует задать в параметрическом виде, где параметром выступает длина кривой l .

Зависимости длины кривой от координаты x при условии, что эта координата отсчитывается от начала кривой, для кривых I–V описываются следующими выражениями:

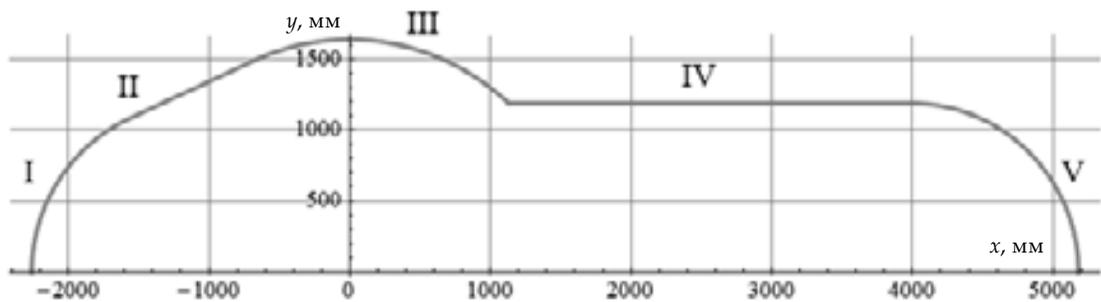


Рис. 1. Профиль бака силового однофазного автотрансформатора большой мощности АОДЦТН-267000/500/220

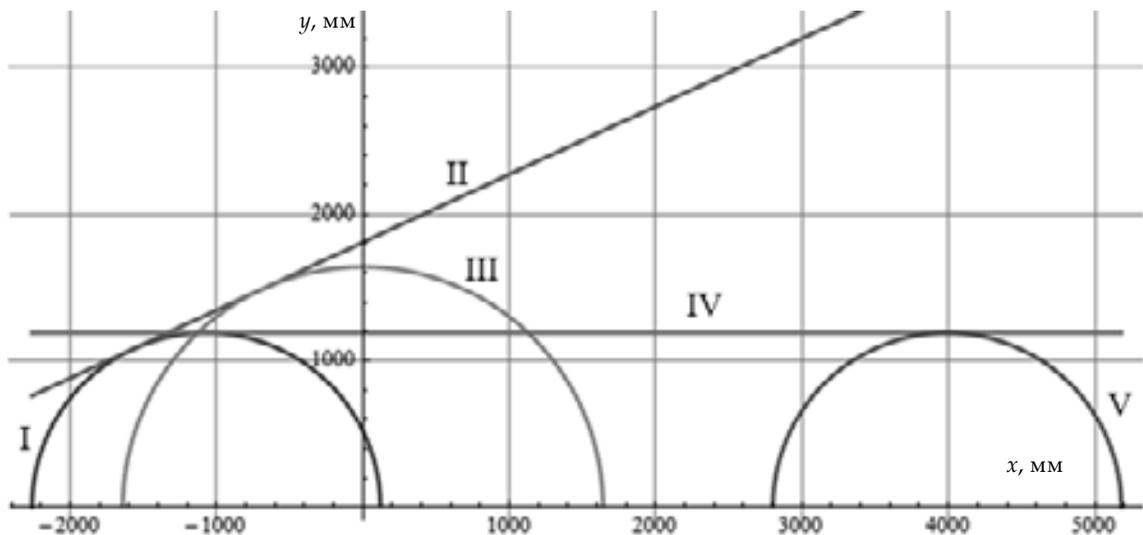


Рис. 2. Кривые, образующие направляющую боковой поверхности бака однофазного силового автотрансформатора

$$L_{x1}(x) = r_1 \cdot \arccos\left(1 - \frac{x}{r_1}\right), \quad (6)$$

$$L_{x2}(x) = \frac{x}{\cos(\arctg(\operatorname{tg}\alpha_2))}, \quad (7)$$

$$L_{x3}(x) = r_2 \cdot \left(\arccos\left(\cos\alpha_1 - \frac{x}{r_1}\right) - \alpha_2 \right), \quad (8)$$

$$L_{x4}(x) = x, \quad (9)$$

$$L_{x5}(x) = r_1 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arccos\frac{x}{r_1} \right), \quad (10)$$

где α_2 – угловой размер дуги окружности III.

Обратные зависимости координаты x_L от длины l кривой при условии, что эта длина отсчитывается от начала кривой, для кривых I–V представлены выражениями:

$$x_{L1}(l) = r_1 - r_1 \cdot \cos\left(\frac{l}{r_1}\right), \quad (11)$$

$$x_{L2}(l) = l \cdot \cos(\arctg(\operatorname{tg}\alpha_3)), \quad (12)$$

$$x_{L3}(l) = r_2 \cdot \cos\alpha_1 - r_2 \cdot \cos\left(\alpha_1 + \frac{l}{r_2}\right), \quad (13)$$

$$x_{L4}(l) = l, \quad (14)$$

$$x_{L5}(l) = r_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{l}{r_1}\right). \quad (15)$$

где α_2 – угловой размер дуги окружности III.

Зависимость координаты y_L от длины l кривой профиля бака, отсчитываемой от начала профиля, определяется выражением

$$y_L(l) = y(x_L(l)), \quad (16)$$

где функция $y(x)$ задана формулами (1) – (5).

Совокупность функций (11) – (16) задает профиль бака в требуемом параметрическом виде $\{x(l), y(l)\}$, где параметром выступает длина кривой l . Кривая, построенная с использованием параметрического задания кривой в виде $\{x(l), y(l)\}$, полностью совпадает с кривой, построенной на основе функции $y(x)$, заданной в явном виде.

Для нахождения тангенциальных компонент напряженности магнитного поля на боковой поверхности бака АТ необходимо построение единичного вектора касательной к кривой профиля. Такой вектор можно охарактеризовать углом наклона касательной α_L к оси x . Зависимости угла наклона касательной α_L от длины l кривой профиля боковой поверхности бака при условии, что эта длина отсчитывается от начала кривой, для кривых I–V определяются формулами:

$$\alpha_{L1}(l) = \frac{\pi}{2} - \frac{l}{r_1}, \quad (17)$$

$$\alpha_{L2}(l) = \arctg(\operatorname{tg}\alpha_2), \quad (18)$$

$$\alpha_{L3}(l) = \frac{\pi}{2} - \left(\alpha_1 + \frac{l}{r_1} \right), \quad (19)$$

$$\alpha_{L4}(l) = 0, \quad (20)$$

$$\alpha_{L5}(l) = -\frac{l}{r_1}. \quad (21)$$

Зависимость угла наклона касательной α_L от координаты x задается формулой

$$\alpha_L(x) = \alpha_L(L_x(x)), \quad (22)$$

где функция $L_x(x)$ задана формулами (6) – (10).

Полученные формулы и зависимости составляют адекватную математическую модель бака силового однофазного АТ, которая позволяет определить тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля рассеяния на поверхностях бака АТ и вычислить потери в стенках бака.

Расчет тангенциальных составляющих магнитного поля на поверхностях бака однофазного силового автотрансформатора. Расчет магнитного поля рассеяния силового однофазного АТ в области бака ведется методом, изложенным в [9]. При этом общую обмотку и последовательную обмотку АТ заменяем одной бесконечно тонкой обмоткой, по которой течет ток намагничивания, приведенный к общей обмотке.

Расчет магнитного поля рассеяния на стенках бака АТ проведен в прямоугольной (x, y, z) и цилиндрической (r, φ, z) системах координат. Переход от одной системы координат к другой осуществляется по стандартным формулам.

Расчет магнитного поля рассеяния на стенках бака проведен на примере силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 с учетом полученной математической модели бака для однофазного АТ при насыщении его магнитной системы постоянным током, протекающим по его заземленным обмоткам.

Любая точка на боковой поверхности бака АТ задается координатами (l, z) ; переход к координатам (x, y, z) осуществляется по формулам (11) – (16):

$$\begin{cases} x = x_L(l), \\ y = y(x_L(l)), \\ z = z. \end{cases} \quad (23)$$

Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_{τ} на боковой поверхности АТ рассчитана по формуле

$$H_{\tau}(l, z) = \sqrt{\left(H_x(l, z) \cdot \cos\alpha_L(l, z) + H_y(l, z) \cdot \sin\alpha_L(l, z) \right)^2 + \left(H_z(l, z) \right)^2}, \quad (24)$$

где $\alpha_L(l, z)$ – угол наклона касательной к профилю в точке с координатами (l, z) . Угол $\alpha_L(l, z)$ вычисляется по формулам (17)–(21).

Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_t на верхней поверхности бака АТ определена по формуле

$$H_t(x, y) = \sqrt{(H_x(x, y))^2 + (H_y(x, y))^2}. \quad (25)$$

На рис. 3 представлен трехмерный график тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t на боковой поверхности бака АТ.

Из рис. 3 видно, как меняется величина тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния H_t на сложной боковой поверхности бака силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 в зависимости от длины l кривой профиля боковой поверхности бака и координаты z . Наибольшее значение лежит в плоскости $z = 0$ при изменении l от 1,5 до 3,5 м.

Полученные значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния использованы для вычисления дополнительных потерь активной мощности от вихревых токов в баке силового однофазного автотрансформатора.

Расчет дополнительных потерь мощности в баке силового, АТ. Расчет дополнительных потерь активной мощности в баке силового однофазного АТ от вихревых токов при насыщении его магнитной системы постоянным током, протекающим по заземленным обмоткам, решается с применением теории плоских волн и линеаризации свойств стали [9]. На основании найденного распределения тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля рассеяния у поверхности бака силового однофазного АТ определены удельные потери активной мощности в баке для каждой n -й гармонической составля-

ющей тока намагничивания. Удельные потери затем проинтегрированы по поверхностям бака.

Удельные потери в баке пропорциональны квадрату тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t на поверхности бака АТ и определяются формулой

$$P_n = \frac{1}{2} k_\phi r_{n(1)} \sqrt{n} \cdot k_H^2 \cdot H_t^2 = k \sqrt{n} \cdot H_t^2, \quad (26)$$

где H_t – амплитудное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в данной точке на поверхности бака; k_ϕ – коэффициент, равный 1,1–1,2 для конструкционной стали [10] (при расчетах полагали $k_\phi = 1,15$); $r_{n(1)}$ – поверхностное сопротивление на частоте $f = 50$ Гц, для глубины проникновения $\delta = 0,7$ мм составляет $r_{n(1)} = 2,06 \cdot 10^{-4}$ Ом; n – номер гармоники; $k_H = 2$ – коэффициент, учитывающий влияние бака на поле обмоток. Для глубины проникновения $\delta = 0,7$ мм коэффициент k составляет $k = 4,735 \cdot 10^{-4}$ Ом [10].

Исследование на максимум функций двух переменных $H_t(l, z)$, $H_t(x, y)$, описывающих тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля H_t на боковой и верхней поверхностях бака АТ, показало, что максимальное значение H_t в обоих случаях достигается не в одной точке, а представлено множеством точек.

На боковой поверхности бака однофазного АТ геометрическое множество наиболее нагретых точек с максимальным значением тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля рассеяния H_t находится на кривой III профиля бака (см. рис. 1) в виде дуги окружности радиуса $r_2 = 1,64$ м, расположенной в плоскости $z = 0$.

На верхней поверхности бака однофазного АТ геометрическое множество наиболее нагретых точек с максимальным значением H_t представляет собой окружность радиуса $r_{HHT} = 1,069$ м.

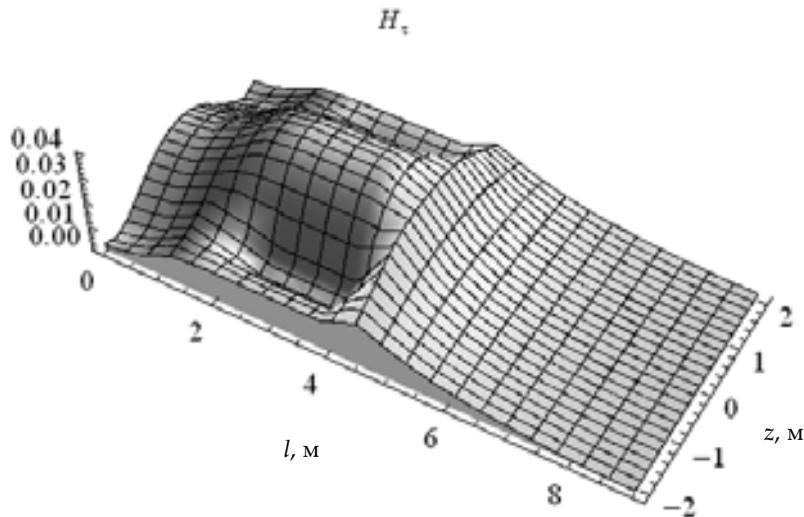


Рис. 3. Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_t на боковой поверхности бака АТ

Определим линии уровня удельных потерь активной мощности на боковой и верхней поверхностях бака силового однофазного АТ АОДЦТН-267000/500/220 при насыщении его магнитной системы постоянным током $I = 65$ А, протекающим по заземленным обмоткам АТ. На рис. 4 приведены топографические изображения удельных потерь активной мощности на боковой (рис. 4, а) и верхней (рис. 4, б) поверхностях бака АТ с линиями уровня

при воздействии постоянного тока. Большие значения удельных потерь обозначены белым цветом, меньшие – черным.

Определены суммарные потери активной мощности на боковой и верхней поверхностях бака АТ и в целом в баке АТ при насыщении его магнитной системы постоянным током, протекающими по заземленным обмоткам. В таблице представлены удельные и суммарные потери на поверхностях бака АТ при $I = 65$ А.

Удельные и суммарные потери на поверхностях бака однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 при $I = 65$ А

Поверхность	Боковая	Верхняя	Всего бака
Максимальные удельные потери, кВт/м ²	9,20	4,79	9,20
Средние удельные потери, кВт/м ²	1,78	2,19	1,91
Суммарные потери, кВт	66,58	39,37	211,90

В результате выполненных расчетов получено, что суммарные потери активной мощности в баке автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 составили 211,9 кВт.

В результате проведенных исследований установлена зависимость суммарных потерь в баке силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 от величины постоянного тока, протекающего по его заземленным обмоткам (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что потери активной мощности от вихревых токов в баке АТ АОДЦТН-267000/500/220 при насыщении его магнитной системы постоянным током, протекающим по заземленным обмоткам, нелинейно возрастают с увеличением тока. Однако суммарные потери активной мощности в баке не дают представления о распределении потерь в наиболее нагретой точке (ННТ) боковой поверхности бака, где наблюдаются максимальные удельные потери, а следовательно, и о локальном повышении температуры

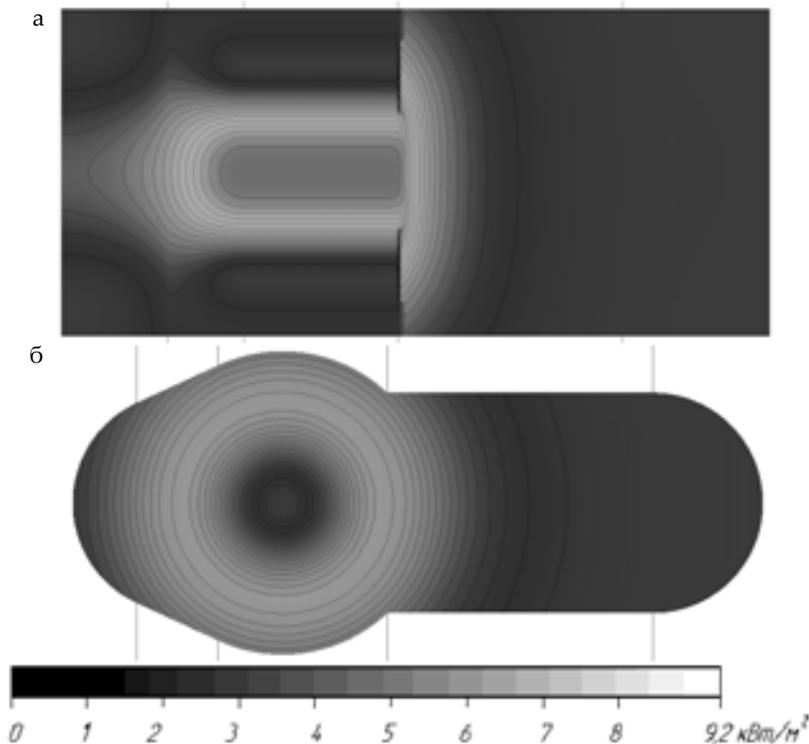


Рис. 4. Топографическое изображение удельных потерь активной мощности на боковой (а) и верхней (б) поверхностях бака силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 с линиями уровня при воздействии постоянного тока, $I = 65$ А

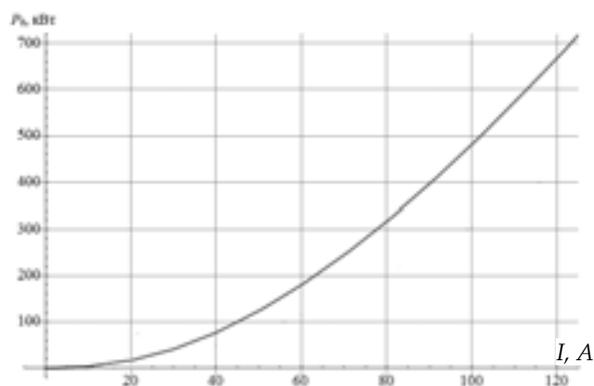


Рис. 5. Зависимость суммарных потерь в баке АТ АОДЦТН-267000/500/220 от постоянного тока

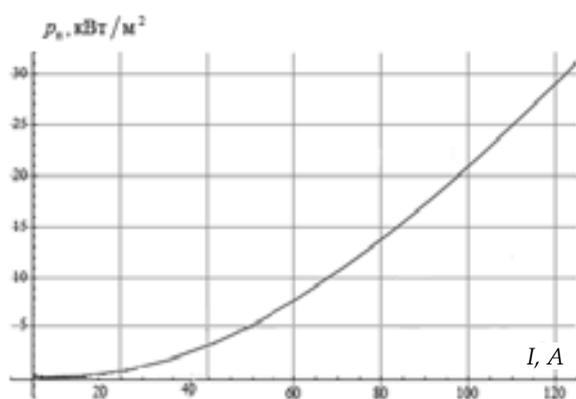


Рис. 6. Зависимость удельных потерь в ННТ на боковой поверхности бака автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 от постоянного тока

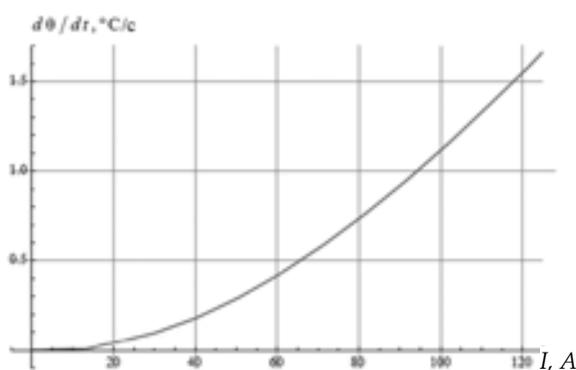


Рис. 7. Зависимость максимальных значений скорости изменения температуры в ННТ на боковой поверхности бака АТ от величины постоянного тока

в этих точках. Поэтому была определена зависимость удельных потерь в ННТ боковой поверхности бака автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 от постоянного тока (рис. 6).

Расчеты показали, что удельные дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в наиболее нагретой точке бака силового однофаз-

ного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 нелинейно зависят от величины квазипостоянного тока, протекающего по его заземленным обмоткам. При отсутствии процессов теплообмена и теплопроводности тепловая мощность, выделяющаяся в слое бака толщиной $\delta = 0,7$ мм, будет расходоваться на увеличение температуры геометрического множества наиболее нагретых точек этого слоя.

Скорость изменения температуры ННТ бака не остается постоянной во время действия постоянного тока на автотрансформатор. В начальный момент времени она принимает максимально возможные значения. При увеличении температуры ННТ бака скорость изменения температуры снижается.

Полученная расчетным путем зависимость максимальных значений скорости изменения температуры геометрического множества ННТ на боковой поверхности бака АТ АОДЦТН-267000/500/220 от величины постоянного тока приведена на рис. 7.

При времени насыщения $t = 3600$ с и более магнитной системы силового однофазного автотрансформатора постоянным током, за счет процессов теплопроводности и теплообмена тепловая мощность, выделяющаяся в слое бака толщиной $\delta = 0,7$ мм из-за увеличения магнитного поля рассеяния, будет нагревать дополнительно бак и, как следствие, трансформаторное масло. При этом температура масла в верхних слоях может превышать допустимое значение в 115 °С.

Выводы. 1. Разработана математическая модель, которая адекватно описывает сложный профиль бака силового однофазного автотрансформатора большой мощности свыше 100 МВА на напряжение 500 кВ и выше.

2. Разработанная математическая модель бака силового однофазного автотрансформатора позволяет определить тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля рассеяния на поверхностях бака и вычислить дополнительные потери активной мощности от вихревых токов в стенках бака.

3. Установлено, что максимальное значение удельных потерь p_n на боковой поверхности бака достигается не в одной наиболее нагретой точке, а представлено множеством наиболее нагретых точек, которые находятся (см. рис. 1) на кривой III профиля бака в виде дуги окружности радиуса $r_2 = 1,64$ м, расположенной в плоскости $z=0$.

4. Установлена зависимость максимальных значений скорости изменения температуры геометрического множества наиболее нагретых точек на боковой поверхности бака АТ АОДЦТН-267000/500/220 от величины постоянного тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Ленанд, 2014. 528 с.
2. Васильев А.Б., Лурье А.И. Расчет магнитного поля и электродинамической стойкости трансформаторов

при бросках намагниченного тока // Электричество. 1992. №1.С. 21-26

3. *Takasu N.* An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents / N. Takasu, T. Oshi, F. Miyawaki, S. Saito, Ya. Fujiwara // IEEE Transactions on power Delivery. Vol. 9, No.2. Pp. 1173-1179.

4. *Walling R.A., Khan A.H.* Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances // IEEE Trans on Power Delivery. 1991. Vol. 6, №4, Pp. 1707-1714.

5. Силовые трансформаторы: справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.

6. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых трансформаторов. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01.01. Минск: Изд-во стандартов, 2001.

Об авторах:

ВАХНИНА Вера Васильевна

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (927)214-17-00
E-mail: VVVahnina@yandex.ru

КУЗНЕЦОВ Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (848)253-92-82
E-mail: V.Kuznetsov@tltsu.ru

ШАПОВАЛОВ Владимир Андреевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (927)216-81-02
E-mail: V.Shapovalov@tltsu.ru

ГОРОХОВ Илья Васильевич

ассистент кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (960)847-32-14
E-mail: alf19888@gmail.com

ЧЕРНЕНКО Алексей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. (917)134-24-22
E-mail: A.Chernenko@tltsu.ru

7. МЭК 354-91. Loading guide for oil – immersed power transformers. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01.01. Минск: Изд-во стандартов, 2001.

8. *Appanasewicz S., Miksa G., Przybylak D.* Ocena wpływu krzywizny rdzenia, uzwojeń i ściany kadzi transformatora n. rozkład pola elektromagnetycznego // Rozpr. Elektrot. 22, nr. 1. 1976. S. 27–40.

9. *Туровский Я.* Электромагнитные расчеты элементов электрических машин: пер. с польск. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.

10. *Лейтес Л.В.* Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.

VAKHNINA Vera V.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Energy Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. (927)214-17-00
E-mail: VVVahnina@yandex.ru

KUZNETSOV Vladimir N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Energy Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. (848)253-92-82
E-mail: V.Kuznetsov@tltsu.ru

SHAPOVALOV Vladimir A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Energy Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. (927)216-81-02
E-mail: V.Shapovalov@tltsu.ru

GOROKHOV Ilya V.

Assistant of the Energy Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. (960)847-32-14
E-mail: alf19888@gmail.com

CHERNENKO Alexey N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Energy Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. (917)134-24-22
E-mail: A.Chernenko@tltsu.ru

Для цитирования: Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Горохов И.В., Черненко А.Н. Учет конструкции бака однофазного силового автотрансформатора электроэнергетических систем при расчете температуры его поверхностей // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №3. С. 130-136. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.24.

For citation: *Vakhnina V.V., Kuznetsov V.N., Shapovalov V.A., Gorokhov I.V., Chernenko A.N.* Design of a Single-phase Power Autotransformer Tank of Electric Power Systems and Calculation of its Surfaces Temperature // Urban Construction and Architecture. 2018. V.8, №3. Pp. 130-136. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.24.