

## Модель обмотки силового трансформатора для учета влияния квазипостоянного тока на режим работы силового трансформатора

*В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, Д.А. Кретов*

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти*

**Аннотация:** Протекание квазипостоянного тока по обмоткам силового трансформатора вызывает смещение рабочей точки с колена кривой намагничивания в зону насыщения. Таким образом, происходит изменение режима работы силового трансформатора. Для учета влияния квазипостоянных токов на режим работы силового трансформатора рассмотрена модель обмотки силового трансформатора с бесконечным ферромагнитным сердечником и цилиндрической магнитной оболочкой. Сравнение рассмотренной модели обмотки силового трансформатора с моделью обмотки без учета оболочки показало отличие в зависимостях индуктивностей от тока намагничивания порядка 20% в зоне токов намагничивания меньше 100 А.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, насыщение, моделирование, обмотка силового трансформатора, система электроснабжения, квазипостоянный ток, система электроснабжения, линии электропередачи, геомагнитные бури, космическая погода.

### Введение

Изменения космической погоды вызывают относительно быстрые изменения геомагнитного поля Земли, что приводит к появлению в системах электроснабжения квазипостоянных токов (КПТ), которые попадают с СЭС через заземленные нейтрали силовых трансформаторов (СТ). Амплитудные значения КПТ в протяженных высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) могут быть сравнимы со значениями рабочих токов ЛЭП. Квазипостоянные токи вызывают изменение режима работы СТ за счет насыщения ферромагнитного сердечника. Для учета влияния квазипостоянных токов на режим работы силового трансформатора необходимо учитывать изменение индуктивности ветви намагничивания от величины протекающего квазипостоянного тока.

### Описание модели обмотки силового трансформатора

Для получения зависимости индуктивности ветви намагничивания СТ от величины КПТ рассмотрена модель обмотки СТ с бесконечным ферромагнитным сердечником и цилиндрической магнитной оболочкой.

Обмотка СТ заменена круговым поверхностным током  $I$ , текущим по поверхности круговой ленты радиуса  $r_0$  и шириной  $2z_0$ . Расчёт выполнен в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  (рисунок 1).

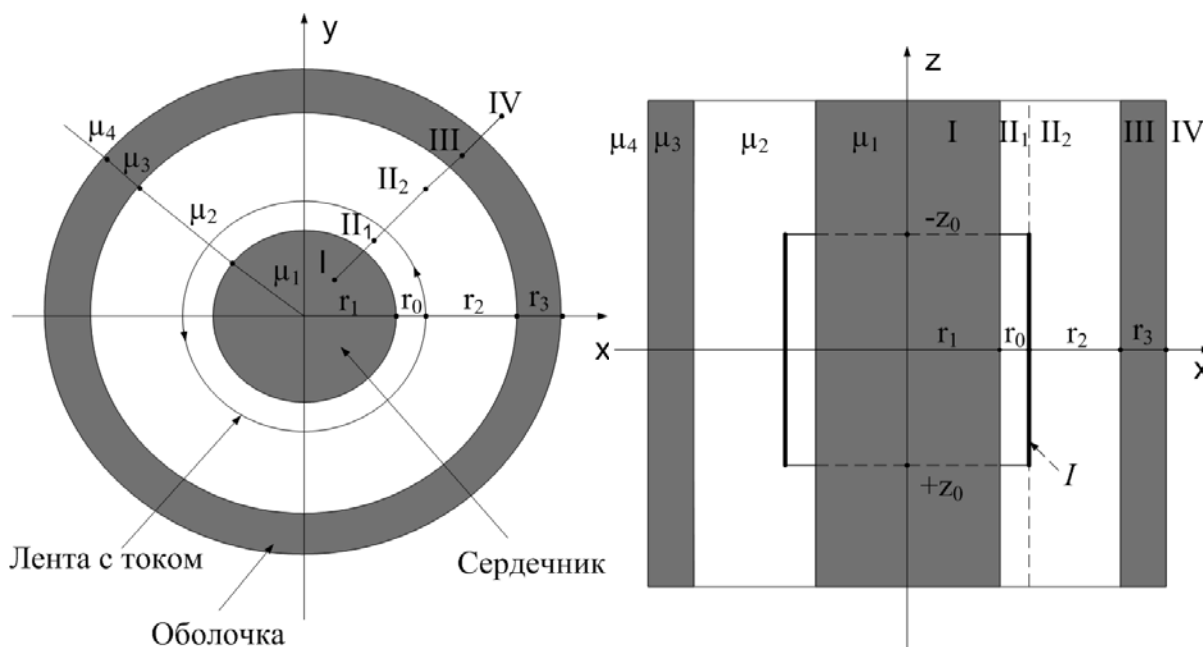


Рис. 1. – Модель обмотки с бесконечным сердечником и цилиндрической магнитной оболочкой

а) – система координат; б) – расчетные размеры

На рисунке 1 обозначены:

I – ферромагнитный сердечник с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_1$ ;

II – область, включающая обмотку СТ с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_2 = 1$ ;

III – цилиндрическая оболочка из конструкционной стали с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_3$ ;

IV – область учитывающая бак СТ с магнитной проницаемостью  $\mu_4 = 1$ ;

$r_1, r_0, r_2, r_3$  – радиусы областей I, II, III и IV.

Относительная магнитная проницаемость  $\mu_1$  в модели принята постоянной при заданном токе  $I$ , т. е. все точки сердечника имеют одно и то

же значение  $\mu_1$ . Это означает, что не учитывается неоднородность намагничивания сердечника током  $I$ .

Под током  $I$  понимается полный ток, текущий по ленте

$$I = i_0 \cdot w,$$

где  $w$  – число витков в обмотке.

Для моделирования процессов насыщения СТ в соответствии с [5] рассчитаем векторный потенциал  $\vec{A}$  кругового ленточного тока, расположенного в свободном пространстве (сердечник отсутствует). Поскольку плотность тока имеет только  $\varphi$  – составляющую  $\vec{j} = j_\varphi \cdot \vec{e}_\varphi$ , то и векторный потенциал  $\vec{A}$  имеет единственную составляющую  $A_\varphi(r, z)$ , которая не зависит от  $\varphi$ .

Система уравнений для компонент  $A_\varphi$  векторного потенциала  $\vec{A}$  исследуемой системы:

$$\begin{cases} A_{\varphi 1} = \int_0^\infty AI_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r < r_1), \\ A_{\varphi 21} = \int_0^\infty [C_1 I_1(\lambda r) + BK_1(\lambda r) + DI_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, & (r_1 < r < r_0), \\ A_{\varphi 22} = \int_0^\infty [C_2 I_1(\lambda r) + BK_1(\lambda r) + DI_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, & (r_0 < r < r_2), \\ A_{\varphi 3} = \int_0^\infty [EK_1(\lambda r) + FI_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, & (r_2 < r < r_3), \\ A_{\varphi 4} = \int_0^\infty GK_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, & (r > r_3), \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ , определяются из уравнений (2):

$$\begin{cases} C_1(\lambda) = c_0 \sin c(\lambda z_0) K_1(\lambda r_0) \\ C_2(\lambda) = c_0 \sin c(\lambda z_0) I_1(\lambda r_0) \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты  $A, B, D, E, F, G$  могут быть найдены из граничных условий при  $r = r_1, r = r_2, r = r_3$  (по 2 на каждой границе):

$$\text{при } r = r_1, A_{\varphi 1} = A_{\varphi 21},$$

$$\frac{1}{\mu_1} \left( A_{\varphi 1} + r \frac{\partial A_{\varphi 1}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu_2} \left( A_{\varphi 21} + r \frac{\partial A_{\varphi 21}}{\partial r} \right); \quad (3)$$

при  $r = r_2$ ,  $A_{\varphi 22} = A_{\varphi 3}$ ,

$$\frac{1}{\mu_2} \left( A_{\varphi 22} + r \frac{\partial A_{\varphi 22}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu_3} \left( A_{\varphi 3} + r \frac{\partial A_{\varphi 3}}{\partial r} \right); \quad (4)$$

при  $r = r_3$ ,  $A_{\varphi 3} = A_{\varphi 4}$ ,

$$\frac{1}{\mu_3} \left( A_{\varphi 3} + r \frac{\partial A_{\varphi 3}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu_4} \left( A_{\varphi 4} + r \frac{\partial A_{\varphi 4}}{\partial r} \right). \quad (5)$$

Обозначив  $m_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ ,  $m_2 = \frac{\mu_3}{\mu_2}$ ,  $m_3 = \frac{\mu_4}{\mu_3}$ ,

$$I_{11} = I_1(\lambda r_1), \quad K_{11} = K_1(\lambda r_1), \quad I'_{11} = I'_1(\lambda r_1), \quad K'_{11} = K'_1(\lambda r_1),$$

$$I_{01} = I_0(\lambda r_1), \quad K_{01} = K_0(\lambda r_1),$$

$$I_{12} = I_1(\lambda r_2), \quad K_{12} = K_1(\lambda r_2), \quad I'_{12} = I'_1(\lambda r_2), \quad K'_{12} = K'_1(\lambda r_2),$$

$$I_{02} = I_0(\lambda r_2), \quad K_{02} = K_0(\lambda r_2),$$

$$I_{13} = I_1(\lambda r_3), \quad K_{13} = K_1(\lambda r_3), \quad I'_{13} = I'_1(\lambda r_3), \quad K'_{13} = K'_1(\lambda r_3),$$

$$I_{03} = I_0(\lambda r_3), \quad K_{03} = K_0(\lambda r_3).$$

подставив (2) в граничные условия (3)-(5), получим:

$$\begin{cases} AI_{11} = C_1 I_{11} + BK_{11} + DI_{11}, \\ m_1 AI_{01} = C_1 I_{01} - BK_{01} + DI_{01}, \\ C_2 K_{12} + BK_{12} + DI_{12} = EK_{12} + FI_{12}, \\ m_2 (-C_2 K_{02} - BK_{02} + DI_{02}) = -EK_{02} + FI_{02}, \\ EK_{13} + FI_{13} = GK_{13}, \\ m_3 (-EK_{03} + FI_{03}) = -GK_{03}. \end{cases} \quad (6)$$

Из системы (6) получены выражения для определения коэффициентов  $A, B, D, E, F, G$ :

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{C_1 a + C_2 b}{\tilde{\Delta}}, & G &= \frac{C_1 \Pi_1^* + C_2 KI_1^*}{\tilde{\Delta}}, \\ B &= A \cdot \Pi_1^*, & C_1 + D &= A \cdot KI_1^*, \\ D &= G \cdot b, & C_2 + B &= G \cdot a, \\ E &= G \cdot IK_3, & F &= G \cdot KK_3, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} IK_3 &= \lambda r_3 \left( I_{03} K_{13} + \frac{1}{m_3} I_{13} K_{03} \right); \\ KK_3 &= \lambda r_3 \left( 1 - \frac{1}{m_3} \right) K_{03} K_{13}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= IK_2 IK_3 + \Pi_2 KK_2; \\ b &= KK_2 IK_3 + KI_2 KK_3, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} IK_2 &= \lambda r_2 \left( I_{02} K_{12} + \frac{1}{m_2} I_{12} K_{02} \right); \\ KI_2 &= \lambda r_2 \left( K_{02} I_{12} + \frac{1}{m_2} K_{12} I_{02} \right); \\ \Pi_2 &= \lambda r_2 \left( 1 - \frac{1}{m_2} \right) I_{02} I_{12}; \\ KK_2 &= \lambda r_2 \left( 1 - \frac{1}{m_2} \right) K_{02} K_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} KI_1^* &= \lambda r_1 (K_{01} I_{11} + m_1 K_{11} I_{01}); \\ \Pi_1^* &= \lambda r_1 (1 - m_1) I_{01} I_{11}; \\ \tilde{\Delta} &= KI_1^* a - \Pi_1^* b. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

С учетом выражений (7) – (11) составляющая  $A_\varphi(r, z)$  векторного потенциала исследуемой системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\varphi 1} = \int_0^{\infty} A \cdot I_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r < r_1), \\ A_{\varphi 21} = \int_0^{\infty} A \cdot [KI_1^* I_1(\lambda r) + II_1^* K_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r_1 < r < r_0), \\ A_{\varphi 22} = \int_0^{\infty} G \cdot [aK_1(\lambda r) + bI_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r_0 < r < r_2), \\ A_{\varphi 3} = \int_0^{\infty} G \cdot [IK_3 K_1(\lambda r) + KK_3 I_1(\lambda r)] \cos(\lambda z) d\lambda, \quad (r_2 < r < r_3), \\ A_{\varphi 4} = \int_0^{\infty} G \cdot K_1(\lambda r) \cos(\lambda z) d\lambda. \quad (r > r_3). \end{array} \right. \quad (12)$$

Для нахождения индуктивности обмотки силового трансформатора применим выражения векторного потенциала  $A_{\varphi}(r_0, z)$  для вычисления энергии магнитного поля  $W_M$  и  $A_{\varphi}(r_1 = r_0, 0)$  – для вычисления потока  $\Phi_1$  через ферромагнитный сердечник в плоскости  $z = 0$ , а также  $A_{\varphi}(r_2, 0)$  и  $A_{\varphi}(r_3, 0)$  для вычисления потока  $\Phi_3$  через сечение магнитной оболочки в плоскости  $z = 0$ :

$$\Phi_3 = 2\pi(r_3 A_{\varphi}(r_3, 0) - r_2 A_{\varphi}(r_2, 0)). \quad (13)$$

Для частного случая  $r_1 = r_0$ , когда поверхностный ток находится на поверхности сердечника:

$$\begin{aligned} A_{\varphi}(r_0, z) &= c_0 \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{K_1(\lambda r_0) a + I_1(\lambda r_0) b}{\Delta} I_1(\lambda r_0) \cos(\lambda z) d\lambda = \\ &= c_0 \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{K_{10} a + I_{10} b}{KI_1^* a - II_1^* b} I_{10} \cos(\lambda z) d\lambda. \end{aligned} \quad (14)$$

При отсутствии оболочки ( $a = 1, b = 0$ ) выражение (14) преобразуется в вид:

$$A_{\varphi}(r_0, z) = c_0 \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{I_{10} K_{10}}{1 - (1 - m_1) \lambda r_1 I_{01} K_{11}} \cos(\lambda z) d\lambda \quad (15)$$

или при  $z = 0$

$$A_{\varphi}(r_0, 0) = c_0 \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{K_{10} a + I_{10} b}{KI_1^* a - II_1^* b} I_{10} d\lambda. \quad (16)$$

Для вычисления энергии магнитного поля и потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$  введем обозначения  $Q_3, Q_4$ :

$$\left. \begin{aligned} Q_3 &= \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \cdot \frac{K_{10}a + I_{10}b}{KI_1^*a - II_1^*b} I_{10} d\lambda; \\ Q_4 &= \int_0^{\infty} (\text{sinc}(\lambda z_0))^2 \cdot \frac{K_{10}a + I_{10}b}{KI_1^*a - II_1^*b} I_{10} d\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

причём  $Q_3 = Q_3(r_0, z_0, \mu_1, r_2, r_3, \mu_3)$  и  $Q_4 = Q_4(r_0, z_0, \mu_1, r_2, r_3, \mu_3)$ , т.е.  $Q_3$  и  $Q_4$  зависят также от параметров цилиндрической магнитной оболочки  $r_2, r_3, \mu_3$ .

Из (13) с учетом (12) получим выражение для вычисления потока  $\Phi_3$

$$\Phi_3 = 2\pi c_0 \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{K_{10}II_1^* + I_{10}KI_1^*}{KI_1^*a - II_1^*b} (K_{13} \cdot r_3 - (IK_3K_{12} + KK_3I_{12}) \cdot r_2) d\lambda. \quad (18)$$

Введём обозначение для интеграла в выражении (18),

$$Q_5 = \int_0^{\infty} \text{sinc}(\lambda z_0) \frac{K_{10}II_1^* + I_{10}KI_1^*}{KI_1^*a - II_1^*b} (K_{13} \cdot r_3 - (IK_3K_{12} + KK_3I_{12}) \cdot r_2) d\lambda. \quad (19)$$

Аналогично для  $Q_3, Q_4$  интеграл  $Q_5 = Q_5(r_0, z_0, \mu_1, r_2, r_3, \mu_3)$ .

Поток  $\Phi_3$  через сечение оболочки в плоскости  $z=0$  из выражения (18):

$$\Phi_3 = 8f\pi_0 IQ_5, \quad (20)$$

откуда

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{\pi(r_3^2 - r_2^2)} = \frac{8f I r_0 Q_5}{r_3^2 - r_2^2}. \quad (21)$$

Таким образом, получены выражения для магнитной индукции и индуктивности обмотки от тока намагничивания:

$$\frac{B_1}{I} = 8fQ_3 = \varphi_{1,1}(\mu_1, \mu_3), \quad (22)$$

$$\frac{B_3}{I} = \frac{8fr_0Q_5}{r_3^2 - r_2^2} = \varphi_{1,2}(\mu_1, \mu_3), \quad (23)$$

$$L_l = 8f\pi_0 r_0^2 Q_4 = \varphi_2(\mu_1, \mu_3). \quad (24)$$

В формулах (21) – (23)  $\mu_1 = \mu_1(B)$ ,  $\mu_3 = \mu_3(B)$ ,  $B_1 = B_1(I)$ ,  $B_3 = B_3(I)$ .

Зависимость  $\mu_1 = \mu_1(B_1) = f_{4,1}(B_1)$  для сердечника силового трансформатора получена на основе кривой намагничивания электротехнической стали. Для получения зависимости  $\mu_3 = \mu_3(B) = f_{4,3}(B_3)$  в случае цилиндрической магнитной оболочки рассмотрена кривая намагничивания конструкционной стали, которая отличается от кривой для электротехнической стали.

Из (21), (22) ток в ленте:

$$I = \frac{B_1}{\varphi_{1,1}(\mu_1(B_1), \mu_3(B_3(B_1)))} = \frac{B_1}{\varphi_{1,1}(f_{4,1}(B_1), f_{4,2}(\psi(B_1)))} = \varphi_3(B_1), \quad (24)$$

где  $\varphi_3 = \varphi_3(B_1) = B_3(B_1)$ .

Зависимость  $B_1(I)$  может быть получена путём нахождения обратной функции к  $\varphi_3$ :

$$B_1 = B_1(I) = (\varphi_3)^{-1}(I). \quad (25)$$

В результате зависимость индуктивности от тока в ленте:

$$L_I = \varphi_2(f_{4,1}((\varphi_3)^{-1}(I)), f_{4,2}(\psi((\varphi_3)^{-1}(I)))) = \varphi_4(I). \quad (26)$$

Индуктивность  $L$ , отнесённая к току одного витка равна:

$$L = L(i_0) = w^2 L_I(wi_0) = w^2 \varphi_4(wi_0). \quad (27)$$

### Результаты моделирования

Для рассмотренной модели обмотки СТ с бесконечным ферромагнитным сердечником и цилиндрической магнитной оболочкой был проведен расчет зависимости индуктивности обмотки от величины тока намагничивания. Расчет проводился для обмотки с числом витков  $w = 200$  и радиусом круговой ленты  $r_0 = 0,5$  м. На рисунке 2 приведены две зависимости индуктивности обмотки СТ от тока намагничивания. Кривая 1 учитывает влияния бака СТ (с оболочкой), кривая 2 не учитывает влияние бака силового трансформатора на индуктивность обмотки.



Анализ полученных зависимостей показывает, что в области токов намагничивания от 0 до 100 А наблюдается различия в значениях индуктивностей обмотки до 20% без учета и с учетом оболочки из конструкционной стали. В области токов намагничивания выше 100 А различия практически не наблюдаются.

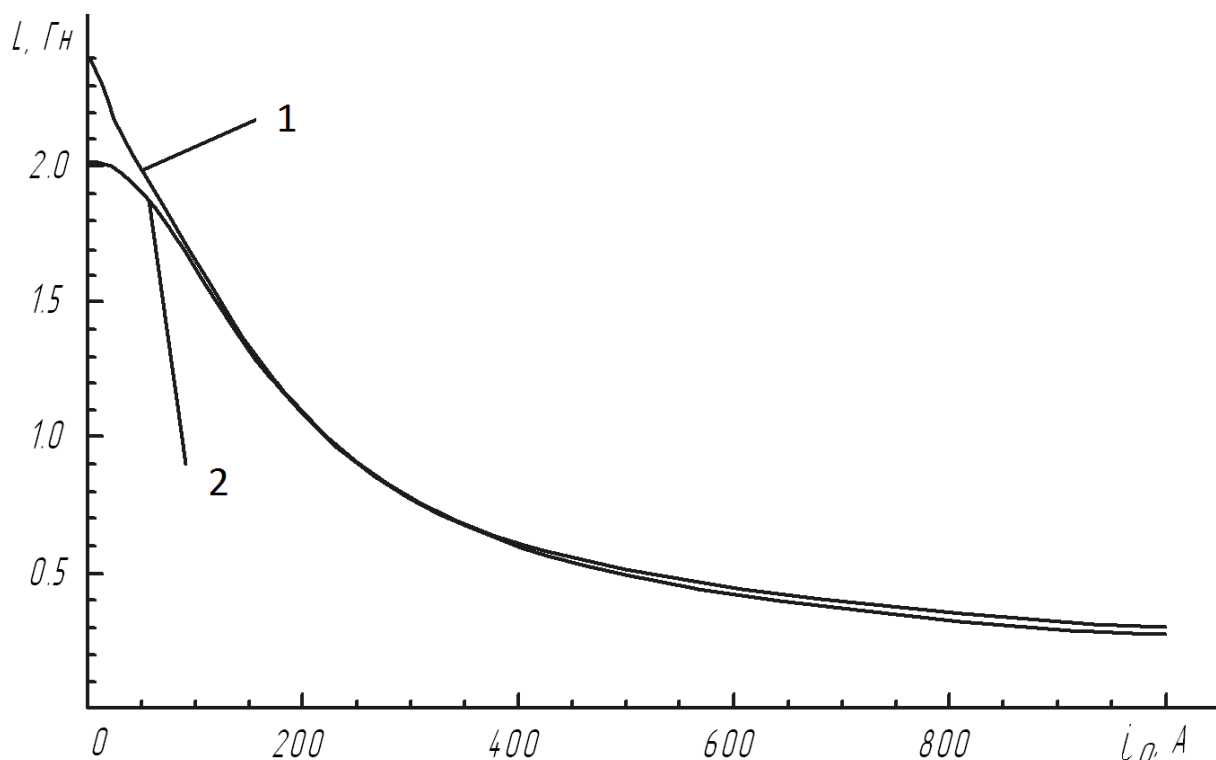


Рис. 2. – Зависимость  $L = L(i_0)$  для обмотки с бесконечным сердечником и цилиндрической магнитной оболочкой при радиусе круговой ленты  $r_0 = 0,5$  и числе витков обмотки  $w = 200$  (1 – с оболочкой, 2 – без оболочки)

### Заключение

Рассматриваемая модель обмотки силового трансформатора позволяет учитывать влияние КПТ на режим его работы. Сравнение полученных зависимостей индуктивностей обмоток от тока намагничивания для модели с учетом и без учета бака показало, что наибольшие отличия, порядка 20%, наблюдаются при значениях тока намагничивания меньше 100 А. При значениях тока намагничивания выше 100 А отличия в характеристиках  $L(i_0)$

не значительны, что объясняется насыщением цилиндрической магнитной оболочки и уменьшением её магнитной проницаемости. Поэтому при моделировании процессов насыщения в присутствии квазипостоянных токов бак силового трансформатора необходимо учитывать только при токах намагничивания величиной меньше 100 А.

### Литература

1. Вахнина, В.В., Черненко, А.Н., Кузнецов, В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. - 2012. - №3(21). - С. 65-66.
2. Вахнина, В.В., Кретов, Д.А. Определение допустимых уровней геоиндуцированных токов для обеспечения работоспособности силовых трансформаторов при геомагнитных бурях // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». - 2012. - №3. URL: [naukovedenie.ru/sbornik12/12-93.pdf](http://naukovedenie.ru/sbornik12/12-93.pdf).
3. Бадамс, А.М., Сомов, В.А., Шмидт, А.О. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов. - М.: Госэнергоатомиздат, 1959. – 159 с.
4. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. - М.: Энергия, 1974. – 240 с.
5. Пановский, В., Филипс, М. Классическая электродинамика. - М.: Физматгизд, 1963. – 432 с.
6. Зихерман, М.Х., Кузьмин, Г.П., Лейтес, Л.В. Магнитная характеристика электротехнической стали при сильном насыщении // Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1972.- №7(16). – С.3-5.
7. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. - М.: Энергия, 1981. - 392 с.



8. Розенблат, М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. - М.: Наука, 1974. - 768 с.
9. Aubin, J., 1992. Effect of geomagnetically induced currents of power transformers. *Electra*, 141: pp. 24 – 33.
10. Lahtinen, M. and J. Elovaara, 2002. GIC occurrences and GIC tests for 400 kV system transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17: pp. 555-561.
11. Кралин А.А., Охотников М.Н. Моделирование режимов параллельной работы трехфазных распределительных трансформаторов // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2602](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2602).
12. Папков Б.В. Основа безопасности государства – электроэнергетика // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023).

### References

1. Vakhnina, V.V., Chernenko, A.N., Kuznetsov, V.A. Vliyaniye geo indutsirovannykh tokov na nasyshcheniye magnitnoy sistemy silovykh transformatorov [Influence of geo induced currents at saturation magnetic system of power transformers]. *Vektor nauki of Togliatti State University*. 2012. №3(21). pp. 65-66.
2. Vakhnina, V.V., Kretov, D.A. Opredeleniye dopustimyykh urovney geo indutsirovannykh tokov dlya obespecheniya rabotosposobnosti silovykh transformatorov pri geomagnitnykh buryakh [Definition of admissible levels of the geoinduced currents for ensuring operability of power transformers at geomagnetic storms]. *Internet - zhurnal «NAUKOVEDENIYE»*. 2012. №3. URL: [naukovedenie.ru/sbornik12/12-93.pdf](http://naukovedenie.ru/sbornik12/12-93.pdf)
3. Badams, A.M. , Somov , V.A. , Shmidt , A.A. Transformatory i stabilizatory, reguliruyemyye podmagnichivaniyem shuntov (Rus) [Transformers

and stabilizers, adjustable magnetization shunts.]. M.: Gosenergoatomizdat , 1959. pp. 159 .

4. Druzhinin, V.V. Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskoy stali (Rus) [The magnetic properties of electrical steel]. M. : Energiya, 1974. pp. 240

5. Panovskiy, V., Filips, M. Klassicheskaya elektrodinamika (Rus) [Classical lectrodynamics]. M.: FizmatIzd 1963 g. 432 p.

6. Zikherman, M.H., Kuz'min, G.P., Leytes, L.V. Magnitnaya kharakteristika elektrotekhnicheskoy stali pri sil'nom nasyshchenii (Rus). Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Apparaty vysokogo napryazheniya, transformatory, silovyye kondensatory. 1972. №7 (16). pp. 3-5.

7. Leytes, L.V. Elektromagnitnyye raschoty transformatorov i reaktorov (Rus) [The electromagnetic calculations of transformers and reactors]. M.: Energiya, 1981. pp. 392

8. Rozenblat, M.A. Magnitnyye elementy avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki (Rus) [Magnetic elements of automation and computer technology]. M.: Nauka, 1974. pp.768.

9. Aubin, J., 1992. Effect of geomagnetically induced currents of power transformers. Electra, 141: pp. 24 – 33.

10. Lahtinen, M. and J. Elovaara, 2002. GIC occurrences and GIC tests for 400 kV system transformer. IEEE Transactions on Power Delivery, 17: pp. 555-561.

11. Kralin A.A., Okhotnikov M.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2602](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2602).

12. Papkov B.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023).