

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вахнина В.В.¹, Кузнецов В.Н.¹, Самолина О.В.¹

¹ФБГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, Россия (445667, Самарская обл., г.Тольятти, ул. Белорусская, 14), e-mail: VVVahkina@yandex.ru

В статье рассмотрено моделирование магнитного поля силового трансформатора. Для расчета магнитного поля силового трансформатора, имеющего нелинейные характеристики намагничивания стали, создана плоскопараллельная модель магнитного поля в программе FEMM. Моделирование магнитного поля проведено для трехфазных силовых трансформаторов с трехстержневой и пятистержневой (бронестержневой) магнитной системой. Расчет магнитного поля силовых трансформаторов выполнен на примере трехфазных силовых трансформаторов ТРДН-63000/110 и ТДЦ-400000/220 с помощью метода конечных элементов. В результате моделирования получены распределения силовых линий магнитного поля в стержнях магнитных систем силовых трансформаторов. Установлено, что при протекании постоянных токов по заземленным обмоткам насыщение магнитной системы трехстержневого силового трансформатора не наступает, а пятистержневой силовой трансформатор подвержен негативному воздействию постоянных токов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, моделирование, метод конечных элементов, магнитное поле, насыщение магнитной системы

MODELING THE MAGNETIC FIELD OF POWER TRANSFORMER

Vakhnina V.V.¹, Kuznetsov V.N.¹, Samolina O.V.¹

¹Togliatti State University, Togliatti, Russia (14, Belorusskaya St., Togliatti, 445667, Russia), e-mail: VVVahkina@yandex.ru

It is shown the power transformers magnetic field modeling. To calculate the magnetic field of power transformer with non-linear magnetizing characteristics of steel a plane-parallel model of the magnetic field of power transformer was developed at the FEMM program. Modeling of magnetic field was made for three-phase power transformers with three-legged and five-legged (shell-core) magnetic systems. The calculations of magnetic field of power transformer were made for the case of power transformers TRDN-63000/110 and TDC 400000/220 by the finite-element method. As a result of modeling the magnetic flux distribution at the limbs of a magnetic systems of power transformers became available. It has been established that the current which flows through the grounded windings hasn't been come to the saturation of three-legged magnetic system, but power transformer with a five-legged magnetic system isn't protected against negative influence of a DC currents.

Keywords: power transformer, modelling, plane-parallel model, magnetic field, saturation of a magnetic field

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы различных мощностей и классов напряжения широко используются в электроэнергетических системах (ЭЭС). Конструкция магнитных систем силовых трансформаторов (СТ) применяется преимущественно стержневого или бронестержневого типа. Исследования, выполненные в работах [1, 3, 4, 5, 6], показывают, что насыщение магнитной системы силовых трансформаторов ЭЭС возникает вследствие режима холостого хода, перевозбуждения трансформаторов, коротком замыкании во внешней ЭЭС, а также при одновременном намагничивании магнитной системы СТ переменным и постоянным магнитными полями. В работе исследованы магнитные поля для трехфазных силовых трансформаторов с трехстержневой и пятистержневой (бронестержневой) конструкцией магнитной системы, когда по заземленным обмоткам высокого напряжения (ВН) одновременно протекают переменный и

постоянный токи. Расчет магнитных полей выполнен на примере трехфазных силовых трансформаторов ТРДН-63000/110 и ТДЦ-400000/220 со схемой соединения обмоток Y_0/Δ в программе FEMM [7].

Алгоритм расчета магнитного поля силового трансформатора

Методика расчета магнитного поля силового трансформатора, имеющего нелинейные характеристики намагничивания электротехнической и конструкционной стали при одновременном протекании по обмоткам переменного и постоянного токов, разработанная авторами, изложена в [2]. Алгоритм расчета можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) расчет параметров силового трансформатора для Т-образной схемы замещения;
- 2) построение квадратной матрицы индуктивных сопротивлений самоиндукции и взаимной индукции ветви намагничивания СТ;
- 3) задание граничных условий, определение векторного потенциала \vec{A} магнитного поля СТ;
- 4) расчет магнитной индукции и напряженности магнитного поля в стержнях магнитопровода силового трансформатора.

Расчет магнитного поля силового трансформатора выполнен с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При использовании модели плоскопараллельного магнитного поля, как показано в [2], уравнение векторного потенциала \vec{A} записывается как скалярное дифференциальное уравнение в частных производных, для решения которого строится сеть конечных элементов. Пространство, занимаемое магнитным полем силового трансформатора, разбивается на отдельные элементы, имеющие малые конечные размеры. Сведение задачи расчета магнитного поля к системе линейных алгебраических уравнений в МКЭ можно провести разными способами: методом минимизации некоторого функционала; методом взвешенных невязок, например методом Галеркина; методом наименьших квадратов. В любом случае речь идет о минимизации некоторой меры ошибки между точным дифференциальным уравнением и его приближением в виде совокупности линейных функций. Метод Галеркина базируется на непосредственном дифференцировании уравнения для потенциала, а метод минимизации функционала – чаще всего на принципе минимума энергии, запасенной в магнитном поле. Для этого должно быть найдено интегральное уравнение, выражающее запасенную в магнитном поле энергию, и продифференцировано по потенциалам в узлах.

На рисунках 1, 2 для силовых трансформаторов ТРДН-63000/110 (с трехстержневой конструкцией магнитной системы) и ТДЦ-400000/220 (с пятистержневой конструкцией магнитной системы) представлены модели для расчета магнитного поля, созданные в

программе FEMM. На рисунках 1, 2 показаны магнитный сердечник, обмотки с токами и бак силового трансформатора. В силу горизонтальной симметрии размер модели уменьшен в 2 раза, и на рисунках 1, 2 приведены только верхние части силового трансформатора. Полуокружности радиусами 3 м для силового трансформатора ТРДН-63000/110 и 5 м для силового трансформатора ТДЦ-400000/220 представляют собой границы, на которых задаются асимптотические граничные условия. Радиусы полуокружностей определяется габаритами бака силового трансформатора. На рисунках 1, 2 видна сетка из треугольных конечных элементов, созданная программой-триангулятором. Сетка для силового трансформатора ТРДН-63000/110 состоит из 13 871 узла, а для силового трансформатора ТДЦ-400000/220 – из 19 781 узла.

Задача нахождения векторного потенциала представляет собой краевую задачу и поэтому требует надлежащего задания граничных условий. Для решения задачи на горизонтальной оси симметрии задано граничное условие Неймана (равенство нулю нормальной производной от потенциала).

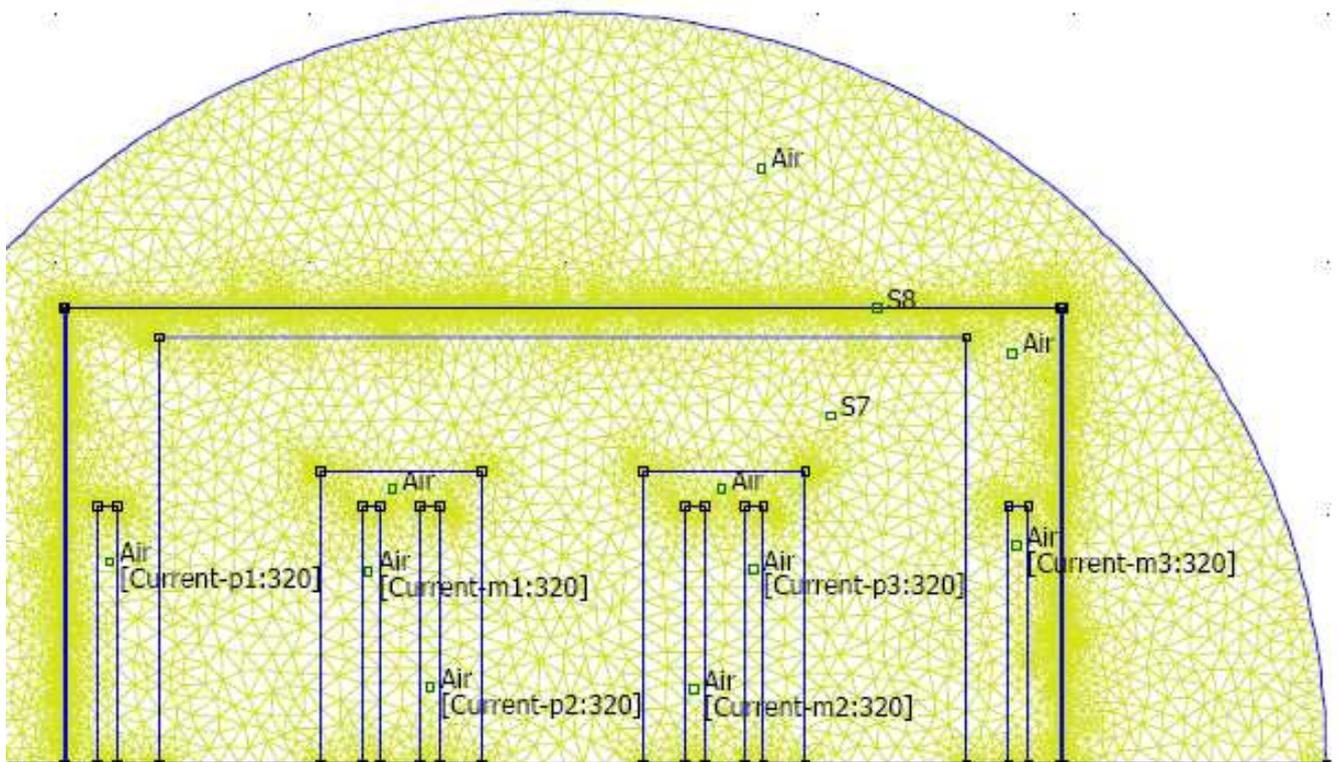


Рис. 1. Модель силового трансформатора ТРДН-63000/110 для расчета магнитного поля

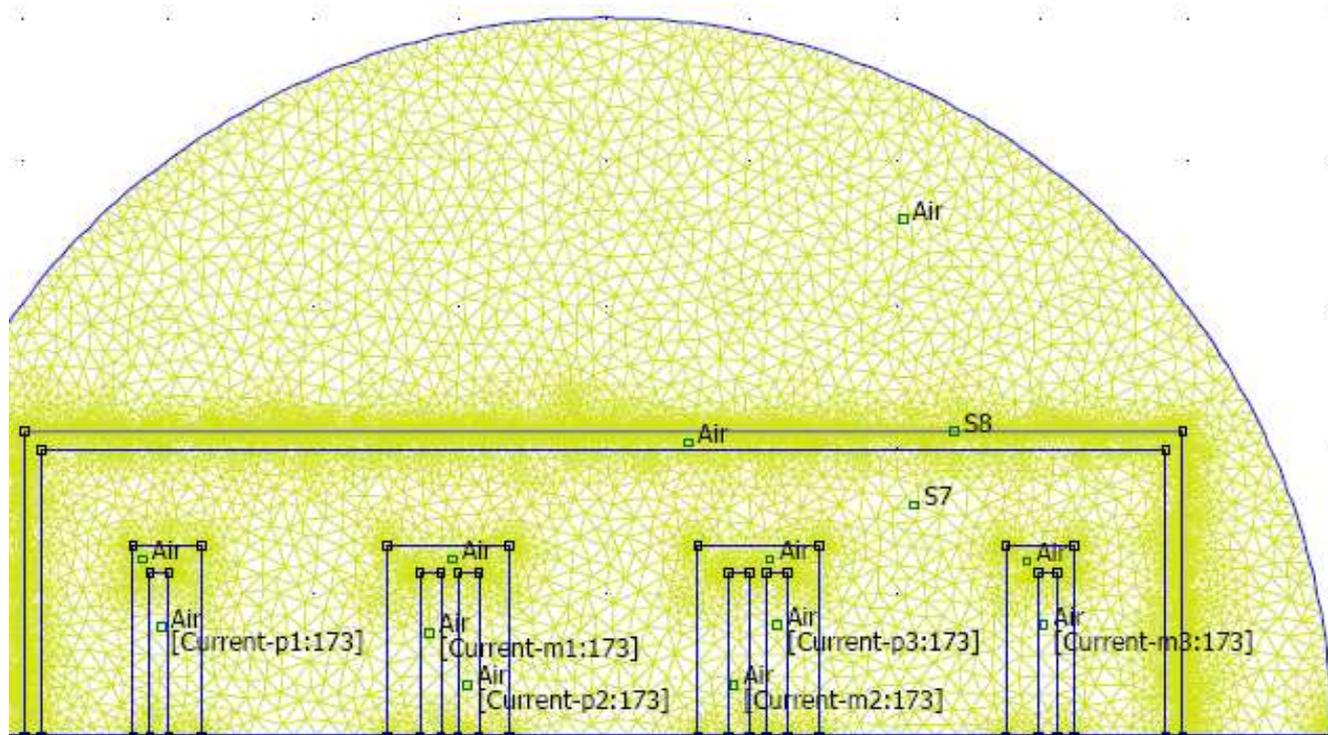


Рис. 2. Модель силового трансформатора ТДЦ-400000/220 для расчета магнитного поля

На рисунках 1, 2 приняты следующие обозначения:

[Current-p1:320], [Current-p1:173] – ток фазы А, текущий в положительном направлении; 320 и 173 – половины чисел витков обмоток ВН соответственно для силового трансформатора ТРДН-63000/110 и силового трансформатора ТДЦ-400000/220;

[Current-p2:320], [Current-p2:173]; [Current-m2:320], [Current-m2:173] – соответствующие обозначения для токов фазы В;

[Current-p3:320], [Current-p3:173]; [Current-m3:320], [Current-m3:173] – соответствующие обозначения для токов фазы С;

Air – немагнитный материал ($\mu = 1$);

S7 – электротехническая сталь сердечника;

S8 – конструкционная сталь бака силового трансформатора.

Моделирование магнитного поля силового трансформатора в программе FEMM позволяет задавать свойства магнитных материалов в виде нелинейной характеристики намагничивания – кривой $B(H)$. Кривые намагничивания, используемые при моделировании, для электротехнической (S7, сердечник силового трансформатора) и конструкционной (S8, бак силового трансформатора) стали приведены на рисунках 3, 4.

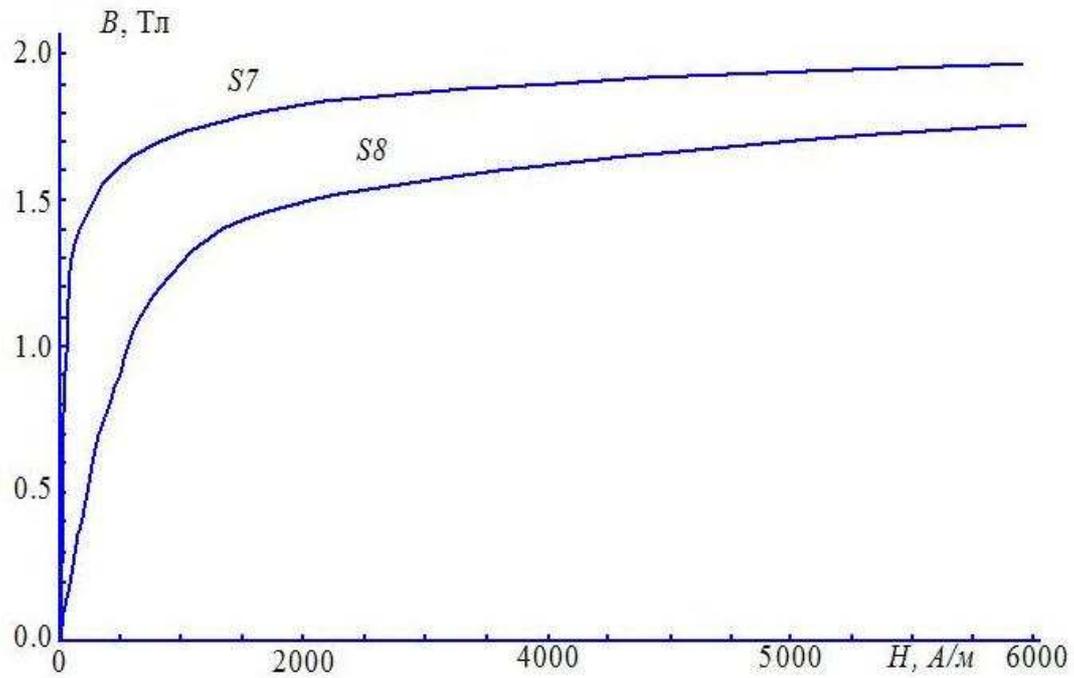


Рис. 3. Кривые намагничивания электротехнической S7 и конструкционной S8 стали ($H=0\div 8000$ A/m)

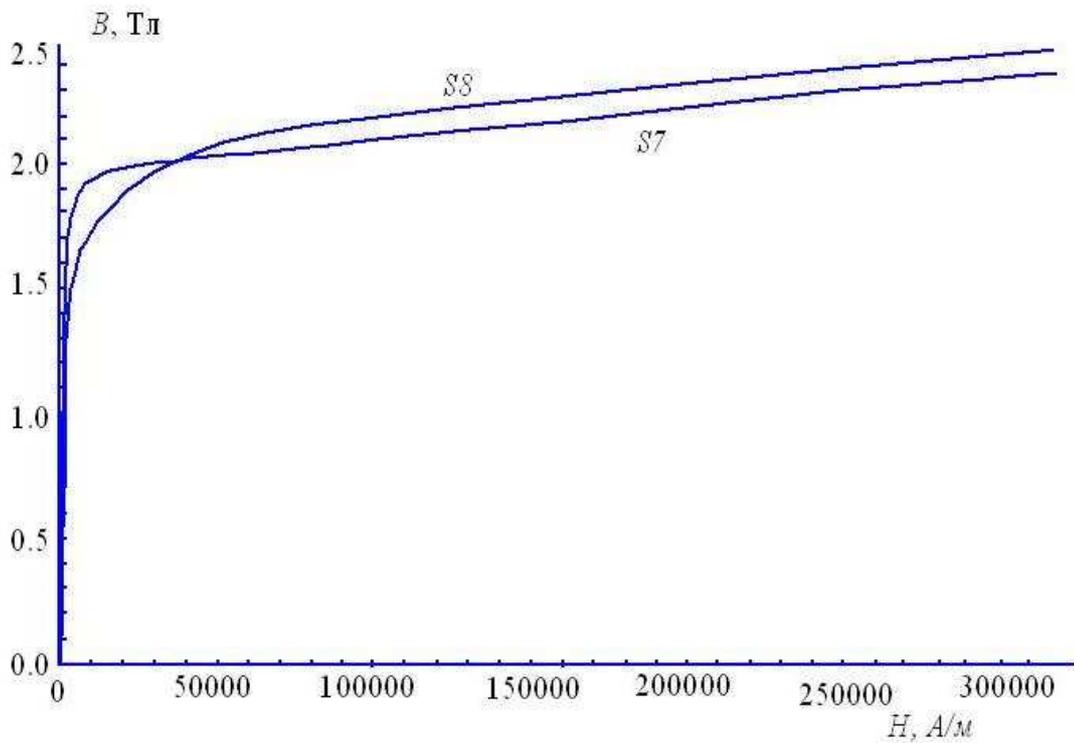


Рис. 4. Кривые намагничивания электротехнической S7 и конструкционной S8 стали ($H=0\div 320000$ A/m)

Из рисунка 4 видно, что при значениях $H > 60000$ А/м кривые намагничивания $S7$ и $S8$ становятся прямыми линиями, идущими параллельно друг другу с угловым коэффициентом, равным μ_0 .

Для оценки изменения величины магнитной индукции построены зависимости средних значений магнитных индукций в центральных поперечных сечениях стержней магнитной системы силового трансформатора $B_{ср}$ от величины постоянного тока, протекающего по обмотке ВН силового трансформатора. Магнитные потоки пропорциональны средним значениям магнитных индукций и находятся умножением $B_{ср}$ на площадь поперечного сечения стержня.

Характер изменения средних значений магнитной индукции в зависимости от постоянного тока I в обмотке ВН для силовых трансформаторов ТДЦ-400000/220 и ТРДН-63000/110 показан на рисунке 5. На рисунке 5 используются следующие обозначения стержней: 1, 3 – боковые стержни с обмотками; 2 – центральный стержень с обмотками; 4, 5 – боковые ярма (боковые стержни без обмоток).

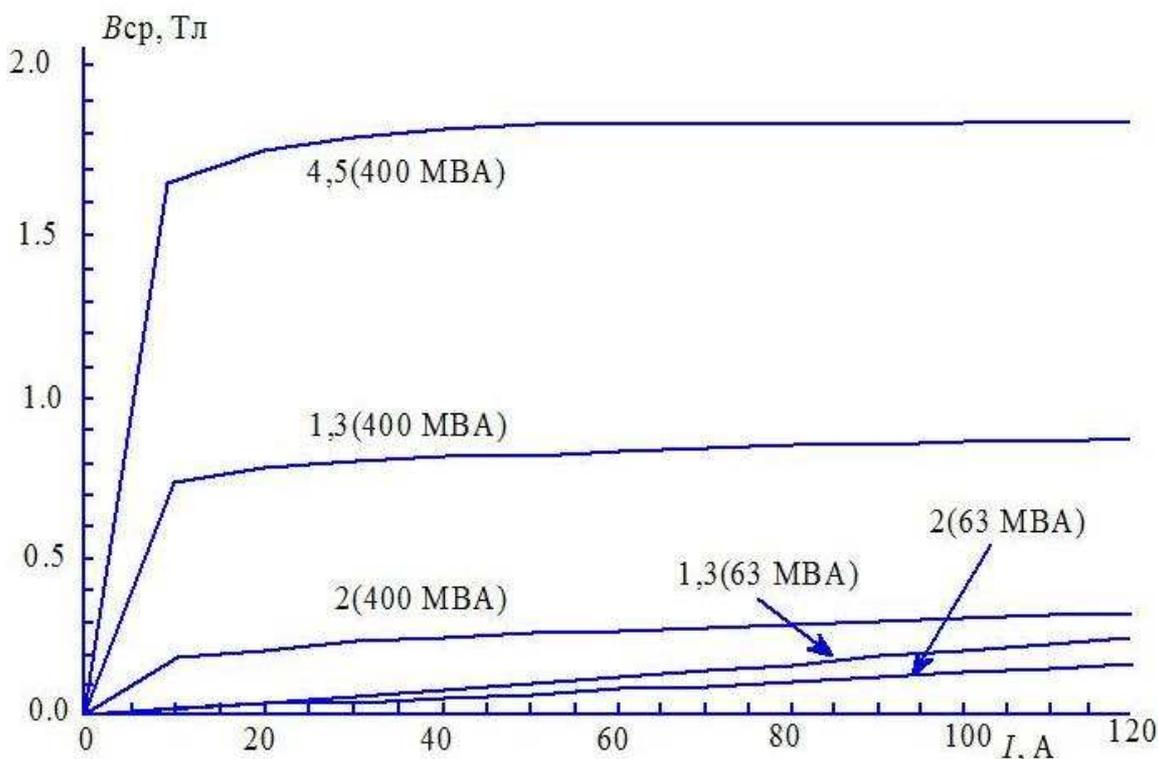


Рис. 5. Зависимости средних значений магнитной индукции в стержнях магнитопровода от постоянного тока для силовых трансформаторов ТРДН-63000/110 и ТДЦ-400000/220

Результаты моделирования магнитного поля силового трансформатора

При моделировании магнитного поля силового трансформатора с трехстержневой конструкцией магнитной системы ТРДН-63000/110 силовые линии магнитного поля

замыкаются вне сердечника, среднее значение магнитной индукции в центральных поперечных сечениях стержней B_{cp} невелико, и даже при токах $I=120$ А насыщения магнитной системы не наступает (рис. 5). Среднее значение магнитной индукции в стержнях 1, 3 больше среднего значения магнитной индукции в центральном стержне 2, так как силовые линии, проходящие через сечение центрального стержня, вынуждены замыкаться по большему пути. При $I=120$ А магнитная индукция $B_{cp1} = B_{cp3} = 0,227$ Тл, а $B_{cp2} = 0,143$ Тл.

Силовой трансформатор ТДЦ-400000/220 вследствие конструкции магнитной системы (пятистержневая) имеет путь для замыкания силовых линий внутри магнитной системы через боковые яра (стержни 4, 5), поэтому уже при токах $I = 10$ А начинается насыщение магнитной системы СТ. Магнитные потоки, проходящие через сечения стержней 4, 5, складываются из магнитных потоков, проходящих через сечения стержней 1, 3 и частей разделенного пополам потока стержня 2. Значения B_{cp} для стержней 4, 5 значительно больше, чем для стержней 1, 3 и 2. При $I=120$ А магнитная индукция $B_{cp4} = B_{cp5} = 1,926$ Тл, магнитная индукция $B_{cp1} = B_{cp3} = 0,881$ Тл, а $B_{cp2} = 0,308$ Тл, в результате чего насыщение магнитопровода определяется насыщением стержней 4, 5 (боковых яра).

Заключение

Проведенные исследования показывают, что для рассмотренного диапазона постоянных токов $I=0\div 120$ А, протекающих по заземленной обмотке ВН силового трансформатора, насыщение магнитной системы трехстержневого силового трансформатора ТРДН-63000/110 не наступает. Магнитная система пятистержневого силового трансформатора ТДЦ-400000/220 начинает насыщаться уже при токах 10 А. Поэтому силовые трансформаторы с пятистержневой конструкцией магнитной системы наиболее подвержены негативному воздействию постоянных токов, возникающих в протяженных заземленных ЭЭС в периоды грозовой и сейсмической активности или возмущений космической погоды.

Список литературы

1. Бамдас А.М. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов / А.М. Бамдас, В.А. Сомов, А.О. Шмидт. – М.: Госэнергоатомиздат, 1959.
2. Влияние конструкции силового трансформатора на намагничивание магнитопровода постоянным током / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, Д.А. Кретов, О.В. Самолина, М.В. Дубинин // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2. – С. 30–35.
3. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974.

4. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.
5. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы: Учебник для вузов / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: уч. пособие для вузов. Изд. 5-е, перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Meeker D.C. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 (03 Nov 2013 Build) / D.C. Meeker. – URL: <http://www.femm.info>.

Рецензенты:

Кувшинов А.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти;

Шакурский В.К., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти.