

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ В МАГНИТОПРОВОДАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНИЗОТРОПНОЙ И ИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

*Розроблено методику розрахунку значень магнітних індукцій у частинах шихтованих магнітопроводів силових трансформаторів при спільному використанні різних типів електротехнічних сталей, зокрема – анізотропної й ізотропної, що дозволяє надалі розраховувати втрати в магнітопроводах трансформаторів (втрати холостого ходу) і струм холостого ходу. Бібл. 10, табл. 1, рис. 3.*

*Ключові слова:* трансформатор, шихтований магнітопровід, анізотропна сталь, ізотропна сталь, магнітна індукція, втрати холостого ходу, підвищений коефіцієнт корисної дії.

*Разработана методика расчета значений магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных типов электротехнических сталей, в частности – анизотропной и изотропной, позволяющая в дальнейшем рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода. Библ. 10, табл. 1, рис. 3.*

*Ключевые слова:* трансформатор, шихтованный магнитопровод, анизотропная сталь, изотропная сталь, магнитная индукция, потери холостого хода, повышенный коэффициент полезного действия.

**Введение.** Статья продолжает исследования, начатые авторами в работах [1, 2] по развитию трехфазных шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов напряжением до 1000 В с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД).

В работе [2] показано, что совместное использование в шихтованных магнитопроводах разных типов электротехнических сталей (ЭТС) – анизотропной и изотропной, позволяет улучшить технико-экономические характеристики трансформаторов. Так, заменив анизотропную сталь на изотропную в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма (см. затемненные области в ярмах на рис. 1), можно существенно уменьшить потери мощности в магнитопроводе и при этом снизить стоимость всего трансформатора. В работе [2] так же проведен анализ по определению оптимального количественного соотношения этих сталей в магнитопроводах.

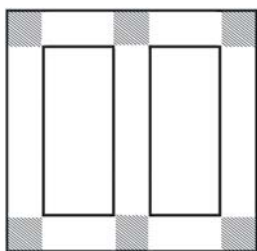


Рис. 1. Стержневой шихтованный магнитопровод трехфазного трансформатора

В настоящей статье показано, как определить значения магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных ЭТС, в частности – анизотропной и изотропной.

**Целью статьи** является разработка методики расчета значений магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов при совместном использовании разных ЭТС. На основании этих данных, в дальнейшем, можно рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода (х.х.).

Такие трансформаторы обладают высокими технико-экономическими, энергетическими и технологическими характеристиками, что актуально для современного энергетического рынка.

**Количественное соотношение основной и дополнительной ЭТС в частях магнитопровода.** При проектировании трансформаторов можно задаваться его электромагнитными нагрузками, такими, как магнитная индукция в магнитопроводе и плотность тока в его обмотках. Нас интересует эквивалентное амплитудное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода  $B_{m,st}$ , определяемое по закону электромагнитной индукции:

$$B_{m,st} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{\omega \cdot S_{st} \cdot w_1}, \quad (1)$$

где  $U_1$  – действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора;  $\omega$  – угловая частота питающей сети;  $f$  – частота питающей сети;  $S_{st}$  – площадь поперечного сечения стержня магнитопровода;  $w_1$  – количество витков первичной обмотки.

В качестве иллюстрации приведем два варианта шихтовки магнитопровода типа «Sandwich» [3], которые были рассмотрены в работах [2]. На рис. 2 и 3 показаны два слоя расположения пластин ЭТС *a* и *b*, которые поочередно накладываются друг на друга при сборке магнитопровода. Пластины 2 и 3 на рис. 2 и пластины 2 на рис. 3 выполнены из анизотропной стали, а пластины 1 и 4 на рис. 2 и пластины 1, 3 и 4 на рис. 3 – из изотропной стали. При этом зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма полностью состоят из изотропной стали.

Площадь поперечного сечения ярма  $S_a$  магнитопровода трансформатора может отличаться от площади поперечного сечения стержня  $S_{st}$ . Введем в рассмотрение коэффициент  $k_a$ , равный отношению площадей  $k_a = S_a/S_{st}$ . При этом эквивалентное амплитудное значение магнитной индукции в ярмах магнитопровода (с учетом формулы (1)) будет равно  $B_{m,a} = B_{m,st}/k_a$ , и с некоторым приближением в зонах

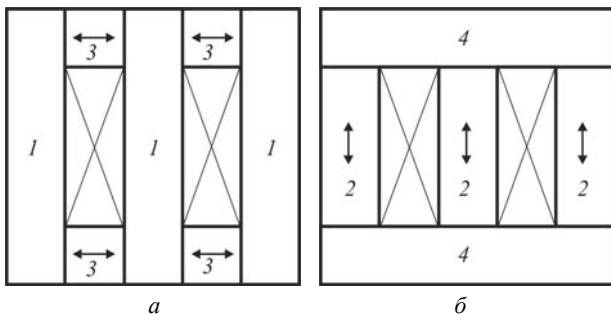


Рис. 2. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа «Sandwich» с вертикальными (а) и горизонтальными (б) анизотропными вставками

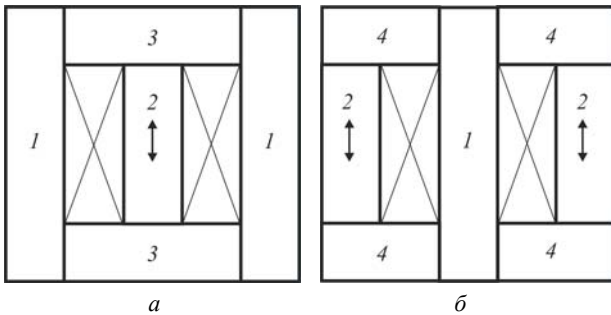


Рис. 3. Конструкция стержневого шихтованного магнитопровода трехфазного трансформатора с шихтовкой типа «Sandwich» только с вертикальными анизотропными вставками

перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода (углах)  $B_{m,y} = B_{m,st}/k_a$ . Основной ЭТС будем считать ту сталь, которая преобладает в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма.

Необходимо задаться значением коэффициентов, определяющих процентное соотношение количества пластин основной (индекс «о») и дополнительной (индекс «д») ЭТС в стержнях, ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма) и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода. Если в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода присутствует только основная сталь, то коэффициенты в этих зонах будут равны:  $k_{pl,y,o} = 100\%$ ,  $k_{pl,y,d} = 100\% - k_{pl,y,o} = 0\%$  (заметим, что 0% основной стали в этих зонах для рассматриваемых магнитопроводов быть не может). Если в стержнях магнитопровода основной стали  $N\%$ , то  $k_{pl,st,o} = N\%$ , а  $k_{pl,st,d} = 100\% - N\%$ , а в ярмах  $k_{pl,a,o} = 100\% - N\%$  и  $k_{pl,a,d} = N\%$  (если в стержнях и в ярмах присутствует основная и дополнительная стали, то для ярем количественное соотношение основной и дополнительной ЭТС при  $k_{pl,y,o} = 100\%$  обратно их количественному соотношению в стержнях, что связано с технологией шихтовки магнитопровода). Обычное процентное соотношение количества пластин основной и дополнительной ЭТС выбирается из ряда значений: 100; 80; 75; 66,7; 50; 33,3; 25; 20%. Для рис. 2,  $k_{pl,y,o} = 100\%$ ,  $k_{pl,y,d} = 0\%$ , а коэффициенты  $k_{pl,st,o}$ ,  $k_{pl,st,d}$ ,  $k_{pl,a,o}$  и  $k_{pl,a,d}$  могут приниматься из этого ряда; для рис. 3,  $k_{pl,y,o} = k_{pl,a,o} = 100\%$ ,  $k_{pl,y,d} = k_{pl,a,d} = 0\%$ , а коэффициенты  $k_{pl,st,o}$ ,  $k_{pl,st,d}$  так же выбираются из данного ряда.

**Учет скин-эффекта.** Запишем выражения, которые при расчете потерь в магнитопроводе трансформатора

учитывают эффект вытеснения (скин-эффект) магнитного потока по толщине листов ЭТС к их краям.

Для удобства автоматизированных расчетов выражения будут записываться в виде функций.

Запишем аппроксимационную функцию кривой намагничивания – зависимость напряженности магнитного поля  $H$ , А/м, в листе ЭТС от амплитудного значения магнитной индукции  $B_m$ , Тл [4] ( $B$  различно для каждого типа стали):

$$H(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \alpha_c \cdot \text{sh}(\beta_c \cdot B_m) + \chi_c \cdot B_m, \quad (2)$$

где  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\chi_c$  – коэффициенты аппроксимации, с размерностями соответственно А/м, Тл<sup>-1</sup>, м/Гн.

Эквивалентная глубина проникновения магнитного потока в лист ЭТС [5, 6]:

$$a'_c(\mu'_{c,p}) = \frac{1}{k_R} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_c}{\omega \cdot \mu'_{c,p}}}, \quad (3)$$

где  $\mu'_{c,p}$  – магнитная проницаемость на поверхности стального листа, Гн/м;  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление ЭТС, зависящее от среднего значения температуры  $T$ , К, в магнитопроводе, Ом·м,

$$\rho_c = 4,8 \cdot 10^{-7} [1 + 9,792 \cdot 10^{-4} (T - 293^0 K)] (1^0 K),$$

где  $k_R$  – коэффициент уменьшения глубины проникновения для нелинейной ферромагнитной среды, по Нейману  $k_R \approx 1,4$  [6 – 8].

Здесь и далее апострофы стоят у переменных, которые в дальнейшем переопределяются.

Коэффициент  $\xi'$  [5, 6], равный отношению толщины листа стали  $b_c$  к эквивалентной глубине проникновения  $a'_c$  магнитного потока в лист:

$$\xi'(\mu'_{c,p}) = b_c/a'_c(\mu'_{c,p}). \quad (4)$$

Амплитудное значение магнитной индукции на поверхности стального листа  $B'_{m,p}$  [4]:

$$B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p}) = \frac{\xi'(\mu'_{c,p}) \cdot B_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\text{ch} \xi'(\mu'_{c,p}) + \cos \xi'(\mu'_{c,p})}{\text{ch} \xi'(\mu'_{c,p}) - \cos \xi'(\mu'_{c,p})}}. \quad (5)$$

Запишем трансцендентное уравнение для нахождения значений магнитной проницаемости на поверхности стального листа  $\mu'_{c,p}$ :

$$F(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \frac{B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p})}{H[B'_{m,p}(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]} - \mu'_{c,p} = 0,$$

которое можно решить численно (например, в пакете MathCAD [9] функцией root):

$$\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \text{root}[F(B_m, \mu'_{c,p}, \alpha_c, \beta_c, \chi_c), \mu'_{c,p}], \quad (6)$$

при некотором начальном значении  $\mu'_{c,p}$ , например, 0,01 Гн/м.

Имея функцию  $\mu_{c,p}$ , запишем функции, необходимые для определения индукций в частях магнитопровода при совместном использовании разных ЭТС: эквивалентной глубины проникновения магнитного потока в лист ЭТС

$$a_c(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = a'_c[\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]; \quad (7)$$

коэффициента  $\xi$

$$\xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = b_c/a'_c(\mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)); \quad (8)$$

амплитудного значения магнитной индукции на поверхности стального листа

$$B_{m,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = B'_{m,p}[B_m, \mu_{c,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]; \quad (9)$$

угла  $\theta$  опережения по фазе вектора амплитудного значения магнитной индукции на поверхности листа стали  $\underline{B}_{mp}$  вектора комплексной амплитуды магнитной индукции в листе стали  $\underline{B}_m$  [10]

$$\theta(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \arcsin \frac{\operatorname{sh} \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) - \dots}{\sqrt{\operatorname{ch}[2 \cdot \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)] - \dots}} \dots \frac{-\sin \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)}{-\cos[2 \cdot \xi(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]} \quad (10)$$

мгновенного значения магнитной индукции на поверхности листа стали [10]

$$B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = -B_{m,p}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) \cdot \cos[\omega t - \theta(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]. \quad (11)$$

Мгновенное значение напряженности магнитного поля в магнитопроводе (без учета составляющей, обусловленной потерями на гистерезис) равно [10]:

$$H'_{mg}(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \alpha_c \cdot \operatorname{sh}[\beta_c \cdot B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)] + \chi_c \cdot B_p(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c), \quad (12)$$

а ее действующее значение определяется по формуле:

$$H_{mg}(B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi [H'_{mg}(\omega t, B_m, \alpha_c, \beta_c, \chi_c)]^2 d\omega t}. \quad (13)$$

**Определение магнитных индукций в частях магнитопровода.** Основные условия при определении магнитных индукций в пластинах основной и дополнительной ЭТС в магнитопроводе: *напряженность магнитного поля в пластинах рассматриваемой части магнитопровода одинакова; сумма значений магнитных потоков в основной и дополнительной сталях в рассматриваемой части магнитопровода, равна расчетному магнитному потоку в этой части магнитопровода.*

**Стержни магнитопровода.** В стержнях магнитопровода действующие значения напряженности магнитного поля для основной и дополнительной ЭТС равны:

$$H'_{st.o}(B'_{m,st.o}) = H_{mg}(B'_{m,st.o}, \alpha_{c.o}, \beta_{c.o}, \chi_{c.o}); \quad (14)$$

$$H'_{st.d}(B'_{m,st.d}) = H_{mg}(B'_{m,st.d}, \alpha_{c.d}, \beta_{c.d}, \chi_{c.d}), \quad (15)$$

где  $B'_{m,st.o}$ ,  $B'_{m,st.d}$  – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали стержней;  $\alpha_{c.o}$ ,  $\beta_{c.o}$ ,  $\chi_{c.o}$  и  $\alpha_{c.d}$ ,  $\beta_{c.d}$ ,  $\chi_{c.d}$  – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания соответственно для основной и дополнительной ЭТС.

Согласно указанным условиям, напряженности магнитного поля в стержнях магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС равны между собой:

$$H'_{st.o}(B'_{m,st.o}) = H'_{st.d}(B'_{m,st.d}), \quad (16)$$

а амплитудное эквивалентное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода, определяемое по выражению (1), из требования сохранения расчетного магнитного потока в стержне, равно:

$$B_{m,st} = k_{pl.st.o} \cdot B'_{m,st.o} + k_{pl.st.d} \cdot B'_{m,st.d}. \quad (17)$$

Из выражения (17) выразим магнитную индукцию  $B'_{m,st.d}$  и запишем ее в виде функции от магнитной индукции  $B'_{m,st.o}$ :

$$B'_{m,st.d}(B'_{m,st.o}) = (B_{m,st} - k_{pl.st.o} \cdot B'_{m,st.o}) / k_{pl.st.d}. \quad (18)$$

На основании равенства (16) запишем уравнение:

$$F_{st}(B'_{m,st.o}) = H'_{st.o}(B'_{m,st.o}) - H'_{st.d}[B'_{m,st.d}(B'_{m,st.o})] = 0,$$

которое можно численно решить относительно значения  $B'_{m,st.o}$ , получая амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС стержней магнитопровода:

$$B_{m,st.o} = \operatorname{root}[F_{st}(B'_{m,st.o}), B'_{m,st.o}], \quad (19)$$

при начальном значении  $B'_{m,st.o}$ , равном  $B_{m,st}$ .

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС стержней (с учетом функции (18))

$$B_{m,st.d} = B'_{m,st.d}(B_{m,st.o}), \quad (20)$$

а действующие значения напряженности магнитного поля в стержнях магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС (с учетом выражений (14) и (15)):

$$H_{st.o} = H'_{st.o}(B_{m,st.o}); \quad (21)$$

$$H_{st.d} = H'_{st.d}(B_{m,st.o}). \quad (22)$$

**Ярма магнитопровода** (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма). Аналогично записываются уравнения и для действующих значений напряженности магнитного поля в ярмах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H'_{a.o}(B'_{m,a.o}) = H_{mg}(B'_{m,a.o}, \alpha_{c.o}, \beta_{c.o}, \chi_{c.o}); \quad (23)$$

$$H'_{a.d}(B'_{m,a.d}) = H_{mg}(B'_{m,a.d}, \alpha_{c.d}, \beta_{c.d}, \chi_{c.d}), \quad (24)$$

где  $B'_{m,a.o}$ ,  $B'_{m,a.d}$  – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали ярма,

$$B'_{m,a.o}(B'_{m,a.o}) = (B_{m,a} - k_{pl.a.o} \cdot B'_{m,a.o}) / k_{pl.a.d}. \quad (25)$$

Уравнение

$$F_a(B'_{m,a.o}) = H'_{a.o}(B'_{m,a.o}) - H'_{a.d}[B'_{m,a.d}(B'_{m,a.o})] = 0,$$

решается численно относительно значения  $B'_{m,a.o}$ , получая амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС ярма магнитопровода:

$$B_{m,a.o} = \operatorname{root}[F_a(B'_{m,a.o}), B'_{m,a.o}], \quad (26)$$

при начальном значении  $B'_{m,a.o} = B_{m,a}$ .

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС ярма равно:

$$B_{m,a.d} = B'_{m,a.d}(B_{m,a.o}). \quad (27)$$

Действующие значения напряженности магнитного поля в ярмах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H_{a.o} = H'_{a.o}(B_{m,a.o}); \quad (28)$$

$$H_{a.d} = H'_{a.d}(B_{m,a.o}). \quad (29)$$

**Зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода.** Действующие значения напряженности магнитного поля в этих зонах для основной и дополнительной ЭТС равны:

$$H'_{y.o}(B'_{m,y.o}) = H_{mg}(B'_{m,y.o}, \alpha_{c.o}, \beta_{c.o}, \chi_{c.o}); \quad (30)$$

$$H'_{y.d}(B'_{m,y.d}) = H_{mg}(B'_{m,y.d}, \alpha_{c.d}, \beta_{c.d}, \chi_{c.d}), \quad (31)$$

где  $B'_{m,y.o}$ ,  $B'_{m,y.d}$  – амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали в данных зонах,

$$B'_{m,y.d}(B'_{m,y.o}) = (B_{m,y} - k_{pl.y.o} \cdot B'_{m,y.o}) / k_{pl.y.d}. \quad (32)$$

Из уравнения

$$F_y(B'_{m,y.o}) = H'_{y.o}(B'_{m,y.o}) - H'_{y.d}[B'_{m,y.d}(B'_{m,y.o})] = 0,$$

определяется амплитудное значение магнитной индукции в основной ЭТС в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма:

$$B_{m,y.o} = \operatorname{root}[F_y(B'_{m,y.o}), B'_{m,y.o}], \quad (33)$$

при начальном значении  $B'_{m,y.o} = B_{m,y}$ .

Амплитудное значение магнитной индукции в дополнительной ЭТС в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода:

$$B_{m,y.d} = B'_{m,y.d}(B_{m,y.o}). \quad (34)$$

Действующие значения напряженности магнитного поля в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:

$$H_{y.o} = H'_{y.o}(B_{m,y.o}); \quad (35)$$

$$H_{y.d} = H'_{y.d}(B_{m,y.o}). \quad (36)$$

Полученные формулы позволяют рассчитывать значения магнитных индукций в частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов с повышенным КПД при совместном использовании различ-

ных марок ЭТС. В дальнейшем эти значения магнитных индукций можно использовать при расчете потерь в магнитопроводах трансформаторов и расчете значений тока х.х. Так, за основу можно взять разработанные авторами методы в работах [4, 10].

**Пример расчета.** Рассчитаем амплитудные значения магнитных индукций и действующие значения напряженностей магнитного поля в частях магнитопровода трансформатора с шихтовкой магнитопровода типа «Sandwich» по рис. 2, у которого в стержнях основная сталь составляет 50%,  $k_{pl.st.o} = 50\%$ ,  $k_{pl.st.d} = 50\%$ ; в ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма)  $k_{pl.a.o} = 50\%$ ,  $k_{pl.a.d} = 50\%$ ; в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма  $k_{pl.y.o} = 100\%$ ,  $k_{pl.y.d} = 0\%$ .

В качестве основной выберем изотропную ЭТС марки М12, в качестве дополнительной – анизотропную ЭТС марки М6. Для анизотропной ЭТС марки М6 и изотропной ЭТС марки М12 с толщиной листов 0,356 мм коэффициенты аппроксимации кривых намагничивания  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\chi_c$  приведены в табл. 1 (для М6 – вдоль прокатки листа).

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания электротехнических сталей

Марка ЭТС	$\alpha_c$ , А/м	$\beta_c$ , Тл <sup>-1</sup>	$\chi_c$ , м/Гн
М6	$3,88 \cdot 10^{-10}$	15,22	19,81
М12	$8,416 \cdot 10^{-5}$	11,02	50,48

Пусть эквивалентное значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода равно  $B_{m,st} = 1,318$  Тл; коэффициент  $k_a = 1,15$ ; эквивалентное значение магнитной индукции в ярмах и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода равны  $B_{m,a} = B_{m,y} = 1,147$  Тл.

Используя полученные выше выражения, найдем амплитудные значения магнитной индукции в основной и дополнительной стали в стержнях, ярмах (без зон перехода магнитного потока из стержней в ярма) и зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма магнитопровода:  $B_{m,st.o} = 1,005$  Тл,  $B_{m,st.d} = 1,632$  Тл,  $B_{m,a.o} = 0,798$  Тл,  $B_{m,a.d} = 1,495$  Тл,  $B_{m,y.o} = 1,147$  Тл,  $B_{m,y.d} = 0$  Тл. При этом действующие значения напряженности магнитного поля в стержнях, ярмах и углах магнитопровода для основной и дополнительной ЭТС:  $H_{st.o} = H_{st.d} = 39,64$  А/м,  $H_{a.o} = H_{a.d} = 30,58$  А/м,  $H_{y.o} = 49,17$  А/м,  $H_{y.d} = 0$  А/м.

Обратим внимание на то, что магнитные потоки в части магнитопровода перераспределяется по разным ЭТС таким образом, что магнитная индукция имеет большие значения в дополнительной анизотропной стали М6, и меньшие – в основной изотропной стали М12. Это связано с тем, что магнитному потоку легче проходить через анизотропную ЭТС с большей магнитной проводимостью, и тяжелее – через изотропную ЭТС с меньшей магнитной проводимостью.

Следующий этап исследования может быть посвящен расчету оптимальных соотношений анизотропной и изотропной ЭТС в частях магнитопровода.

#### Выводы.

Разработанная методика расчета значений магнитных индукций в различных частях шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов с повы-

шенным КПД при совместном использовании разных электротехнических сталей – анизотропной и изотропной, позволяет получить значения магнитных индукций в различных сталях с учетом их взаимного влияния и в дальнейшем рассчитывать потери в магнитопроводах трансформаторов (потери холостого хода) и ток холостого хода.

Магнитные потоки в части магнитопровода распределяется по разным электротехническим сталям таким образом, что магнитная индукция имеет большие значения в анизотропной стали, и меньшие – в изотропной стали. Это связано с тем, что магнитному потоку легче проходить через анизотропную сталь с большей магнитной проводимостью, и тяжелее – через изотропную сталь с меньшей магнитной проводимостью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – №1. – С. 40-44.
2. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С. 20-24.
3. Pat. US 8686824 B2 USA, Int. Cl. H 01 F 27/24; H 01 F 17/04. Economical Core Design for Electromagnetic Devices / Michael Levin, Andrii V. Lavreniuk (Toronto (CA)); Mirus International Inc. (Ontario (CA)). – № US 12/883310; Appl. Date 16.09.2010; Publ. Date 01.04.2014.
4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // *Техническая электродинамика*. – 1995. – №6. – С. 35-40.
5. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Пер. с чешск. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 208 с.
6. Туровский Я. Техническая электродинамика. Пер. с польского. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.
7. Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 190 с.
8. Pentegov I.V. Возможности использования ВКБ-метода при исследовании поверхностного эффекта в ферромагнитных телах // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1988. – №1. – С. 127-135.
9. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
10. Pentegov I.V., Rymar S.V. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // *Техническая электродинамика*. – 1996. – №1. – С. 39-45.

#### REFERENCES

1. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no.1, pp. 40-44. (Rus).
2. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. New approaches at construction of magnetic conductors for mains transformers. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.1, pp. 20-24. (Rus).
3. Levin M., Lavreniuk A.V. *Economical core design for electromagnetic devices*. Patent US, no.8686824, 2014.
4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Method of determination of transformer iron loss for using in automated design systems. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 1995, no.6, pp. 35-40. (Rus).

5. Lammeraner J., Shtafil M. *Vikhrevye toki* [Eddy currents. Transl. with the Czech]. Moscow-Leningrad, Energiia Publ., 1967. 208 p. (Rus).
6. Turovskii Ya. *Tekhnicheskaiia elektrodinamika* [Technical electrostatics. Transl. with the polish]. Moscow, Energiia Publ., 1974. 488 p. (Rus).
7. Neiman L.R. *Poverkhnostnyi effekt v ferromagnitnykh telakh* [Surface-effect in ferromagnetic bodies]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1949. 190 p. (Rus).
8. Pentegov I.V. The possibility of using the WKB-method in the study of surface effects in ferromagnetic solids. *Izvestiia AN SSSR. Energetika i transport – News of USSR Academy of Sciences. Energy and Transport*, 1988, no.1, pp. 127-135. (Rus).
9. Kiryanov D.V. *MathCAD 14* [MathCAD 14]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2007. 704 p. (Rus).
10. Pentegov I.V., Rymar S.V. Method of determination of transformer iron loss for using in automated design systems a calculation method of transformer exciting current for using in automated design. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrostatics*, 1996, no.1, pp. 39-45. (Rus).

*Поступила (received) 30.09.2015*

*Пентегов Игорь Владимирович<sup>1</sup>, д.т.н., проф., в.н.с.,  
Рымар Сергей Владимирович<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., в.н.с.,  
Levin Michael I.<sup>2</sup>, P. Engineer,  
Lavreniuk Andrii V.<sup>3</sup>, PhD., R&D Engineer,*

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11,  
тел/phone +38 044 2061388, 2052533

e-mail: magn@i.com.ua, elmag@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> 67, Sunnycreech Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4,  
тел/phone +1 (416) 6677061,

e-mail: michael@mirusinternational.com

<sup>3</sup> MIRUS International Inc.,

31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6,

тел/phone +1 (905) 4941120,

e-mail: andrii@mirusinternational.com

*I.V. Pentegov<sup>1</sup>, S.V. Rymar<sup>1</sup>, M.I. Levin<sup>2</sup>, A.V. Lavreniuk<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Paton Electric Welding Institute of National Academy

of Sciences of Ukraine,

11, Bozhenko Str., Kiev, 03680, Ukraine.

<sup>2</sup> 67, Sunnycreech Rd., Toronto, Canada, M2R 1V4.

<sup>3</sup> Mirus International Inc.,

31, Sun Pac Blvd., Brampton, Ontario, Canada, L6S 5P6.

**A determination of the flux density in core of distribution transformers, what built with the common using of grain and non grain oriented magnetic steels.**

**Purpose.** *The development of calculation method to determinate the flux densities in different parts of the magnetic cores of distribution transformers, what built from different types magnetic steel (mixed core). Methodology.* *The method is based on the scientific positions of Theoretical Electrical Engineering – the theory of the electromagnetic field in nonlinear mediums to determine the distribution of magnetic flux in mixed core of transformer, what are using different types of steel what have the different magnetic properties. Results.* *The developed method gives possible to make calculation of the flux density and influence of skin effect in different parts of the magnetic cores of distribution transformer, where are used mix of grain oriented (GO) and non grain oriented (NGO) steels. Was determinate the general basic conditions for the calculation of flux density in the laminations from grain and non grain oriented steels of the magnetic core: the strength of magnetic field for the laminations of particular part of mixed core is the same; the sum of the magnetic fluxes in GO and NGO steels in particular part of mixed core is equal with the designed magnetic flux in this part of mixed core. Discover, the magnetic flux in mixed core of the transformer has specific distribution between magnetic steels. The flux density is higher in laminations from GO steel and smaller in laminations from the NGO steel. That is happened because for magnetic flux is easier pass through laminations from GO steel, what has better magnetic conductance than laminations from NGO steel. Originality.* *The common using of different types of magnetic steels in cores for distribution transformers gives possibility to make design of transformer with low level of no load losses, high efficiency and with optimal cost. Practical value.* *The determination of the flux density in different parts of magnetic core with GO and NGO steels gives possibility make accurate calculation of no load losses and magnetizing current of the transformer. References 10, tables 1, figures 3.*

**Key words:** **distribution transformer, magnetic core, grain oriented steel (GO), non grain oriented steel (NGO), flux density, no load losses, high efficiency.**