

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА НАМАГНИЧИВАНИЕ МАГНИТОПРОВОДА ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

© 2015

В.В. Вахнина, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

В.Н. Кузнецов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Д.А. Кретов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

О.В. Самолина, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника»

М.В. Дубинин, аспирант

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: конструкция силового трансформатора; намагничивание магнитопровода; постоянный ток; магнитное поле.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы намагничивания магнитопровода для силового трансформатора с трехстержневым типом магнитопровода ТРДН 63000/110 и для силового трансформатора с бронестержневым типом магнитопровода ТДЦ 400000/220 постоянным током с заземленной обмоткой высокого напряжения. Разработана модель магнитного поля силового трансформатора в условиях намагничивания постоянным током с учетом нелинейности кривых намагничивания электротехнической и конструкционной стали. Моделирование магнитных полей в стержнях магнитопровода силовых трансформаторов выполнено в программе FEMM методом конечных элементов. Получены картины распределения силовых линий магнитного поля для силовых трансформаторов ТРДН 63000/110 и ТДЦ 400000/220. В силовом трансформаторе ТРДН 63000/110 с трехстержневой магнитной системой создаваемые постоянным током магнитные поля не могут замыкаться через сердечник силового трансформатора, а вытесняются друг друга, замыкаясь частично через бак силового трансформатора и через окружающее его воздушное пространство. Показано, что у силовых трансформаторов с бронестержневой магнитной системой имеется возможность для замыкания силовых линий внутри магнитной системы, что существенно увеличивает интенсивность намагничивания магнитопровода постоянным током. Построены зависимости средних значений магнитной индукции в центральных поперечных сечениях стержней магнитной системы силового трансформатора от величины постоянного тока. Полученные зависимости позволяют оценить влияние постоянного тока на значения средней магнитной индукции и на скорость насыщения магнитной системы силового трансформатора и сделать вывод, что силовой трансформатор ТРДН 63000/110 в меньшей степени подвержен воздействию постоянной составляющей тока по сравнению с силовым трансформатором ТДЦ 400000/220 вследствие трехстержневой конструкции магнитной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы (СТ) являются наиболее распространенными элементами электроэнергетических систем (ЭЭС). Силовые трансформаторы различают по мощности, классу напряжения, схемам соединения обмоток, конструкции магнитопровода. Выход из нормального режима работы силового трансформатора может привести к системной аварии и нарушению электроснабжения потребителей. Во время эксплуатации силовых трансформаторов возникает возможность насыщения их магнитной системы. Процессы насыщения магнитной системы рассмотрены в работах [1–11], однако не исследован вопрос о влиянии конструкции силового трансформатора на намагничивание магнитопровода постоянным током. В работе рассматривается модель магнитного поля силового трансформатора в условиях намагничивания постоянным током с учетом нелинейности кривых намагничивания электротехнической и конструкционной стали. Расчет магнитных полей проведен для силовых трансформаторов с трехстержневой конструкцией магнитопровода ТРДН 63000/110 и пятистержневой (бронестержневой) конструкцией магнитопровода ТДЦ 400000/220.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Расчет магнитного поля силового трансформатора, имеющего нелинейные кривые намагничивания элек-

тротехнической и конструкционной стали, выполнен в программе FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics) [12–16]. Программа FEMM позволяет рассчитывать плоскопараллельные, или плоскомеридианные (осесимметричные) стационарные, или квазистационарные магнитные поля. Расчет ведется методом конечных элементов (МКЭ).

Основное уравнение, используемое для численного расчета стационарного магнитного поля в программе FEMM, формулируется в терминах магнитного потенциала \vec{A} [17; 18]. При наличии нелинейной связи между индукцией \vec{B} и напряженностью \vec{H} магнитного поля (насыщающиеся магнитные материалы) уравнение магнитного потенциала записывается в виде [19; 20]:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu(B)} \operatorname{rot} \vec{A} \right) = \vec{\delta}, \quad (1)$$

где $\vec{\delta}$ – плотность электрического тока сторонних источников;

$\mu(B) = B/H(B)$ – (относительная) магнитная проницаемость, зависящая от B в случае насыщения магнитных материалов;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м – магнитная постоянная.

Для плоскопараллельного магнитного поля векторный потенциал будет иметь только одну компоненту A_y ($A_x=0$, $A_z=0$). Тогда (1) превращается в скалярное

дифференциальное уравнение в частных производных эллиптического типа:

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

где δ_y – плотность электрического тока компоненты векторного потенциала A_y в декартовой системе координат.

Для решения уравнений в частных производных методом конечных элементов строится сеть конечных элементов [13].

На рис. 1 приведена модель двумерного поля, построенного с помощью шести треугольных конечных элементов, номера которых показаны цифрами в круглых скобках. Номера узлов изображены цифрами без скобок. Исходными данными являются известные значения потенциалов или их градиентов на границах поля в узлах 1÷4. Это дает дополнительные уравнения относительно узлов, являющихся общими у смежных конечных элементов. Например, для узла 2 можно записать:

$$A_{y2(1)} = A_{y2(2)};$$

для узла 6:

$$A_{y6(1)} = A_{y6(2)} = A_{y6(3)} = A_{y6(6)}.$$

При расчете двумерного магнитного поля с помощью МКЭ потенциал A_y каждого i -го конечного треугольного элемента представляется в виде полинома первого порядка с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами:

$$A_{y(i)} = a_{(i)} + b_{(i)} \cdot x + c_{(i)} \cdot z,$$

где $a_{(i)}$, $b_{(i)}$, $c_{(i)}$ – неизвестные постоянные коэффициенты.

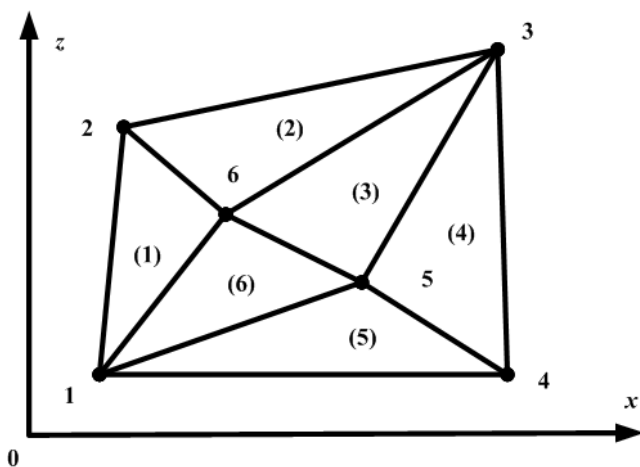


Рис. 1. Двумерное поле, разбитое на треугольные конечные элементы: 1÷6 – узлы сетки; (1)÷(6) – конечные элементы

Определив эти коэффициенты для всех конечных элементов, можно рассчитать потенциал в любой точке исследуемой области.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПРОТЕКАНИИ ПО ЕГО ОБМОТКЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет магнитных полей в стержнях магнитопровода выполнен в программе FEMM 4.2 для силового трансформатора с трехстержневым типом магнитопровода ТРДН 63000/110 и для силового трансформатора с бронестержневым типом магнитопровода ТДЦ 400000/220. Схема соединения обмоток у каждого трансформатора $Y0/\Delta$.

Задача нахождения векторного потенциала представляет собой краевую задачу и поэтому требует надлежащего задания граничных условий. На горизонтальной оси симметрии задано граничное условие Неймана – равенство нулю нормальной производной $\frac{\partial A_y}{\partial n}$ от потенциала:

$$\frac{\partial A_y}{\partial n} = 0,$$

поскольку силовые линии магнитного поля перпендикулярны этой границе.

Для определения граничных условий области моделирования существует несколько способов. Самый простой – создание модели с границами, расположенными достаточно далеко от самой системы. Тогда на этих внешних границах можно принять как условие Дирихле, так и условие Неймана.

Второй способ определения границ состоит в применении асимптотических граничных условий в виде окружности [12]:

$$\frac{\partial A_y}{\partial r} + \frac{\nu}{r} A_y = 0,$$

где r – радиус окружности, удаленной от внешних точек исследуемой системы, ν – номер главной гармоники пространственного разложения векторного потенциала (обычно $\nu=1$).

Третьим способом решения проблемы открытых границ является создание модели, состоящей из двух кругов. В основном круге располагается модель системы, а второй круг моделирует все бесконечно протяженное пространство, окружающее первый. На внешних границах кругов обеспечивается одинаковость граничных условий. В основе эквивалентности этой замены лежит преобразование Кельвина [12].

При моделировании магнитного поля силовых трансформаторов ТРДН 63000/110 и ТДЦ 400000/220 применяется второй способ решения проблемы открытых границ: для силового трансформатора ТРДН 63000/110 радиус окружности $r_0=3$ м; для силового трансформатора ТДЦ 400000/220 радиус окружности $r_0=5$ м.

Полученные в результате исследования магнитных полей картины силовых линий трансформаторов ТРДН 63000/110 и ТДЦ 400000/220 приведены на рис. 2, 3. Расчеты выполнены для постоянного тока в фазе $I=50$ А.

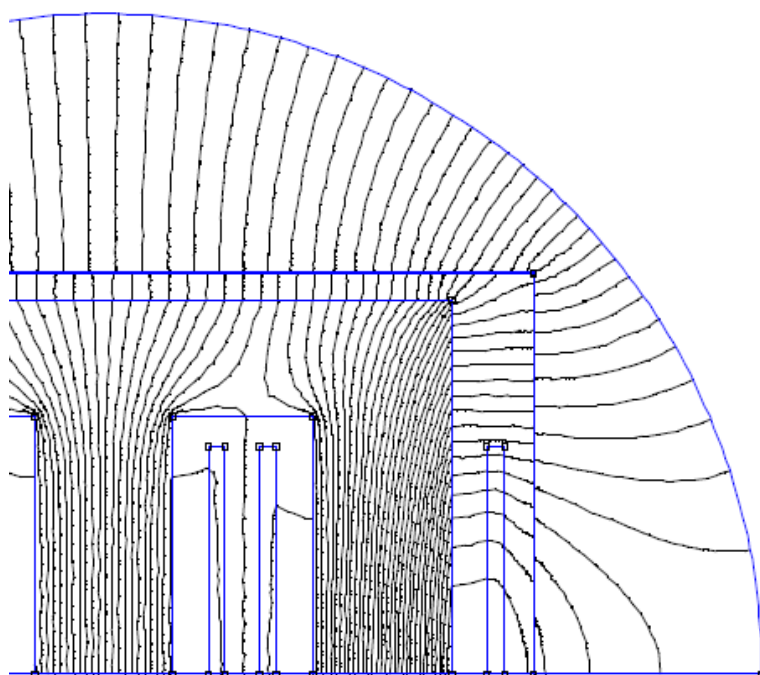


Рис. 2. Картина силовых линий магнитного поля для силового трансформатора ТРДН 63000/110

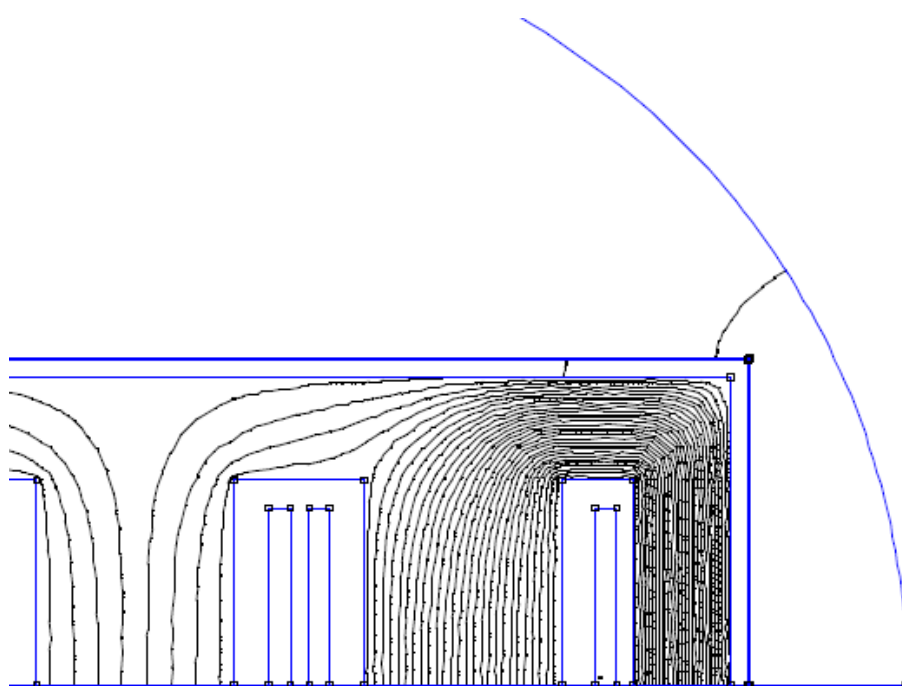


Рис. 3. Картина силовых линий магнитного поля для силового трансформатора ТДЦ 400000/220

Одинаковые постоянные токи создают намагничивающие силы одной величины и одного направления. В силовом трансформаторе ТРДН 63000/110 с трехстержневой магнитной системой создаваемые этими токами магнитные поля не могут замыкаться через сердечник силового трансформатора, а вытесняют друг друга, замыкаясь частично через бак силового трансформатора и через окружающее его воздушное пространство (рис. 2).

В отличие от силового трансформатора ТРДН 63000/110, у силового трансформатора ТДЦ 400000/220 с бронестержневой магнитной системой имеется возможность для замыкания силовых линий внутри магнитной системы, поэтому магнитные потоки токов сосредоточены практически целиком в сердечнике (рис. 3).

Для оценки влияния величины постоянного подмагничивающего тока на средние значения магнитной индукции построены зависимости средних значений

магнитной индукции в центральных поперечных сечениях стержней магнитной системы СТ от величины I . Соответствующие магнитные потоки пропорциональны средним индукциям и находятся умножением ее на площадь поперечного сечения стержня.

На рис. 4 приведена зависимость $B_{cp}(I)$ для силового трансформатора ТРДН 63000/110. На рис. 4 используются следующие обозначения стержней: 1, 3 – боковые стержни с обмотками; 2 – центральный стержень с обмотками.

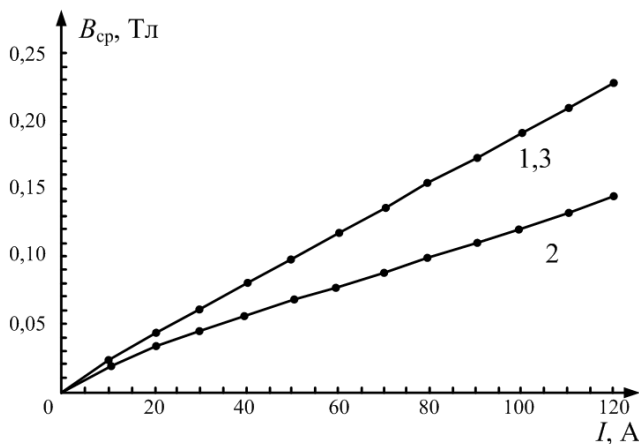


Рис. 4. Зависимость значений средней магнитной индукции от постоянного тока для силового трансформатора ТРДН 63000/110

Характер изменения значений средней магнитной индукции в зависимости от постоянного тока для силового трансформатора ТДЦ 400000/220 показан на рис. 5. На рис. 5 используются следующие обозначения стержней: 1, 3 – боковые стержни с обмотками; 2 – центральный стержень с обмотками; 4, 5 – боковые ярма (боковые стержни без обмоток).

Согласно проведенным исследованиям для силового трансформатора ТРДН 63000/110, силовые линии магнитного поля замыкаются вне сердечника, среднее значение магнитной индукции в центральных поперечных сечениях стержней B_{cp} невелико, вследствие чего даже при больших значениях постоянного тока насыщение магнитной системы не наступает. Индукция в боковых стержнях 1, 3 больше индукции в центральном стержне 2, так как силовые линии, проходящие через рассматриваемое сечение центрального стержня, вынуждены замыкаться по большому пути. При $I=120$ А магнитная индукция для силового трансформатора ТРДН 63000/110 $B_{cp1}=B_{cp3}=0,227$ Тл, а $B_{cp2}=0,143$ Тл.

В силовом трансформаторе ТДЦ 400000/220 имеется путь для замыкания силовых линий внутри магнитной системы через боковые ярма (стержни 4, 5), поэтому уже при токах, равных 10 А, начинается насыщение магнитопровода силового трансформатора. Потоки, проходящие через сечения стержней 4 и 5, складываются из 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, в результате чего насыщение

магнитопровода определяется насыщением этих стержней (боковых ярм). Из-за насыщения стержней 4, 5 стержни 1, 3 и 2 также входят в насыщение, но значения индукции при этом значительно меньше и не соответствуют характеристике намагничивания электротехнической стали сердечника силового трансформатора. При $I=120$ А магнитная индукция $B_{cp4}=B_{cp5}=1,926$ Тл, $B_{cp1}=B_{cp3}=0,881$ Тл, а $B_{cp2}=0,308$ Тл. Индукция в стержне 2 меньше индукции в стержнях 1, 3, т. к. силовые линии для этого стержня замыкаются по большому пути.

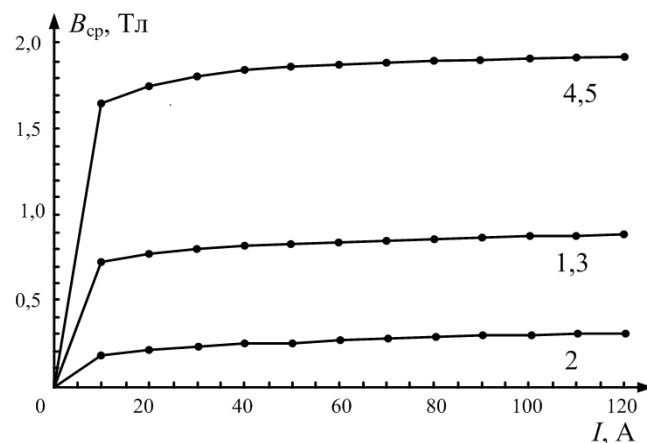


Рис. 5. Зависимость значений средней магнитной индукции от постоянного тока для силового трансформатора ТДЦ 400000/220

Приведенные на рис. 4, 5 зависимости позволяют сделать вывод, что силовой трансформатор ТРДН 63000/110 в меньшей степени подвержен воздействию постоянной составляющей тока по сравнению с силовым трансформатором ТДЦ 400000/220 вследствие трехстержневой конструкции магнитной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана модель магнитного поля силового трансформатора в условиях намагничивания постоянным током и с учетом нелинейности кривых намагничивания электротехнической и конструкционной стали.

2. Получены зависимости средних значений магнитной индукции в центральных поперечных сечениях стержней магнитной системы силового трансформатора от величины постоянного тока, что позволяет определить характер и степень влияния конструкции силового трансформатора на намагничивание его магнитопровода.

3. Силовой трансформатор ТДЦ 400000/220 с бронестержневой магнитной системой в большей степени подвержен воздействию постоянного тока намагничивания по сравнению с силовым трансформатором ТРДН 63000/110 с трехстержневой конструкцией магнитной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 527 с.
2. Бамдас А.М., Сомов В.А., Шмидт А.О. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничи-

- ванием шунтов. М.: Госэнергоатомиздат, 1959. 135 с.
3. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 236 с.
 4. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 ч. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974. 240 с.
 5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.
 6. Силовые трансформаторы / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
 7. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1974. 768 с.
 8. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины. Трансформаторы. М.: Высш. шк., 1989. 352 с.
 9. Засыпкин А.С., Бердов Г.В., Середин М.М. Определение параметров силового трансформатора с насыщенным магнитопроводом // Электричество. 1975. № 12. С. 24–28.
 10. Зихерман М.Х., Кузьмин Н.П., Лейтес Л.В. Магнитная характеристика электротехнической стали при сильном насыщении // Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1972. Вып. 7. С. 3–5.
 11. Зихерман М.Х. Характеристики намагничивания силовых трансформаторов // Электричество. 1972. № 3. С. 79–82.
 12. Meeker D.C. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 (03 Nov 2013 Build). URL: femm.info.
 13. Meeker D.C. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual (25 Aug 2013). URL: femm.info/Archives/doc/manual42.pdf.
 14. Meeker D.C. FEMM 4.2 Magnetostatic Tutorial (25 Jan 2006). URL: femm.info/Archives/doc/tutorial-magnetic.pdf.
 15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 10-е изд. М.: Гардарики, 2003. 316 с.
 16. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1975. 2 т.
 17. Meeker D.C. MathFEMM 1.20. The Mathematica interface to FEMM 4.2. URL: femm.info/Archives/doc/mathfemm.pdf.
 18. Shewchuk J.R. Triangle. A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. Version 1.6 (released 28 Jul 2005). URL: cs.cmu.edu/~quake/triangle.html.
 19. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. М.: Academia, 2005. 336 с.
 20. Ierusalimschy R., Figueiredo L.H., Celes W. Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0. URL: lua.org/ftp/refman-4.0.pdf.
- [Transformers and stabilizers regulated by shunts biasing]. Moscow, Gosenergoatomizdat publ., 1959, 135 p.
3. Druzhinin V.V. *Magnitnie svoystva elektrotekhnicheskoy stali* [Magnetic properties of electrotechnical steel]. Moscow, Energiya publ., 1974, 236 p.
 4. Petrov G.N. *Elektricheskie mashini. Chast' 1. Vvedenie. Transformatori* [Electrical machinery. Part 1. Introduction. Transformers]. Moscow, Energiya publ., 1974, 240 p.
 5. Leytes L.V. *Elektromagnitnie rascheti transformatorov i reaktorov* [Electro-magnetic calculation of transformers and reactors]. Moscow, Energiya publ., 1981, 392 p.
 6. Lizunova S.D., Lokhanina A.K., eds. *Silovie transformatori* [Power transformers]. Moscow, Energoizdat publ., 2004, 616 p.
 7. Rozenblat M.A. *Magnitnie elementi avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki* [Magnetic elements of automatic equipment and computing tools]. Moscow, Nauka publ., 1974, 768 p.
 8. Sergeenkov B.N., Kiselev B.M., Akimova N.A. *Elektricheskie mashini. Transformatori* [Electrical machinery. Transformers]. Moscow, Visshaya shkola publ., 1989, 352 p.
 9. Zasyupkin A.S., Berdov G.V., Seredin M.M. Determination of parameters of supply transformer with saturated magnetic core. *Elektrichestvo*, 1975, no. 12, pp. 24–28.
 10. Zikherman M.Kh., Kuzmin N.P., Leytes L.V. Magnetic characteristic of electrotechnical steel by high saturation. *Elektrotekhnicheskaya promishlennost. Apparati visokogo napryazheniya, transformatori, silovie kondensatori*, 1972, no. 7, pp. 3–5.
 11. Zikherman M.Kh. Magnetization characteristic of supply transformers. *Elektrichestvo*, 1972, no. 3, pp. 79–82.
 12. Meeker D.C. *Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 (03 Nov 2013 Build)*. URL: femm.info.
 13. Meeker D.C. *Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual (25 Aug 2013)*. URL: femm.info/Archives/doc/manual42.pdf.
 14. Meeker D.C. *FEMM 4.2 Magnetostatic Tutorial (25 Jan 2006)*. URL: femm.info/Archives/doc/tutorial-magnetic.pdf.
 15. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovi elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. 10th ed. Moscow, Gardariki publ., 2003, 316 p.
 16. Neyman L.R., Lemirchan K.S. *Teoreticheskie osnovi elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Energiya publ., 1975, 2 vol.
 17. Meeker D.C. *MathFEMM 1.20. The Mathematica interface to FEMM 4.2*. URL: femm.info/Archives/doc/mathfemm.pdf.
 18. Shewchuk J.R. *Triangle. A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. Version 1.6 (released 28 Jul 2005)*. URL: cs.cmu.edu/~quake/triangle.html.
 19. Bul O.B. *Metodi rascheta magnitnikh system elektricheskikh apparatov* [Methods of calculation of magnetic systems of electrical devices]. Moscow, Academia publ., 2005, 336 p.
 20. Ierusalimschy R., Figueiredo L.H., Celes W. *Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0*. URL: lua.org/ftp/refman-4.0.pdf.

REFERENCES

1. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformer calculation]. 5th ed. Moscow, Energoatomizdat publ., 1986, 527 p.
2. Bamdas A.M., Somov V.A., Shmidt A.O. *Transformatori i stabilizatori, reguliruemie podmagnichivaniem shuntov*

**THE INFLUENCE OF SUPPLY TRANSFORMER DESIGN
ON THE TRANSFORMER CORE DC MAGNETIZATION**

© 2015

V.V. Vakhnina, Doctor of Engineering, Professor,
Head of the Department «Power supply and electrical engineering»

V.N. Kuznetsov, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Power supply and electrical engineering»

D.A. Kretov, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Power supply and electrical engineering»

O.V. Samolina, senior lecturer of the Department «Power supply and electrical engineering»

M.V. Dubinin, postgraduate student
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: supply transformer design; transformer core magnetization; DC (direct current); magnetic field.

Abstract: The article covers the issues of magnetization of the core for TRDN 63000/110 three-limb core supply transformer and TDT 400000/220 shell-core supply transformer using direct current with the grounded high voltage winding. The authors developed the model of the supply transformer magnetic field in DC magnetization conditions taking into account the electrotechnical and structural steel magnetization curves nonlinearity. The magnetic field modeling in core limbs of supply transformers is performed using the FEMM software by finite-element method. The distribution patterns of magnetic field lines for TRDN 63000/110 and TDT 400000/220 supply transformers were created. The magnetic fields created by DC in the TRDN 63000/110 supply transformer with three-limb magnetic structure cannot complete through transformer magnetic core and replace each other completing partially through the supply transformer trunk and its air-space. The research showed that the supply transformers with shell-core magnetic structure are capable to complete lines of force within the magnetic system that increases considerably the core DC magnetization intensity. The authors built the dependences of average values of magnetic induction in the center cross-section of limbs of magnet on DC value. Obtained dependences make it possible to estimate the influence of direct current on the value of average magnetic induction and the velocity of saturation of the supply transformer magnetic system and to make a conclusion that TRDN 63000/110 supply transformer is subject to the direct current component impact to a lesser extent in comparison with TDT 400000/220 supply transformer due to three-limb design of magnetic system.