

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 621.314.222

DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.20

В.В. ВАХНИНА
А.А. КУВШИНОВ
В.Н. КУЗНЕЦОВ
В.А. ШАПОВАЛОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОСТОРОННЕГО НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

SIMULATION OF ONE-SIDED SATURATION OF MAGNETIC SYSTEMS OF ELECTRIC
POWER SYSTEMS POWER TRANSFORMERS

Разработана методика моделирования магнитных полей силовых трансформаторов в среде программного продукта FEMM 4.2 с учетом конструктивной схемы и реальных геометрических размеров магнитной системы и бака, квазипостоянных составляющих тока в обмотках высокого напряжения, экспериментальных характеристик намагничивания электротехнической и конструкционной стали. Моделирование магнитных полей магнитных систем стержневой и бронестержневой конструкций выполнено на примере серийных силовых трансформаторов ТРДН-63000/115/6,3/6,3 и ТДЦ-400000/242/20. Определены зависимости средних значений индукции в центральных сечениях стержней и боковых ярм от величины квазипостоянных токов. Показано, что насыщение магнитной системы стержневой конструкции начинается с крайних стержней при кратности квазипостоянного тока, равной 2,2 относительно номинального фазного тока обмотки высокого напряжения. Насыщение магнитной системы бронестержневой конструкции начинается с боковых ярм при кратности квазипостоянного тока, равной 2,63 относительно паспортного значения тока холостого хода.

Ключевые слова: силовой трансформатор, магнитная система, квазипостоянный ток, одностороннее насыщение

Введение. В электроэнергетических системах (ЭЭС) эксплуатируются силовые трансформаторы

A technique for modeling the magnetic fields of power transformers in the environment of the software product FEMM 4.2 is developed taking into account the design scheme and real geometric dimensions of the magnetic system and tank, quasi-permanent current components in high-voltage windings, and the experimental magnetization characteristics of electrical and structural steel. Modeling of magnetic fields of magnetic systems of rod and armored rod structures is carried out on the example of serial power transformers TRDN-63000/115 / 6.3 / 6.3 and TDTs-400000/242/20. The dependences of the mean values of induction in the central cross sections of the rods and side yokes on the quasi-constant currents are determined. It is shown that the saturation of the magnetic system of the rod structure begins with the outer rods at a multiplicity of quasi-constant current equal to 2.2 relative to the nominal phase current of the high-voltage winding. The saturation of the magnetic system of the armored rod structure begins with the lateral yokes at a multiplicity of the quasi-constant current equal to 2.63 with respect to the idle current rating.

Keywords: power transformer, magnetic system, quasi-constant current, one-sided saturation

различных мощностей и классов напряжения в трехфазном исполнении или в виде группы

однофазных трансформаторов. При эксплуатации силовых трансформаторов возможно возникновение условий, вызывающих насыщение магнитных систем:

- под воздействием аperiodических составляющих токов, протекающих по обмоткам при включении силового трансформатора под напряжение, при коротких замыканиях в примыкающей ЭЭС [1, 2];

- при воздействии квазипостоянных токов (КПТ), частота которых не превышает 0,1 Гц, природного (геомагнитные бури, геоэлектрические источники) [3, 4] или техногенного (статические преобразователи, дуговые сталеплавильные печи и др.) [5] происхождения. Частота квазипостоянных токов составляет от 0,1 до 0,00001 Гц [3], поэтому при рассмотрении вопросов насыщения магнитных систем силовых трансформаторов ЭЭС можно считать КПТ неизменными на периоде напряжения питающей электрической сети и создаваемые ими магнитные потоки – постоянными.

Процесс насыщения вызывает изменение картины распределения магнитных потоков по элементам магнитной системы силового трансформатора, следствием которого является увеличение потоков рассеяния и токов намагничивания. Последний приобретает однополярный характер и служит источником интенсивных высших гармоник тока [6].

Продолжительность воздействия аperiodических составляющих токов в аварийных режимах и переходных процессах не превышает, как правило, нескольких секунд и не оказывает заметного влияния на тепловой режим работы силового трансформатора. Продолжительность воздействия КПТ и соответственно работы магнитной системы с односторонним насыщением может достигать нескольких часов и даже суток и способно оказать существенное влияние на тепловой режим силового трансформатора. Однако степень влияния КПТ на картину распределения магнитных потоков существенно зависит от конструктивной схемы магнитной системы силового трансформатора. В этой связи актуальной является задача моделирования магнитных потоков и определения величины магнитной индукции в различных элементах (стержни, ярма) магнитной системы силовых трансформаторов электроэнергетических систем для типовых конструктивных схем в условиях одностороннего насыщения. В данной работе поставленная задача решается с использованием программного продукта FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics. Version 4.2) [7].

Типовые конструктивные схемы магнитных систем силовых трансформаторов. Для силовых трехфазных трансформаторов мощностью до 100 МВА используется плоская стержневая магнитная система (рис. 1, а), а для трехфазных трансформаторов мощностью свыше 100 МВА используется, как правило, плоская бронестержневая система (рис. 1, б). На

рис. 1 цифрами обозначены основные конструктивные элементы магнитной системы: 1, 2, 3 – стержни с фазными обмотками, 4 – ярмо, 5 – боковое ярмо [8].

При протекании квазипостоянного тока $I_{\text{КПТ}}$ в обмотках высокого напряжения силовых трансформаторов для построения картин магнитных полей Φ_0 (рис.1) и расчета численных значений магнитной индукции B_0 с учётом нелинейности кривых намагничивания электротехнической стали магнитной системы и конструкционной стали бака используется модель в виде плоскопараллельной структуры. Моделирование в среде программного продукта FEMM позволяет рассчитывать магнитные поля методом конечных элементов [9].

Основное уравнение, используемое для численного расчёта стационарного магнитного поля в программном продукте FEMM, формулируется в терминах магнитного потенциала A [7]. В случае нелинейной связи между индукцией B_0 и напряжённостью H_0 магнитного поля Φ_0 обусловленной насыщением магнитных материалов при протекании КПТ, основное уравнение векторного потенциала магнитного поля записывается в виде [7, 9]:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_{d(s)}(B_0)} \right) \text{rot} \vec{A} = \vec{\delta}, \quad (1)$$

где $\vec{\delta}$ – плотность электрического тока сторонних источников; $\mu_{d(s)}(B_0)$ – относительная дифференциальная магнитная проницаемость электротехнической стали, зависящая от B_0 в случае насыщения магнитных материалов; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

В случае плоскопараллельного магнитного поля векторный потенциал имеет только одну компоненту, например A_y , если совместить ось y декартовой системы координат с направлением электрических токов (вектора $\vec{\delta}$). Тогда (1) превращается в скалярное дифференциальное уравнение в частных производных эллиптического типа

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} - \frac{1}{\mu_{d(s)}} \left(\frac{\partial \mu_{d(s)}}{\partial x} \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial \mu_{d(s)}}{\partial y} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = -\mu_0 \mu_{d(s)} \delta_y, \quad (2)$$

решением которого является компонента A_y векторного потенциала магнитного поля. Затем простым дифференцированием компоненты A_y могут быть определены индукция B_0 и напряжённость H_0 магнитного поля Φ_0 .

При решении уравнений в частных производных методом конечных элементов строится сеть конечных элементов [9]. В случае двумерной задачи конечные элементы чаще всего имеют форму треугольников или прямоугольников, которые не перекрывают друг друга. При расчете двумерного магнитного поля методом конечных элементов потенциал A_y каждого i -го конечного треугольного элемента представляется в виде полинома первого порядка с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами

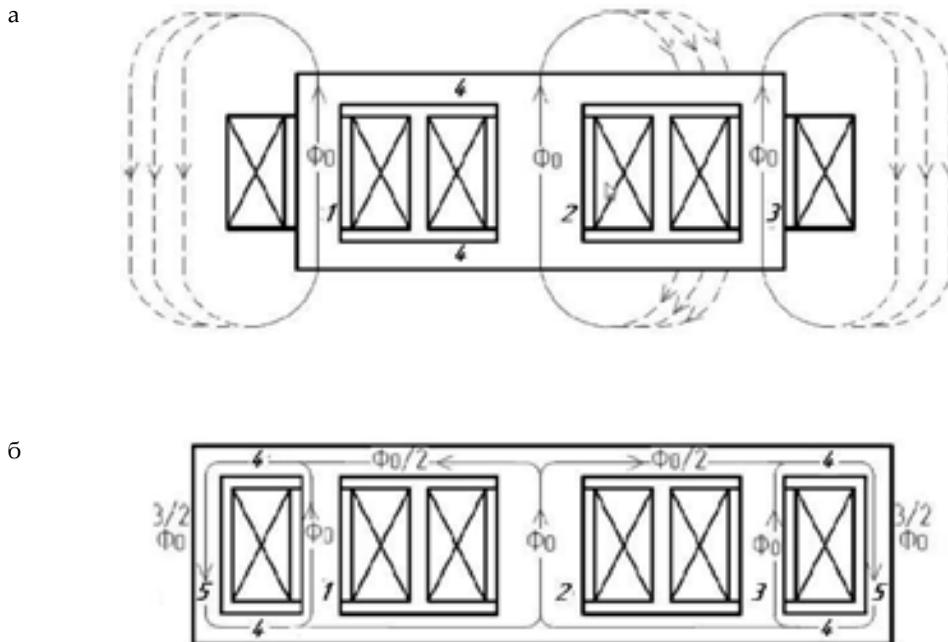


Рис.1. Стержневая (а) и бронестержневая (б) конструктивные схемы магнитных систем силовых трансформаторов

$A_{y(i)} = a_{(i)} + b_{(i)} \cdot x + c_{(i)} \cdot z,$ (3)
 где $a_{(i)}, b_{(i)}, c_{(i)}$ – неизвестные постоянные коэффициенты.

Определив коэффициенты $a_{(i)}, b_{(i)}, c_{(i)}$ в полиноме (3) для всех конечных элементов, получаем возможность расчета магнитного потенциала в любой точке исследуемой области.

Сведение задачи расчета магнитного поля к системе линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов основано на принципе минимума энергии, запасенной в поле. Полученная система уравнений позволяет рассчитать искомые коэффициенты полиномов всех конечных элементов [9]. Для решения системы уравнений применяется итерационный метод сопряжённых градиентов, поскольку получаемые матрицы являются симметричными и весьма разреженными. Учитываются только ненулевые элементы матриц, расположенные на главной диагонали и выше главной диагонали. При расчёте магнитного поля на основе векторного потенциала используется специальная сглаживающая методика, позволяющая восстановить точность, теряемую при дифференцировании линейных функций.

Моделирование магнитного поля силовых трансформаторов при одностороннем насыщении. Задача нахождения векторного потенциала является краевой и требует задания граничных условий. Программный продукт FEMM [7] располагает несколькими способами решения проблемы открытых границ. Здесь имеется в виду ограничение размеров модели системы, поле которой простирается на бесконечность. Самый простой способ решения этой проблемы – создать модель с границами, рас-

положенными достаточно далеко от самой системы. Тогда на этих внешних границах можно принять как условие Дирихле (равенство потенциала нулю), так и условие Неймана (равенство нулю нормальной производной от потенциала). Однако этот способ требует построения конечно-элементной сетки на значительном удалении от магнитной системы. Чем больше расстояние от внешних точек системы до границы, тем точнее будет расчет, но для него потребуется больше ресурсов компьютера.

Второй способ решения проблемы открытых границ состоит в приложении к границе в виде окружности асимптотических граничных условий

$$\frac{\partial A_y}{\partial r} + \frac{n}{r} A_y = 0, \quad (4)$$

где r – радиус окружности, удалённой от внешних точек исследуемой системы; n – номер главной гармоники пространственного разложения векторного потенциала (обычно $n = 1$).

Поскольку программный продукт FEMM поддерживает смешанные граничные условия вида

$$\frac{1}{\mu_{d(s)}\mu_0} \frac{\partial A_y}{\partial r} + c_0 A_y + c_1 = 0, \quad (5)$$

то условие Неймана будет выполняться на окружности радиуса r_0 ($\mu_{d(s)} = 1$), если положить константы c_0, c_1 равными

$$c_0 = \frac{n}{\mu_0 r_0}, \quad c_1 = 0. \quad (6)$$

При моделировании магнитного поля силового трансформатора использован второй способ решения проблемы открытой границы.

На рис. 2 приведены модели для расчёта магнитного поля Φ_0 , созданные в программном продукте FEMM, для серийных силовых трансформаторов со стержневой конструкцией магнитной системы ТРДН-63000/115/6,3/6,3 (а) и бронестержневой конструкции магнитной системы ТДЦ-400000/242/20 (б). В силу горизонтальной симметрии размер модели уменьшен в два раза, и на рис. 2 показаны только верхние части силовых трансформаторов. При моделировании магнитного поля Φ_0 принято:

- для ТРДН-63000/115/6,3/6,3 – $r_0 = 3$ м, $c_0 = 265258 \text{ Ф}^{-1}$;
- для ТДЦ-400000/242/20 – $r_0 = 5$ м, $c_0 = 159155 \text{ Ф}^{-1}$;

На рис. 2 видна сетка из треугольных конечных элементов, созданная программой-триангулятором.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

[Current-pl:320], [Current-pl:173] – ток первой фазы, текущий в положительном направлении; 320

и 173 – половина числа витков обмоток ВН соответственно ТРДН-63000/115/6,3/6,3 и ТДЦ-400000/242/20;

[Current-m1:320], [Current-m1:173] – ток первой фазы, текущий в отрицательном направлении;

[Current-p2:320], [Current-p2:173];

[Current-m2:320], [Current-m2:173] – соответствующие обозначения для токов второй фазы;

[Current-p3:320],

[Current-p3:173];

[Current-m3:320], [Current-m3:173] – соответствующие обозначения для токов третьей фазы;

Air – немагнитный материал.

Моделирование магнитных полей Φ_0 силовых трансформаторов, создаваемых КПП, протекающими в фазных обмотках, проведено с использованием экспериментальных кривых намагничивания электротехнической S7 и конструкционной S8 стали, изображенных на рис. 3. При значениях $H > 60000 \text{ А/м}$

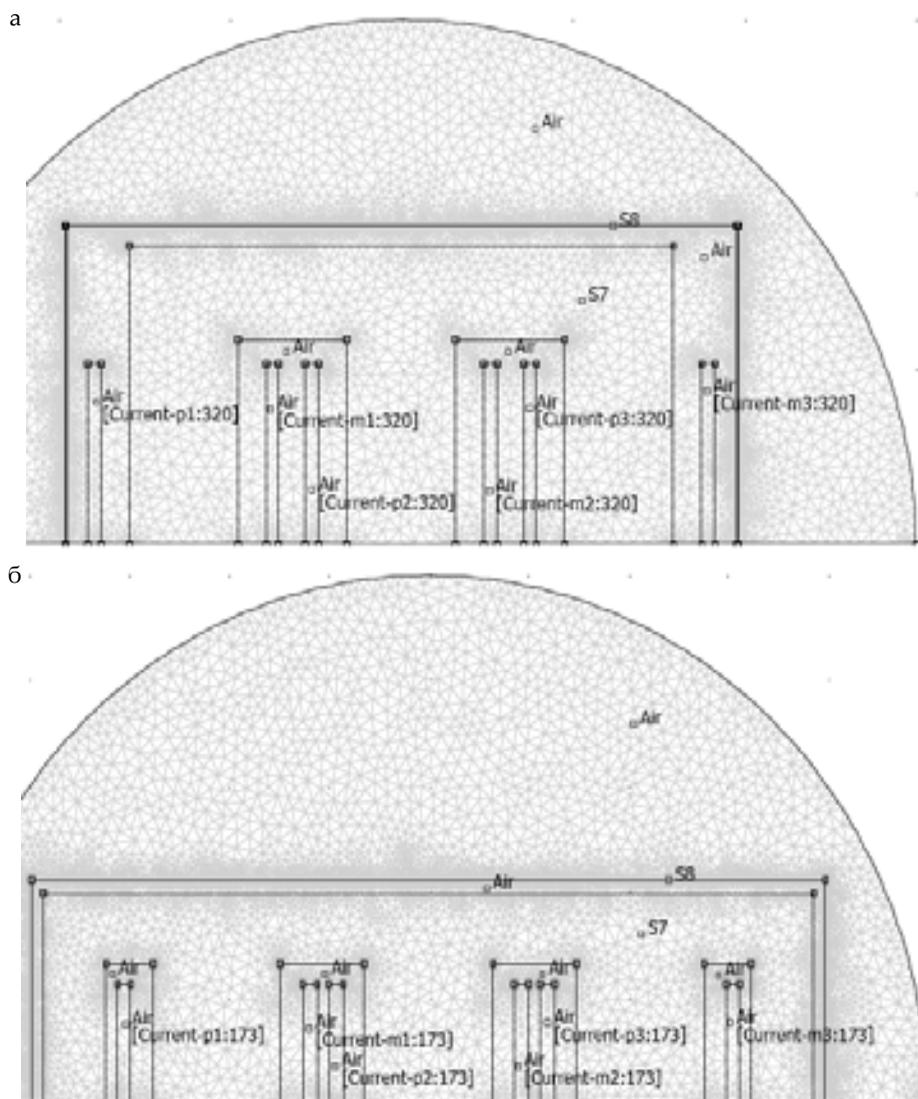


Рис. 2. Модели силовых трансформаторов ТРДН-63000/115/6,3/6,3 (а) и ТДЦ-400000/242/20 (б) для расчёта магнитного поля Φ_0 в программном продукте FEMM

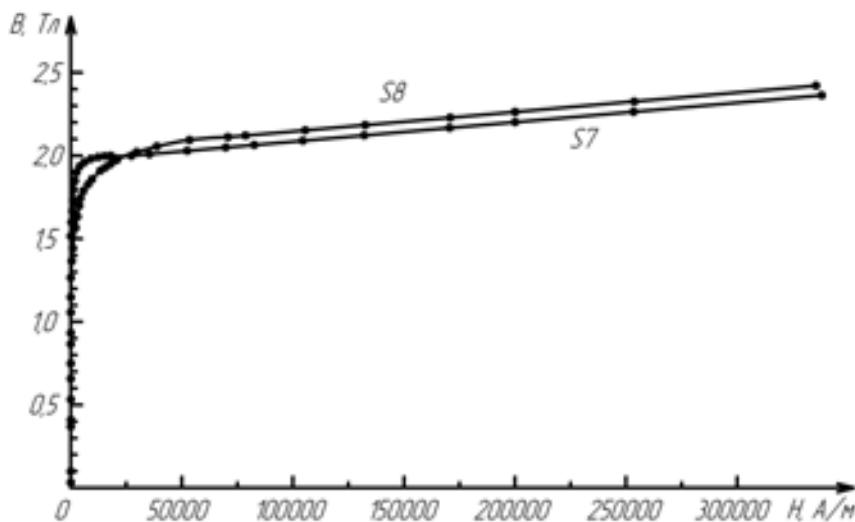


Рис. 3. Кривые намагничивания электротехнической S7 и конструкционной S8 стали ($H = 0 \div 320000$ А/м)

кривые намагничивания становятся прямыми параллельными линиями с углом наклона, равным μ_0 .

Картины силовых линий магнитных полей Φ_0 для ТРДН-63000/115/6,3/6,3 и ТДЦ-400000/242/20 приведены на рис. 1. Одинаковые КПП создают намагничивающие силы одной величины и одного направления, поэтому в случае ТРДН-63000/115/6,3/6,3 создаваемые этими токами магнитные потоки не могут замыкаться через сердечник силового трансформатора и вытесняются друг друга, замыкаясь через бак и окружающее воздушное пространство (рис. 1, а).

В ТДЦ-400000/242/20 имеется возможность для замыкания силовых линий магнитного поля Φ_0 внутри магнитной системы силового трансформатора,

поэтому магнитные потоки таких токов сосредоточены почти целиком в сердечнике (рис. 1, б). Соответствующие магнитные потоки пропорциональны средним значениям индукции B_{oi} , которые могут быть определены для каждого поперечного сечения стержня и ярма магнитной системы силового трансформатора.

В качестве примера в таблице представлены смоделированные зависимости средних значений магнитной индукции B_{oi} от величины $I_{КПП}$ в центральных поперечных сечениях стержней 1, 2, 3 для силового трансформатора ТРДН-63000/115/6,3/6,3 и стержней 1, 2, 3 и бокового ярма 5 для силового трансформатора ТДЦ-400000/242/20.

Значения средней магнитной индукции B_{oi} в отдельных конструктивных элементах магнитных систем силовых трансформаторов при вариациях квазипостоянного тока $I_{КПП}$

$I_{КПП}$ А	B_{oi} Тл				
	ТРДН-63000/115/6,3/6,3		ТДЦ-400000/242/20		
	1,3	2	2	1,3	5
0	0	0	0	0	0
1	0,002	0,0018	0,019	0,074	0,167
2	0,005	0,0046	0,04	0,147	0,334
4	0,01	0,008	0,078	0,295	0,669
6	0,015	0,01	0,116	0,442	1,002
8	0,019	0,015	0,155	0,59	1,336
10	0,024	0,018	0,194	0,737	1,67
12	0,028	0,021	0,198	0,746	1,691
14	0,032	0,024	0,203	0,754	1,712
16	0,035	0,027	0,207	0,763	1,733
18	0,039	0,0285	0,212	0,771	1,754
20	0,043	0,031	0,216	0,78	1,774
30	0,063	0,045	0,231	0,788	1,794
40	0,077	0,055	0,246	0,796	1,814
50	0,095	0,065	0,261	0,804	1,834

В силовых трансформаторах со стержневой магнитной системой (ТРДН-63000/115/6,3/6,3) магнитные силовые линии постоянного потока замыкаются через немагнитные зазоры и бак трансформатора, как показано на рис. 1, а. Наличие на пути постоянного магнитного потока большого магнитного сопротивления немагнитных зазоров многократно снижает величину индукции. Индукция магнитного поля в крайних стержнях 1 и 3 магнитной системы одинакова и возрастает практически линейно со скоростью $0,2 \cdot 10^{-2}$ Тл/А, достигая примерно 0,095 Тл при величине КПП, равной 50 А. Величина индукции в центральном стержне 2 значительно меньше индукции в крайних стержнях 1 и 3, например, на 20 % при КПП величиной 20 А и уже на 37 % при КПП величиной 50 А. Такая неравномерность в распределении постоянных магнитных потоков в плоской стержневой магнитной системе объясняется более близким расположением крайних стержней 1 и 3 к стенкам бака, чем центрального стержня 2. При практически одинаковых характеристиках намагничивания электротехнической и конструкционной стали (рис. 3) магнитные силовые линии центрального стержня 2 замыкаются по значительно более протяженным немагнитным промежуткам. Угол наклона зависимости $B_m(I_{\text{КПП}})$ для крайних стержней 1 и 3 определяется практически линейным магнитным сопротивлением немагнитных промежутков, геометрия которых остается неизменной. Поэтому среднее значение индукции в стержнях 1 и 3 достигает порога насыщения ($\approx 1,67$ Тл) при увеличении КПП примерно до 700 А (превышает номинальный фазный ток обмотки ВН в 2,2 раза). Для полного насыщения стержневой магнитной системы, включая и центральный стержень 2, величина КПП должна возрасти до 1186 А (превышает номинальный фазный ток в 3,7 раза). Это вполне согласуется с количественными оценками, полученными в [10] на основе кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания электротехнической стали.

В силовых трансформаторах с бронестержневой магнитной системой (ТДЦ-400000/242/20) силовые линии постоянного магнитного поля в основном замыкаются через боковые ярма, как показано на рис. 1, б. Магнитные потоки, проходящие через боковые ярма 5, складываются из потоков крайних стержней 1 и 3 и половины потока центрального стержня 2 ($3/2 \Phi_0$). Поэтому уже при КПП величиной 10 А (в 2,63 раза превышает паспортное значение тока холостого хода) среднее значение магнитной индукции в центральных сечениях боковых ярм 5 достигает значения насыщения (1,67 Тл). До насыщения магнитной системы при увеличении КПП на 1 А среднее значение индукции в боковых ярмах 5 возрастало на 0,166 Тл, а после насыщения только на 0,0049 Тл, т. е. медленнее почти в 33 раза. Поэтому при дальнейшем увеличении КПП до 50 А среднее

значение индукции в боковых ярмах 5 возрастает только до 1,834 Тл, т. е. только на 0,164 Тл. Кроме того, в крайних стержнях 1 и 3 среднее значение индукции при указанной величине КПП достигает только 0,804 Тл, а в центральном стержне 2 – 0,261 Тл.

Насыщение крайних стержней 1 и 3 произойдет при величине КПП, равной 450 А (составляет 0,47 номинального фазного тока обмотки ВН), а полное насыщение магнитной системы, включая и центральный стержень 2, наступит при величине КПП, равной 1130 А (составляет 1,18 номинального фазного тока обмотки ВН). Таким образом, насыщение бронестержневой магнитной системы начинается (боковые ярма) при величине КПП, соизмеримой с паспортным значением тока холостого хода, а заканчивается (боковые ярма и все стержни) при величине КПП, соизмеримой с номинальным фазным током обмотки ВН.

Выводы. 1. Моделирование магнитных потоков в магнитных системах силовых трансформаторов с различными конструктивными схемами позволяет отметить общую характерную особенность, которая заключается в том, что под воздействием КПП насыщение магнитной системы происходит в несколько этапов. На каждом этапе происходит насыщение одного (или двух симметричных относительно распределения магнитных потоков) из неразветвленных участков магнитной системы. Поэтому существуют два характерных значения КПП – минимальное, при котором начинается насыщение одного из участков магнитной системы, и максимальное, при котором происходит полное насыщение магнитной системы, т. е. всех неразветвленных участков.

2. В магнитной системе стержневой конструкции первоначально происходит насыщение крайних стержней при кратности КПП относительно номинального фазного тока, равной 2,2, а затем полное насыщение, включая и центральный стержень, при кратности КПП, равной 3,7. Величину КПП, не превышающую номинальный фазный ток обмотки ВН, можно считать безопасной для силовых трансформаторов со стержневой конструкцией магнитной системы.

3. В магнитной системе бронестержневой конструкции первоначально происходит насыщение боковых ярм при кратности КПП относительно паспортного значения тока холостого хода, равной 2,63, а затем происходит насыщение крайних стержней при кратности КПП относительно номинального фазного тока, равной 0,47. Полное насыщение магнитной системы, включая центральный стержень, произойдет при кратности КПП, равной 1,18 относительно номинального фазного тока. Величина КПП, не превышающая удвоенное паспортное значение тока холостого хода, может считаться безопасной для силовых трансформаторов с бронестержневой конструкцией магнитной системой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков И.И. Устройства безударного включения силовых трансформаторов – современный инструмент повышения надежности электроснабжения // Энерго-эксперт. 2016. № 6. С. 36–39.
2. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях: сб. статей / под ред. А.И. Лурье. М.: Знак, 2005. 520 с.
3. Viljanen A., Pirjola R., Pracser E, Katkalov J, Wik M. Geomagnetically induced currents in Europe // Journal of Space Weather and Space Climate. 2014. Vol. 4.
4. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: Изд. Моск. гос. инж.-физ. ин-та (техн. ун-та), 2000. 238 с.
5. Чаплыгин Е.Е., Ковырзина О.С. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей // Электричество. 2009. №11. С. 30–38.
6. Vakhmina V.V., Shapovalov V.A., Kuznetsov V.N., Kretov D.A. The influence of geomagnetic storms on thermal processes in the tank of a power transformer // Power Delivery, IEEE Transactions on. 2015. Vol. №30. Issue: 4. P. 1702–1707.
7. Meeker D.C. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 (03 Nov 2013 Build). - URL: <http://www.femm.info> (дата обращения: 18.02.2018).
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Ленанд, 2014. 528 с.
9. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. М.: Academia, 2005. 336 с.
10. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Самолина О.В., Дубинин М.В. Особенности воздействия квазипостоянных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2015. №9. С. 2–8.

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. +7 927-214-17-00
E-mail: VVvahnina@yandex.ru

VAKHNINA Vera V.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Power Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. +7 (927)2141700
E-mail: VVvahnina@yandex.ru

КУВШИНОВ Алексей Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. +7 929-713-39-98
E-mail: alekseikuvshinov@yandex.ru

KUVSHINOV Aleksey A.

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Power Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. +7 (929)7133998
E-mail: alekseikuvshinov@yandex.ru

КУЗНЕЦОВ Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. +7 (8482) 53-92-82
E-mail: eie3@tltsu.ru

KUZNETSOV Vladimir N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Power Supply and Electrical Engineering Chair Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. +7 (8482) 53-92-82
E-mail: eie3@tltsu.ru

ШАПОВАЛОВ Владимир Андреевич

кандидат технических наук, заместитель ректора – директор института энергетики и электротехники Тольяттинский государственный университет 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, тел. +7 (8482) 53-92-22
E-mail: elektrik@tltsu.ru

SHAPOVALOV Vladimir A.

PhD in Engineering Science, Vice-Rector – Director of the Institute of Energy and Electrical Engineering Togliatti State University 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya str., 14, tel. +7 (8482) 53-92-22
E-mail: elektrik@tltsu.ru

Для цитирования: Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А. Моделирование одностороннего насыщения магнитных систем силовых трансформаторов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №1. С.117-123. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.20.

For citation: Vakhmina V.V., Kuvshinov A.A., Kuznetsov V.N., Shapovalov V.A. Simulation of one-sided saturation of magnetic systems of electrical power systems power transformers // Urban construction and architecture. 2018. V.8, 1. Pp. 117-123. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.20.