

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>
Выпуск 6 (25) 2014 ноябрь – декабрь <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14>
URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/162TVN614.pdf>
DOI: 10.15862/162TVN614 (<http://dx.doi.org/10.15862/162TVN614>)

УДК 621.314.2

Вахнина Вера Васильевна

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»
Россия, Тольятти¹
Заведующий кафедры «Электроснабжение и электротехника»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: VVVahniba@yandex.ru

Кузнецов Владимир Николаевич

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»
Россия, Тольятти
Доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: EiE@tltsu.ru

Модель обмотки силового трансформатора с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником

¹ 445667, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Аннотация. В статье исследованы процессы насыщения магнитной системы силовых трансформаторов, входящих в электроэнергетические системы, при одновременном намагничивании переменным и постоянным магнитными полями. Задача расчёта электромагнитных процессов, протекающих в магнитной системе силового трансформатора, рассмотрена на модели обмотки силового трансформатора с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником и сводится к определению зависимости индуктивности обмотки от протекающего по ней тока намагничивания. Для нахождения решений для векторного потенциала моделирование обмотки выполнено в виде ленты с круговым поверхностным током. В результате выполненного моделирования получено, что при одновременном намагничивании ферромагнитного сердечника переменным и постоянным магнитными полями происходит смещение рабочей точки в область насыщения на кривой намагничивания. Магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника нелинейно уменьшается. Индуктивность обмотки, по которой протекает ток намагничивания, уменьшается и ее изменение носит нелинейный характер. Нелинейность зависимости обусловлена магнитными характеристиками материала сердечника. Полученные результаты позволяют исследовать процессы насыщения магнитной системы силового трансформатора, когда по его заземленным обмоткам одновременно протекают переменный и постоянный токи, вызванные природными воздействиями: грозовой или сейсмической активностью, возмущениями космической погоды.

Ключевые слова: силовой трансформатор; ферромагнитный сердечник; ток намагничивания; математическая модель; электроэнергетическая система; магнитное поле; индуктивность обмотки.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Вахнина В.В., Кузнецов В.Н. Модель обмотки силового трансформатора с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6
<http://naukovedenie.ru/PDF/162TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:
10.15862/162TVN614

В электроэнергетических системах (ЭЭС) широко используются силовые трансформаторы и автотрансформаторы различных мощностей и классов напряжения, выполненные как группа однофазных или трехфазные трансформаторы и автотрансформаторы. Они используются как повышающие на электрических станциях и понижающие на трансформаторных подстанциях.

При эксплуатации в ЭЭС возможно насыщение магнитной системы силовых трансформаторов по следующим причинам:

1. При включении силового трансформатора в режим холостого хода;
2. При перевозбуждении трансформатора при повышении напряжения на первичной обмотке и номинальной частоте или при понижении частоты и номинальном напряжении;
3. При коротком замыкании во внешней ЭЭС, подключенной к вторичной обмотке силового трансформатора;
4. При одновременном намагничивании магнитной системы силового трансформатора переменным и постоянным магнитными полями.

Процессы насыщения магнитной системы силовых трансформаторов по причинам 1 – 3 описаны в работах [1-5]. Поведение ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании переменным и постоянным магнитными полями рассмотрено в работе [6]. Не исследован вопрос насыщения магнитной системы силовых трансформаторов, водящих в ЭЭС, когда по обмоткам одновременно протекают переменный и постоянный токи, вызванные, например, природными воздействиями такими, как грозовая и сейсмическая активность или возмущения космической погоды [7].

Задача расчёта электромагнитных процессов, протекающих в магнитной системе силового трансформатора при ее намагничивании одновременно переменным и постоянным магнитными полями, рассмотрена на модели обмотки силового трансформатора с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником (рис. 1), схема замещения которой приведена на рис. 2, и сводится к определению зависимости индуктивности обмотки $L(i_0)$ от протекающего по ней тока намагничивания i_0 . На схеме замещения (рис. 2) обозначены: e_{Γ} – ЭДС переменного тока частотой $f = 50 \text{ Гц}$; $e_{\text{пост}}$ – ЭДС постоянного тока; r – активное сопротивление цепи.

Расчётная модель для исследования электромагнитных процессов при одновременном намагничивании переменным и постоянным магнитными полями для бесконечного цилиндрического ферромагнитного сердечника приведена на рис. 3.

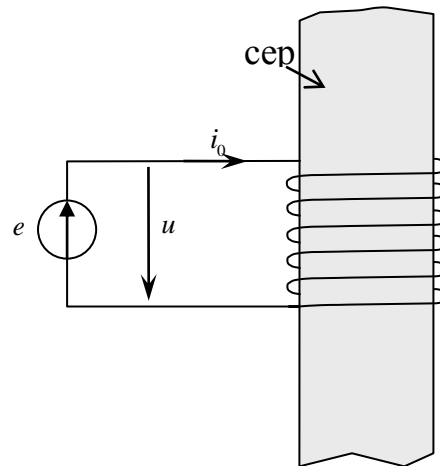


Рис. 1. Модель обмотки силового трансформатора с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником

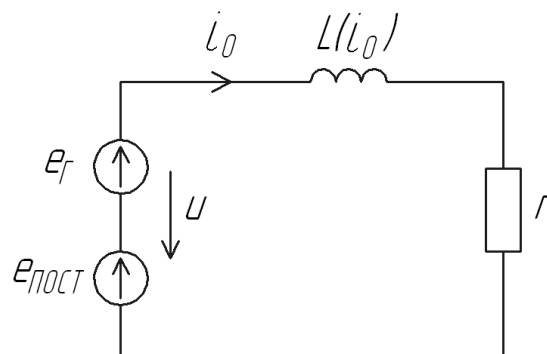


Рис. 2. Схема замещения обмотки силового трансформатора

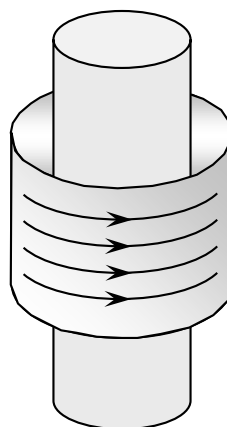


Рис. 3. Расчетная модель

Обмотка заменена круговым поверхностным током I , текущим по круговой ленте радиусом r_0 и шириной $2z_0$. Ферромагнитный сердечник имеет радиус r_1 и относительную магнитную проницаемость μ_1 . Область, где протекает ток I , имеет относительную магнитную проницаемость μ_2 ($\mu_2 = 1$). Расчёт выполнен в цилиндрической системе координат (r, φ, z) . Система координат и расчетные размеры модели показаны на рис. 4 и 5.

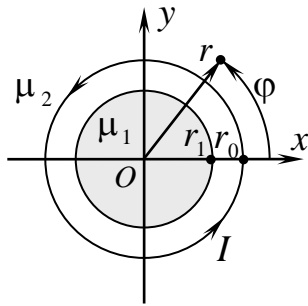


Рис. 4. Система координат

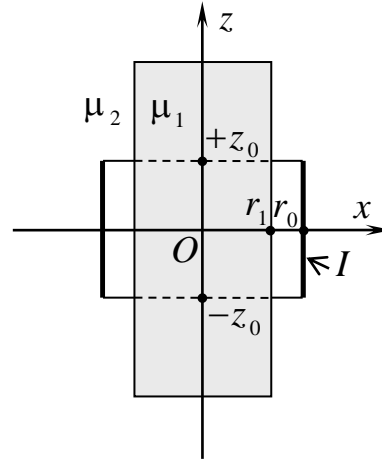


Рис. 5. Расчетные размеры модели

Моделирование обмотки в виде ленты является предпочтительным по сравнению с её представлением в виде совокупности бесконечно тонких колец. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в этом случае векторный потенциал всюду конечен в отличие от моделей бесконечно тонких колец, в которых потенциал может стремиться к бесконечности при приближении к точкам кольца.

С целью упрощения расчетов в модели μ_1 принята постоянной при заданном токе I , т. е. все точки сердечника имеют одно и то же значение μ_1 . Это означает, что не учитывается неоднородность намагничивания сердечника током I .

Ток в ленте I равен полному току обмотки $I = i_0 \cdot w$, где w – число витков обмотки. Тогда поверхностная плотность тока $j_{s\varphi}$ с учетом [1,8] равна:

$$j_{s\varphi} = \begin{cases} \frac{I}{2z_0}, & |z| \leq z_0; \\ 0, & |z| > z_0. \end{cases} \quad (1)$$

При выбранной геометрии в цилиндрической системе координат круговой ленточный ток имеет только φ – составляющую ($\vec{j} = j_\varphi \cdot \vec{e}_\varphi$) и создает векторный потенциал \vec{A} , имеющий единственную составляющую A_φ , которая не зависит от φ . В свободном пространстве (ферромагнитный сердечник отсутствует) система уравнений для компонент \vec{A} имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta A_r - \frac{1}{r^2} A_r - \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} = -\mu_2 \mu_0 j_r; \\ \Delta A_\varphi - \frac{1}{r^2} A_\varphi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} = -\mu_2 \mu_0 j_\varphi; \\ \Delta A_z = -\mu_2 \mu_0 j_z, \end{cases} \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}.$$

Составляющая A_φ удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_\varphi - \frac{1}{r^2} A_\varphi + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_\varphi = -\mu_2 \mu_0 j_\varphi. \quad (3)$$

Для уравнения (3) при токе, текущем по ленте шириной $2z_0$, регулярные решения во внутренней ($r < r_0$) и во внешней ($r > r_0$) областях:

$$\begin{cases} A_\varphi^{(1)} = \int_0^\infty C_1(\lambda) I_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r < r_0), \\ A_\varphi^{(2)} = \int_0^\infty C_2(\lambda) K_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r > r_0), \end{cases} \quad (4)$$

где I_1 и K_1 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода первого порядка; коэффициенты $C_1(\lambda)$ и $C_2(\lambda)$ определяются из условий на границе ($r = r_0$).

Функции Бесселя имеют особенности [9,10]:

а) при $x \rightarrow \infty$ $I_n(x) \approx \sqrt{\frac{1}{2\pi x}} e^x$, $K_n(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x}$;

б) при $x \rightarrow 0$ $I_n(x) = O(x^n)$, $K_{n \neq 0}(x) \approx O(x^{-n})$, $K_0(x) = O\left(\ln \frac{1}{x}\right)$,

где n – целое неотрицательное число.

Граничные условия для компонент A_φ вытекают из граничных условий для нормальной составляющей магнитной индукции $B_r^{(1)} = B_r^{(2)}$ и тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля $H_z^{(1)} - H_z^{(2)} = j_{S\varphi}$ ($H_\varphi = 0$) [8,9]. При $r = r_0$:

$$A_\varphi^{(1)} = A_\varphi^{(2)}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi^{(1)}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi^{(2)}) = \mu_2 \mu_0 j_{S\varphi}. \quad (6)$$

Условие (6) с учётом (5):

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial A_\varphi^{(1)}}{\partial r} - \frac{\partial A_\varphi^{(2)}}{\partial r} \right) = \mu_2 \mu_0 j_{S\varphi}, \quad r = r_0. \quad (7)$$

Применив граничные условия (5) и (6) к системе (4), получены уравнения для определения коэффициентов $C_1(\lambda)$ и $C_2(\lambda)$:

$$\begin{cases} C_1(\lambda) = c_0 \sin c(\lambda z_0) K_1(\lambda r_0), \\ C_2(\lambda) = c_0 \sin c(\lambda z_0) I_1(\lambda r_0), \end{cases} \quad (8)$$

где $c_0 = \frac{\mu_2 \mu_0 r_0 I}{\pi}$.

Подстановка (8) в (4) позволяет найти векторный потенциал кругового ленточного тока

$$A_\varphi^{(1)} = c_0 \int_0^\infty \sin c(\lambda z_0) K_1(\lambda r_0) I_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r < r_0), \quad (9)$$

$$A_\varphi^{(2)} = c_0 \int_0^\infty \sin c(\lambda z_0) I_1(\lambda r_0) K_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r > r_0). \quad (10)$$

Система уравнений для компонент A_φ векторного потенциала \vec{A} обмотки с ферромагнитным сердечником

$$\begin{cases} A_{\varphi 1} = \int_0^\infty A I_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r < r_1), \\ A_{\varphi 21} = \int_0^\infty [C_1 I_1(\lambda r) + B K_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, & (r_1 < r < r_0), \\ A_{\varphi 22} = \int_0^\infty [C_2 + B] K_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r > r_0). \end{cases} \quad (11)$$

Коэффициенты A и B , зависящие от λ , могут быть найдены из граничных условий при $r = r_1$, которые записываются аналогично условиям (5) – (7) с учетом магнитных проницаемостей μ_1 , μ_2 и отсутствия поверхностного тока на границе

$$A = C_1 \frac{1}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) K_1(\lambda r_1)}, \quad (12)$$

$$B = C_1 \frac{(1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) I_1(\lambda r_1)}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) K_1(\lambda r_1)}, \quad (13)$$

где $m_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1}$.

В случае $r_1 = r_0$ (ленточный ток на поверхности цилиндрического ферромагнитного сердечника) можно упростить выражение $C_2 + B$, входящее в интеграл (11) для составляющей $A_{\varphi 22}$:

$$C_2 + B = C_2 \frac{1}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) K_1(\lambda r_1)}. \quad (14)$$

Решения для векторного потенциала позволяют получить уравнения для силовых линий магнитного поля обмотки с бесконечным цилиндрическим ферромагнитным сердечником. Вектор магнитной индукции имеет в данном случае только составляющие B_r и B_z ($B_\varphi = 0$), поэтому в плоскости rz (рисунок 4) уравнение силовых линий магнитного поля будет иметь вид:

$$\frac{dr}{B_r} = \frac{dz}{B_z} \text{ или } B_z dr - B_r dz = 0. \quad (15)$$

Искомое уравнение силовых линий

$$rA_\varphi = const. \quad (16)$$

Таким образом, система силовых линий вектора магнитной индукции может быть получена как система линий уровня функции $rA_\varphi(r, z)$.

Векторный потенциал \vec{A} позволяет рассчитать магнитный поток Φ и энергию магнитного поля W_M [8]

$$\Phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}, \quad (17)$$

$$W_M = \frac{1}{2} \int \vec{j} \cdot \vec{A} dV. \quad (18)$$

В формуле (17) интегрирование выполняется по контуру, через который определяется поток, в формуле (18) – по объему, в котором текут токи. Если рассматривать контуры в виде окружностей радиуса r , лежащих в плоскости $z=const$ и не нарушающих симметрии системы, то выражение (17) можно переписать как

$$\Phi = 2\pi r A_\varphi(r, z). \quad (19)$$

Для контура на поверхности ленты с током в плоскости $z = 0$

$$\Phi = 2\pi r_0 A_\varphi(r_0, z = 0). \quad (20)$$

Выражение (18) в случае поверхностного тока $j_{s\varphi}$ (1) примет вид:

$$W_M = \frac{I\pi r_0}{2z_0} \int_{-z_0}^{+z_0} A_\varphi(r_0, z) dz, \quad (21)$$

где $A_\varphi(r_0, z)$ вычисляется при $r_1 = r_0$.

С учётом введённых обозначений при $\mu_2 = 1$ выражения для магнитного потока Φ и энергии магнитного поля W_M примут вид:

$$\Phi = 8\mu_2 f \pi_0^2 I Q_1 = 8f \pi_0^2 I Q_1, \quad (22)$$

$$W_M = 4\mu_2 f \pi_0^2 I^2 Q_2 = 4f \pi_0^2 I^2 Q_2, \quad (23)$$

$$\text{где } \left\{ \begin{array}{l} Q_1 = \int_0^\infty \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{I_1(\lambda r_0) K_1(\lambda r_0)}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) K_1(\lambda r_1)} d\lambda; \\ Q_2 = \int_0^\infty (\text{sinc}(\lambda z_0))^2 \frac{I_1(\lambda r_0) K_1(\lambda r_0)}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_0(\lambda r_1) K_1(\lambda r_1)} d\lambda. \end{array} \right.$$

При этом среднее значение магнитной индукции и индуктивность обмотки:

$$B = B_{cp} = 8fIQ_1, \quad \frac{B}{I} = 8fQ_1 = \varphi_1(\mu_1), \quad (24)$$

$$L_I = 8f\pi r_0^2 Q_2 = \varphi_2(\mu_1). \quad (25)$$

В формулах (24) и (25) величины $\frac{B}{I}$ и L_I зависят от размеров r_0 , z_0 , которые для конкретной системы остаются неизменными, и магнитной проницаемости сердечника μ_1 . Магнитная проницаемость μ_1 является функцией магнитной индукции B ($\mu_1 = \mu_1(B)$), и, следовательно, тока I ($B = B(I)$). Зависимость $\mu_1 = \mu_1(B)$ может быть получена из кривой намагничивания для ферромагнитного сердечника, которая в общем случае нелинейна и известна для конкретного типа материала магнитной системы силового трансформатора [2].

Из уравнения (24) полный ток обмотки I определяется по выражению

$$I = \frac{B}{\varphi_1(\mu_1(B))} = \varphi_3(B), \quad (26)$$

где правая часть является известной функцией B . Зависимость $B=B(I)$ может быть получена путём нахождения обратной функции к φ_3 :

$$B = B(I) = (\varphi_3)^{-1}(I). \quad (27)$$

В результате зависимость индуктивности от тока в обмотке определится из выражения:

$$L_I = \varphi_2(\mu_1((\varphi_3)^{-1}(I))) = \varphi_4(I). \quad (28)$$

Индуктивность, отнесённая к току одного витка, равна:

$$L = L(i_0) = w^2 L_I(wi_0) = w^2 \varphi_4(wi_0). \quad (29)$$

Графики функций $\mu_1(B) = f_2(B)$, $\mu_1(H) = f_3(H)$ приведены на рис. 6 и 7.

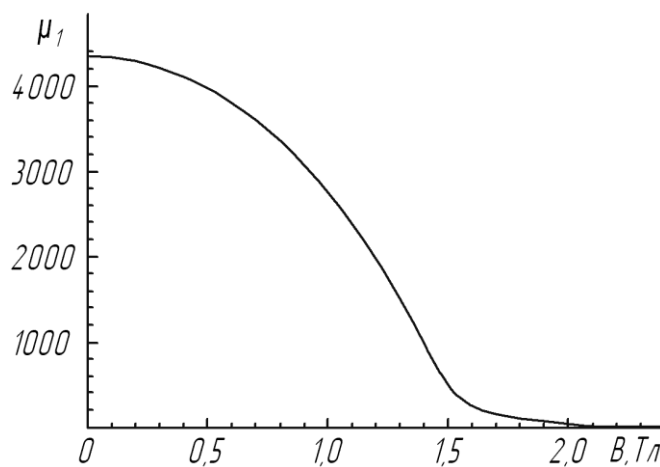


Рис. 6. Функция $\mu_1(B) = f_2(B)$

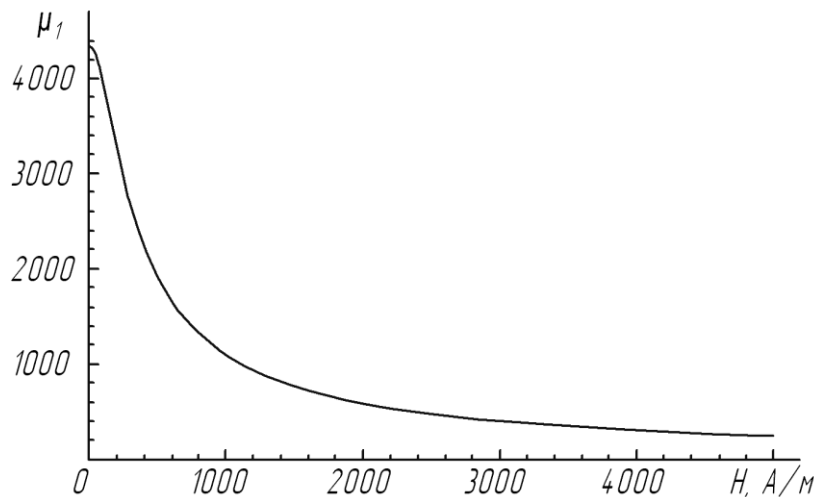


Рис. 7. Функция $\mu_1(H) = f_3(H)$

Таким образом, при увеличении напряженности магнитного поля от 0 до максимального значения магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника уменьшается в десятки раз. Начальные участки зависимостей $\mu_1(B)$ и $\mu_1(H)$, отличаются от характерных кривых, приводимых в [2], где начальная проницаемость значительно меньше максимальной, т.е. магнитная проницаемость имеет максимум в слабых полях, а не при нуле. Это отличие обусловлено неточной аппроксимацией начального участка кривой намагничивания, что связано с неточностью и недостаточностью имеющихся в распоряжении справочных материалов.

Введем нормированные значения переменных от r_0 :

$$\tilde{r}_0 = \tilde{r}_1 = 1, \quad \tilde{z}_0 = \frac{z_0}{r_0}, \quad \tilde{Q}_1 = r_0 Q_1, \quad \tilde{Q}_2 = r_0 Q_2, \quad \tilde{\lambda} = \lambda \cdot r_0, \quad \tilde{I} = \frac{I}{r_0}; \quad \tilde{L}_I = \frac{L_I}{r_0}. \quad (30)$$

После нормировки можно пользоваться формулами (24) – (29), считая, что в них введены нормированные величины, например:

$$\frac{B}{\tilde{I}} = 8f \tilde{Q}_1 = \tilde{\varphi}_1(\mu_1), \quad (31)$$

$$L_I = 8f\pi r_0^2 \tilde{Q}_2 = \tilde{\varphi}_2(\mu_1), \quad (32)$$

$$\tilde{L} = w^2 \tilde{\varphi}_4(w \tilde{i}_0). \quad (33)$$

Выражения для зависимостей ненормированной индуктивности обмотки силового трансформатора и магнитной индукции от тока намагничивания примут вид:

$$L = L(i_0) = w^2 r_0 \tilde{\varphi}_4\left(\frac{w i_0}{r_0}\right), \quad (34)$$

$$B = B(i_0) = \tilde{\varphi}_3\left(\frac{w i_0}{r_0}\right). \quad (35)$$

На рис. 8 приведена функция для нормированного значения тока $\tilde{I} = \tilde{\varphi}_3(B) = \frac{B}{\tilde{\varphi}_1(\mu_1(B))}$, на рис. 9 – функция для нормированного значения индуктивности $\tilde{L}_l = \tilde{L}_l(\tilde{I}) = \tilde{\varphi}_2\left(f_4\left(\tilde{\varphi}_3^{-1}(\tilde{I})\right)\right) = \tilde{\varphi}_4(\tilde{I})$. Полученные зависимости $\tilde{I} = \tilde{\varphi}_3(B)$ и $\tilde{L}_l = \tilde{\varphi}_4(\tilde{I})$ позволяют при заданных значениях r_0 и w определять функции ненормированных величин – индуктивности обмотки силового трансформатора $L = L(i_0)$ и магнитной индукции $B = B(i_0)$ от тока намагничивания.

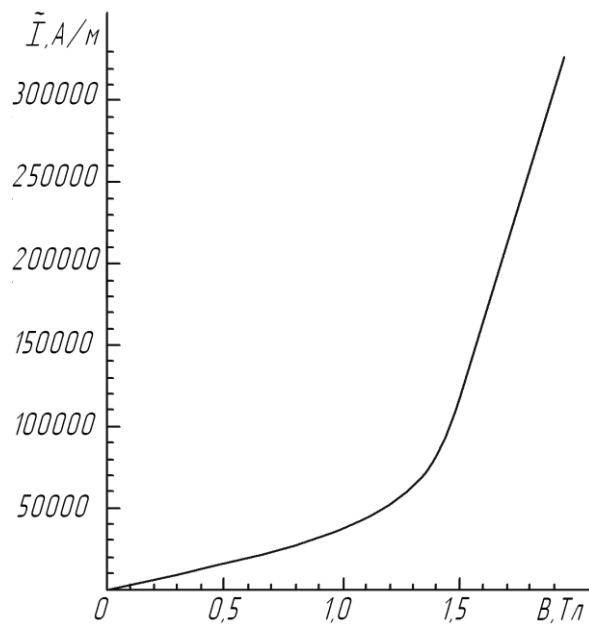


Рис. 8. Функция нормированного тока в ленте $\tilde{I} = \tilde{\varphi}_3(B) = \frac{B}{\tilde{\varphi}_1(\mu_1(B))}$

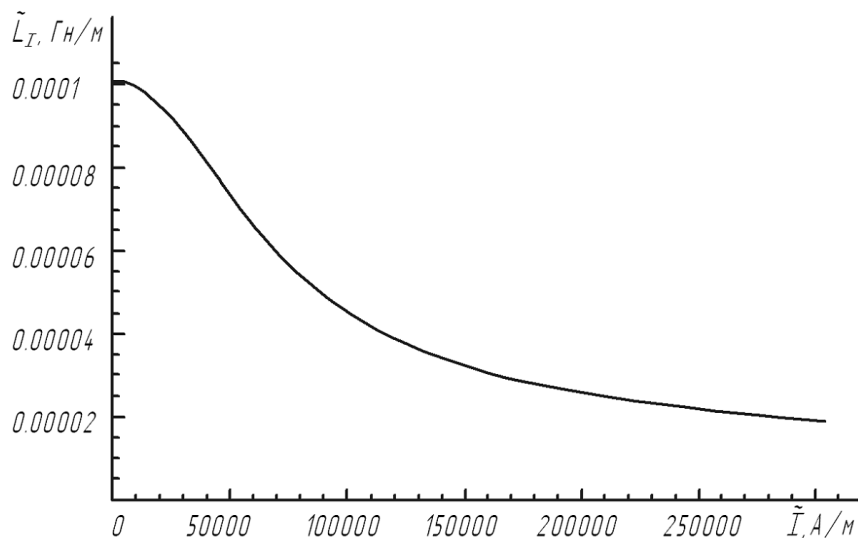


Рис. 9. Функция нормированной индуктивности $\tilde{L}_t = \tilde{L}_t(\tilde{I}) = \tilde{\varphi}_2 \left(f_4 \left((\tilde{\varphi}_3)^{-1}(\tilde{I}) \right) \right) = \tilde{\varphi}_4(\tilde{I})$

В качестве примера на рис. 10 приведена зависимость ненормированной индуктивности обмотки силового трансформатора $L(i_0)$ от протекающего в ней тока намагничивания при заданных параметрах: радиусе круговой ленты $r_0 = 0,5\text{ м}$ и числе витков обмотки $w = 200$. Полученная зависимость индуктивности обмотки от протекающего в ней тока намагничивания $L(i_0)$ нелинейная. Нелинейность характеристики обусловлена нелинейностью кривой намагничивания материала ферромагнитного сердечника $B(H) = f_1(H)$.

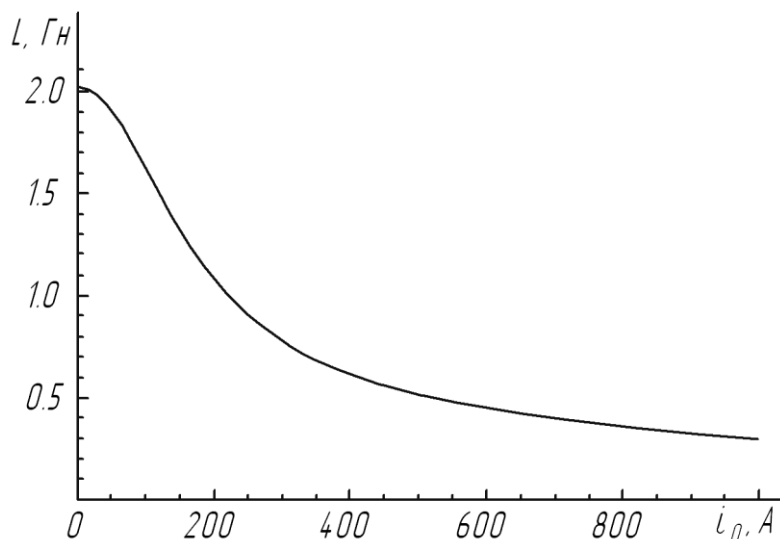


Рис. 10. График $L(i_0)$ при радиусе круговой ленты $r_0 = 0,5\text{ м}$ и числе витков обмотки $w = 200$

В результате выполненного моделирования получено, что при одновременном намагничивании ферромагнитного сердечника переменным и постоянным магнитными полями происходит смещение рабочей точки в область насыщения на кривой намагничивания. Магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника μ_1 нелинейно уменьшается.

Индуктивность обмотки $L(i_0)$, по которой протекает ток намагничивания, уменьшается и ее изменение носит нелинейный характер.

Полученные результаты позволяют исследовать процессы насыщения магнитной системы силового трансформатора, когда по его обмоткам одновременно протекают переменный и постоянный токи, вызванные природными воздействиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бамдас, А.М. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов [текст] / А.М. Бамдас, В.А. Сомов, А.О. Шмидт. – М. : Госэнергоатомиздат, 1959. – 520 с.
2. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнической стали [текст] / В.В. Дружинин. – М. : Энергия, 1974. – 240 с.
3. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов [текст] / Л.В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с.
4. Розенблат, М.А., Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники [текст] / М.А. Розенблат. – М. : Наука, 1974. – 768 с.
5. Электрические машины : Трансформаторы [текст]: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеев, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; под ред. И.П. Копылова. – М. : Высшая школа, 1989. – 352 с.
6. Кифер, И.И. Испытание ферромагнитных материалов [текст] / И.И. Кифер, В.С. Пантюшин. – М. : Госэнергоиздат, 1955. – 240 с.
7. Вахнина В.В. Технологические проблемы, вызванные возмущениями космической погоды, на примере возникновения геоиндуцированных токов в нейтральных силовых трансформаторов электрических сетей / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Шаповалов, А.Н. Черненко, А.Ю. Штырков, В.Т. Минлигареев. [текст] // Мир измерений. – 2014. - №9. – С. 3 – 7.
8. Даревский, А.И. Теоретические основы электротехники : в 2 ч. Ч.2. Основы теории электромагнитного поля [текст] / А.И. Даревский, Е.С. Кухаркин. – М. : Высшая школа, 1965. – 735 с.
9. Пановский, В. Классическая электродинамика [текст] / В. Пановский, М. Филипс. – М. : Физматгиз, 1963. – 432 с.
10. Семенов, М.Г. Введение в математическое моделирование [текст] / М.Г. Семенов. – М. : Солон-Р, 2002. – 112 с.

Рецензент: Кувшинов Алексей Алексеевич, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Россия, Тольятти, кафедра «Электроснабжения и электротехники».

Vera Vahnina Vasil'evna
Togliatti state university
Russia, Togliatti
E-mail: VVVahnina@yandex.ru

Vladimir Kuznetsov Nikolaevich
Togliatti state university
Russia, Togliatti
E-mail: EiE@tltu.ru

The model of power transformer winding with an infinite cylindrical ferromagnetic core

Abstract. This article studies the processes of magnetic saturation of power transformers included in electric power systems, while the magnetization of AC and DC magnetic fields. The problem of calculation of electromagnetic processes occurring in the magnetic system of power transformer, consider the model of the winding power transformer with an infinite cylindrical ferromagnetic core and reduced to the determination of the dependence of the inductance coil current flowing through it magnetization. To find solutions for the vector potential modeling winding is designed as a tape with a circular surface current. As a result, the simulation found that while the magnetization of the ferromagnetic core variable and constant magnetic fields shifting the operating point in the saturation region of the magnetization curve. The magnetic permeability of the ferromagnetic core decreases nonlinearly. The inductance of the coil through which flows the magnetizing current is reduced and its change is not linear. Due to the nonlinear dependence of the magnetic characteristics of the core material. The results obtained allow us to study the processes of magnetic saturation of the power transformer when he grounded windings occur simultaneously AC and DC currents caused by natural effects: lightning or seismic activity, space weather disturbances.

Keywords: power transformer; a ferromagnetic core; magnetizing current; mathematical model power system; magnetic field; inductance of the winding.

REFERENCES

1. Bamdas, A.M. Transformers and stabilizers, adjustable magnetization shunts [text] / A.M. Bamdas, V.A. Somov, A.O. Schmidt. - M.: Gosenergoatomizdat, 1959. - 520 p.
2. Druzhinin, V.V. The magnetic properties of electrical steel [text] / V.V. Druzhinin. - M: Energy, 1974. - 240 p.
3. Leites, L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors [text] / L.V. Leites. - M: Energy, 1981. - 392 c.
4. Rosenblatt, M.A. Magnetic elements Automation and Computer Engineering [text] / M.A. Rosenblatt. - Moscow: Nauka, 1974. - 768 p.
5. Electrical Machines: Transformers [text]: Proc. allowance for ELECTROMECHANIC. spec. Universities / B.N. Sergeenkov, V.M. Kiselev, N.A. Akimov; Ed. I.P. Kopylov. - Moscow: Higher School, 1989. - 352 p.
6. Kiefer, I.I. Test ferromagnetic materials [text] / I.I. Kiefer, V.S. Pantyushin. - M.: Gosenergoizdat, 1955. - 240 p.
7. V.V. Vakhnina, Technological problems caused by space weather disturbances, the example of the emergence geinduced neutral currents in power transformers electrical networks / V.V. Vakhnina, A.A. Pitchers, V.A. Shapovalov, A.N. Chernenko, A.Y. Shtyrkov, V.T. Minligareev. [text] // The world measurements. - 2014. - №9. - P. 3 - 7.
8. Darevskii, A.I. Theory of Electrical Engineering: 2 hours. Part2. Fundamentals of the theory of the electromagnetic field [text] / A.I. Darevskii, E.S. Kukharkin. - Moscow: Higher School, 1965. - 735 p.
9. Panofsky, V. Electrodynamics [text] / W. Panofsky, M. Phillips. - Moscow: Fizmatgiz, 1963. - 432 p.
10. Semenenko, M.G. Introduction to mathematical modeling [text] / M.G. Semenenko. - M.: Solon P, 2002. - 112 p.