

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

ШЕВЧЕНКО В.П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Одесского национального университета, Одесса, Украина, E-mail: shevospu@gmail.com;

БАБИЙЧУК О.Б. научный сотрудник, научный сотрудник института компьютерных систем Одесского национального университета, Одесса, Украина, E-mail: obbabiychuk@ukr.net;

Цель работы. Разработка на основе детального анализа распределения магнитного поля в несимметричных конструкциях ТТ схемы замещения и составление математической модели расчета погрешностей применительно к многодиапазонному встроенному ТТ с тороидальной МС и одновитковой первичной обмоткой при различном заполнении МС витками вторичной обмотки.

Методы исследования. Экспериментальное исследование распределение магнитного поля в тороидальном трансформаторе тока и погрешностей трансформатора

Полученные результаты. Разработаны схемы замещения трансформатора тока, адекватно отражающие распределение магнитного поля в магнитопроводе трансформатора и математическая модель расчета погрешностей.

Научна новизна. По результатам моделирования в FEMM и экспериментальных исследований определен характер распределения магнитного поля при частичном заполнении магнитопровода витками вторичной обмотки, разработаны схемы замещения трансформатора тока.

Практическая ценность. Разработана математическая модель расчета распределения магнитного поля в магнитопроводе и погрешностей трансформатора, на основании которой составлена программа расчета погрешностей трансформаторов тока.

Ключевые слова: трансформатор тока; магнитное поле; векторная диаграмма; схема замещения; поток рассеяния; основной магнитный поток; свободная часть магнитопровода; критерий неравномерности распределения магнитного потока; токовая и угловая погрешности трансформатора.

I. ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные показатели трансформаторов тока определяются характером распределения магнитного поля, которое кроме основной составляющей (поля взаимоиндукции), содержит поля рассеяния обмоток. Баланс составляющих результирующего поля зависит от структуры магнитной системы, первичной и вторичной обмоток, величины нагрузки.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Распределение вторичных витков на магнитопроводе многодиапазонного ТТ (рис.1) определяет частичное заполнение магнитной системы (МС) на некоторых ступенях трансформации [12].

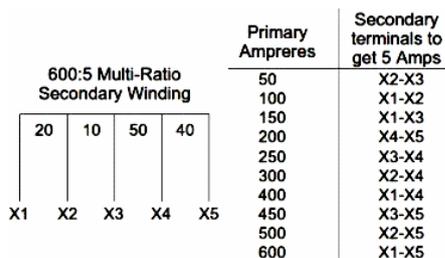


Рисунок 1. Распределение вторичных витков многодиапазонного ТТ

Данные экспериментального исследования [1, 2] распределения индукции в стали (B_c) по длине (L_M) магнитной системы (МС) как при различной величине вторичной нагрузки и постоянном секторе (α_2) вторичной обмотки (рис.2), так и при разных секторах распределения вторичной обмотки на МС и постоянной нагрузке (рис. 3) показывают неравномерное распределения индукции в стали МС.

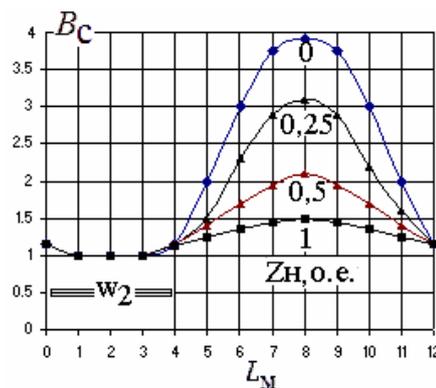


Рисунок 2. $B_c = \varphi(L_M, Z_H), \alpha_2 = const$

Поскольку влияние поля рассеяния ТТ на основное поле в МС наиболее характерно проявляется при короткозамкнутой вторичной обмотке (рис.2), этот режим принят основным при анализе

распределения индукции ($B_c = (L_M)$) магнитного поля в стали магнитопровода.

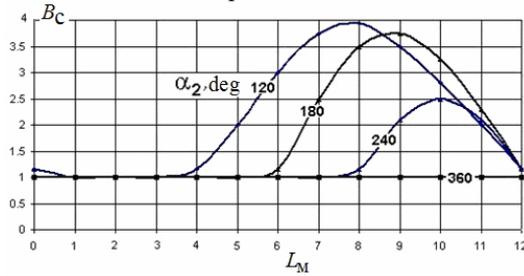


Рисунок 3. $B_c = \varphi(L_M, \alpha_2), Z_H = 0$

Неравномерное распределение магнитного поля по длине магнитопровода для ТТ различного конструктивного исполнения подтверждают результаты моделирования в FEMM [1, 2]. Симметричная конструкция трансформатора (при полном заполнении МС витками вторичной обмотки – $\alpha_2 = 360 \text{град}$) является частным случаем несимметричной (при неполном заполнении МС витками вторичной обмотки – $\alpha_2 < 360 \text{град}$) и для нее справедливы схемы замещения, векторные диаграммы и математические модели несимметричного трансформатора. Поэтому для обобщения результатов анализа целесообразно рассмотреть электромагнитный процесс в несимметричной структуре трансформатора.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка на основе детального анализа распределения магнитного поля в несимметричных конструкциях ТТ схемы замещения и составление математической модели расчета погрешностей применительно к многодиапазонному встроенному ТТ с тороидальной МС и одновитковой первичной обмоткой при различном заполнении МС витками вторичной обмотки.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходя из расчета распределения магнитного поля ТТ по FEMM [1, 2] на рис. 4 показан эскиз магнитной системы трансформатора несимметричной конструкции, состоящей из тороидального витого магнитопровода, первичной обмотки с числом витков $W_1 = 1$, которая проходит по центру тора, и вторичной обмотки с числом витков W_2 , которая занимает на МС произвольный сектор α_2 . Части полных потоков первичной Φ_1 , и вторичной Φ_2 обмоток, которые не берут участия в образовании потока взаимной индукции, образуют поток рассеяния Φ_σ .

Условно каждый из них можно изобразить в виде двух составляющих (рис. 4) – потока, который замыкается только в воздухе $\Phi_{\sigma B}$, и потока,

который замыкается как по МС, так и через воздух $\Phi_{\sigma C}$

$$\Phi_\sigma = \Phi_B + \Phi_C \quad \Phi_\sigma = \Phi_{\sigma B} + \Phi_{\sigma C} \quad (1)$$

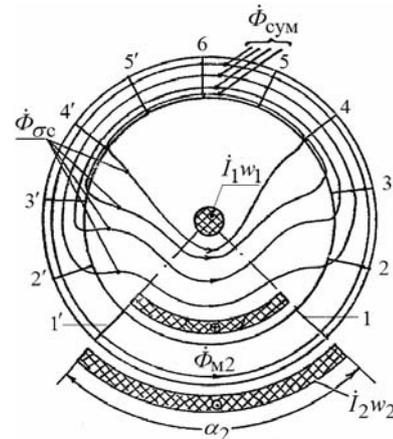


Рисунок 4. Распределение магнитных потоков

Анализ изменения тангенциальной составляющей магнитной индукции (B_τ) поля рассеяния (рис. 5) по длине канала рассеяния между первичной и вторичной обмотками показывает, что на участке магнитной цепи 4–5–6–5'–4' (рис. 4), магнитное поле в пространстве внутри тороидальной МС настолько мало, что им можно пренебречь и не учитывать составляющую поля рассеяния, которая замыкается через воздух ($\Phi_{\sigma B} = 0$).

Считая, что весь поток рассеяния (Φ_σ) замыкается по стали магнитной системы, можно принять

$$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma C} = \Phi_{\sigma 1C} + \Phi_{\sigma 2C} \quad (2)$$

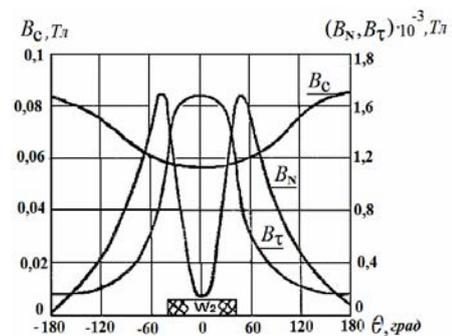


Рисунок 5. Распределение составляющих магнитного поля ТТ

Тангенциальная составляющая магнитной индукции B_τ (поле рассеяния в зазоре между первичной и вторичной обмотками) при $\theta = 0$ (рис. 5), что соответствует середине вторичной обмотки, и нормальная составляющая магнитной индукции поля рассеяния B_N (рис. 5), что входит в МС на участках 2–4, 2'–4' (рис. 4), практически равны.

Если рассматривать изменение магнитного потока в МС на участке от середины вторичной обмотки к середине свободного участка МС (рис. 5), то

оказывается, что действие потоков рассеяния первичной ($\Phi_{\sigma 1C}$) и вторичной ($\Phi_{\sigma 2C}$) обмоток относительно потока взаимной индукции одинаково.

Результирующая индукция поля рассеяния в любой точке пространства внутри магнитопровода $B_{\sigma} = \sqrt{B_N^2 + B_r^2}$. В результате взаимодействия потоков первичной (Φ_1) и вторичной (Φ_2) обмоток в МС устанавливается результирующий магнитный поток Φ_0 (рис. 6).

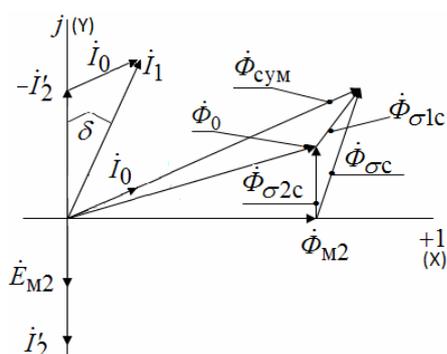


Рисунок 6. Диаграмма векторов ТТ

Под действием потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2C}$ магнитный поток в МС увеличивается (рис. 6) от значения потока взаимной индукции Φ_{M2} (на участке магнитной цепи под вторичной обмоткой) до значения результирующего потока Φ_0 на участке $2(2')$ магнитопровода (рис. 4).

Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1C}$ увеличивает поток в стали от значения Φ_0 до значения полного потока $\Phi_{\text{сум}}$ (участок 6 на рис. 4). При этом, не увеличивая полезного магнитного потока (потока взаимной индукции), действие потоков $\Phi_{\sigma 1C}$ и $\Phi_{\sigma 2C}$ приводит к неравномерности распределения магнитного потока вдоль МС ($B_C = \varphi(\theta)$ на рис. 5), и как следствие, к увеличению его магнитного сопротивления и результирующей МДС намагничивания.

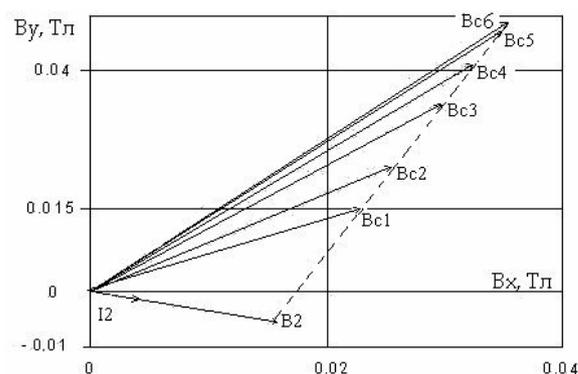
Величина магнитного потока в МС определяется ЭДС, которая должна быть наведена во вторичной обмотке ТТ

$$E_{M2} = I_2 \cdot \sqrt{(R_H + r_2)^2 + X_H^2}, \quad (3)$$

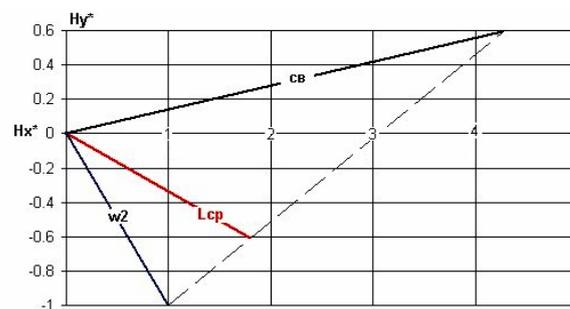
где полное сопротивление вторичной цепи включает активное сопротивление вторичной обмотки (r_2) и параметры нагрузки (R_H, X_H).

Поскольку величина ЭДС вторичной обмотки определяется магнитным состоянием только участка МС под вторичной обмоткой, а распределение магнитного потока по длине части МС, свободной от вторичной обмотки, неравномерно и зависит от потоков рассеяния ТТ, то ЭДС, обусловленная потоком рассеяния, может быть определена путем учета действительного характера распределения индукции результирующего магнитного поля в МС

$$B_C = \varphi(L_M)$$



а



б

Рисунок 7. Диаграмма векторов ТТ[^]

а – эксперимент; б – расчет по FEMM (в относительных единицах)

Экспериментальная диаграмма распределения векторов индукции магнитного поля на участках 1–6 (рис. 4) при $\alpha_2 - 90^\circ$ приведена на рис. 7,а. Соотношение векторов напряженности магнитного поля в участках магнитной цепи под вторичной обмоткой (w_2), вдоль средней длины МС (L_{cp}) и на свободной от витков вторичной обмотки части МС (CB) при $\alpha_2 - 90^\circ$, полученные при моделировании в FEMM [2] представлены на рис. 7,б.

Характер действия потоков рассеяния ($\Phi_{\sigma 1C}$, $\Phi_{\sigma 2C}$) позволяет представить картину распределения магнитного поля в ТТ так, как это показано на рис. 4.

Из этой модели следует, что с помощью Т-образной схемы замещения не всегда удается точно отобразить действительное распределение магнитного поля в ТТ с несимметрией магнитной или электрической цепей.

Схема замещения трансформатора

Полезный поток ТТ изменяется в широком диапазоне и зависит от величины нагрузки и режима работы. Для Т-образной схемы замещения не удается найти наглядную и достаточно точную зависимость параметров схемы (x_1, x_2) замещения (рис. 8) от элементов конструкции трансформатора, потоков всех обмоток. Т-образная схема замещения (рис.8) достаточно полно отображает электромаг-

нитные процессы только в ТТ симметричной конструкции.

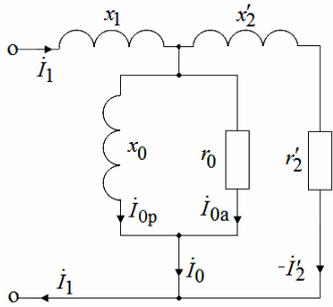


Рисунок 8. Т-образная схема замещения для режима $Z_H = 0$

В случае, когда вторичная обмотка ТТ занимает на МС сектор α_2 , можно предположить [4], что магнитопровод состоит из двух участков (рис. 4). На участке МС под вторичной обмоткой (1–1' на рис. 4) длиной l_2 при $Z_H = 0$ действует поток $\Phi_{M2} \equiv I_2 \cdot r_2$, которому соответствует магнитная индукция

$$B_{M2} = \frac{E_{M2}}{4k_f \cdot w_2 \cdot S_M} \quad (3)$$

и магнитное сопротивление

$$Z_{\mu 2} = \frac{l_2}{S_2 \cdot \mu_2} = \frac{l_2}{S_2 \cdot (\dot{B}_{M2} / \dot{H}_2)} \quad (4)$$

На участке МС, свободном от витков вторичной обмотки длиной $l_{CB} = l_M - l_2$ (1–6–1 на рис. 4), магнитная индукция обусловлена суммарным действием магнитных потоков Φ_{M2} и $\Phi_{\sigma c}$. Магнитное сопротивление этого участка

$$Z_{\mu CB} = \frac{l_{CB}}{S_{CB} \cdot \mu_{CB}} = \frac{l_{CB}}{S_{CB} \cdot (\dot{B}_{CB} / \dot{H}_{CB})} \quad (5)$$

При этом предполагается, что значение магнитной индукции в произвольном сечении вдоль соответствующего участка МС, т.е. $B_{M2}(l_2) = const$ и $B_{CB}(l_{CB}) = const$, а также значение магнитной индукции в поперечном сечении МС не изменяются. Схема замещения, соответствующая такому представлению электромагнитного процесса, приведена на рис.9 для режима короткозамкнутой вторичной обмотки $Z_H = 0$, при котором величина ЭДС вторичной обмотки определяется падением напряжения на ее активном сопротивлении (r'_2).

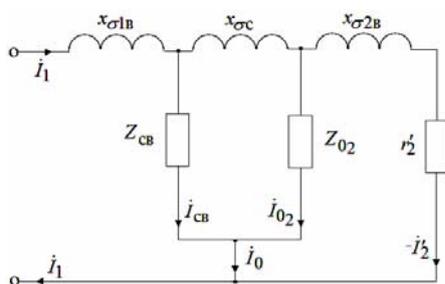


Рисунок 9. Схема замещения ТТ для режима $Z_H = 0$

Так как при неизменном значении величины сектора α_2 проводимость канала рассеяния между первичной и вторичной обмотками постоянная, а степень насыщения участков магнитной цепи определяется величинами потоков Φ_{M2} и Φ_{CB} , то можно считать постоянным и не зависимым от режима работы параметр схемы замещения $X_{\sigma c}$, а магнитные сопротивления ветвей намагничивания Z_{02} и Z_{CB} – зависимыми только от потоков Φ_{M2} и Φ_{CB} .

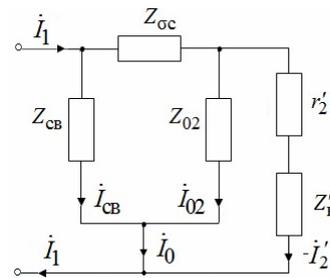


Рисунок 10. Упрощенная схема замещения

Для ТТ с небольшим количеством слоев вторичной обмотки ($n_{cl} \leq 4$) можно пренебречь магнитным потоком рассеяния, который замыкается только по воздуху ($\Phi_{\sigma B}$) и в дальнейшем можно перейти к рассмотрению упрощенной схемы замещения ТТ (рис. 10).

При значительной неравномерности распределения потока по длине МС, что имеет место в ТТ с небольшими секторами вторичной обмотки ($\alpha_2 < \pi$) и в других случаях значительной несимметрии магнитной системы, необходимо использовать разветвленную схему замещения (рис. 11). Эта схема учитывает магнитное состояние каждого из выделенных (рис. 4) участков незаполненной части МС.

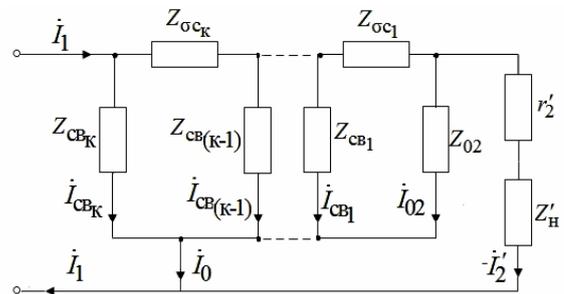


Рисунок 11. Полная схема замещения ТТ

Параметры полного потока рассеяния

Для потока рассеяния ТТ примем векторную разность между значением полного магнитного потока в МС на середине участка, свободного от витков вторичной обмотки ($\Phi_{\text{сум}}$) и результирующе-

щим магнитным потоком на участке МС под вторичной обмоткой (Φ_{M2}).

Амплитудное значение магнитного потока рассеяния при условии равенства токов первичной и вторичной обмоток

$$\Phi_{\sigma c} = \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \Lambda_{\sigma} \cdot I_1 \cdot w_1, \quad (6)$$

где Λ_{σ} – проводимость пути полного потока рассеяния, Гн.

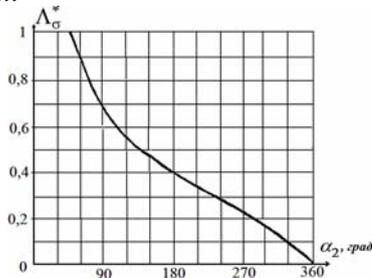


Рисунок 12. Зависимость $\Lambda_{\sigma}^* = \varphi(\alpha_2)$

Если обозначить через $\Lambda_{\sigma \max}$ проводимость Λ_{σ} , для некоторого минимального угла ($\alpha_{2 \min} = 45^\circ$), то можно построить зависимость $\Lambda_{\sigma}^* = \Lambda_{\sigma} / \Lambda_{\sigma \max} = \varphi(\alpha_2)$ (рис. 12), которая представляет собой удельную проводимость пути магнитного потока рассеяния ТТ единичной высоты [4].

Для ТТ с высотой МС dh проводимость пути потока рассеяния

$$d\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma}^* \cdot dh = \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \cdot d\alpha, \quad (7)$$

где $R_0 = 0,5 [R_M + 0,5(D_{BH} + T_M - D_{Ш})]$;

D_{BH} , $D_{Ш}$ – внутренний диаметр магнитопровода,

диаметр первичной обмотки; $R_M = 0,707T_M$ – радиус окружности, описанной вокруг МС квадратного сечения размером T_M .

Полную проводимость пути потока рассеяния ТТ в МС квадратного сечения можно получить, интегрируя (7) в пределах от $\alpha = 0$ до $\alpha = 2\pi$

$$\Lambda_{\sigma \text{ кв}} = \int_0^{2\pi} d\Lambda_{\sigma} = \int_0^{2\pi} \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \cdot d\alpha = 2\pi \cdot \Lambda_{\sigma}^* \cdot R_0 \quad (8)$$

При отличии формы сечения магнитной системы ТТ от квадратной необходимо учесть проводимость области размером $(H_M - T_M)$

$$\Delta\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma}^* \cdot (H_M - T_M). \quad (9)$$

С учетом (8, 9) проводимость пути потока рассеяния ТТ с МС прямоугольного сечения

$$\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma \text{ кв}} + \Delta\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\sigma}^* \cdot (\pi \cdot 0,5(D_{BH} + T_M - D_{Ш}) + 2H_M) \quad (10)$$

Распределение индукции по длине магнитопровода

Плотность потока рассеяния в магнитопроводе ТТ

$$B_{\sigma} = 4\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \frac{\Lambda_{\sigma} \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot k_{i1} \cdot (w_2 - w_{11})}{S_M \cdot w_2} 10^{-7}. \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для произвольного распределения вторичной обмотки на магнитопроводе и при его использовании необходимо учитывать следующее:

- если вторичная обмотка занимает меньше одного слоя, то $w_{11} = 0$, а величина сектора заполнения МС вторичной обмоткой с учетом клина $\alpha_2 < 2\pi$;
- при целом числе слоев обмотки $w_{11} = w_2$, $\alpha_2 = 2\pi$;
- в самом общем случае, когда обмотка занимает более одного слоя, то w_{11} представляет собой сумму витков во всех полных слоях вторичной обмотки, а α_2 – величина сектора магнитопровода, заполненного $(w_2 - w_{11})$ витками вторичной обмотки в последнем слое, $\alpha_2 < 2\pi$.

Полный магнитный поток ($\Phi_{\text{сум}}$) в магнитопроводе ТТ (рис. 6) определяется наложением магнитного потока взаимной индукции Φ_{M2} и полного магнитного потока рассеяния Φ_{σ} .

В расчетной модели ТТ на свободной части магнитопровода выделяется нечетное количество радиальных плоскостей $k = q$ (рис. 13, рис. 14). При этом рассматривается четное число участков $i = q - 1$, между радиальными сечениями $1, \dots, q$ ($q = 11, i = 10$ на рис. 13).

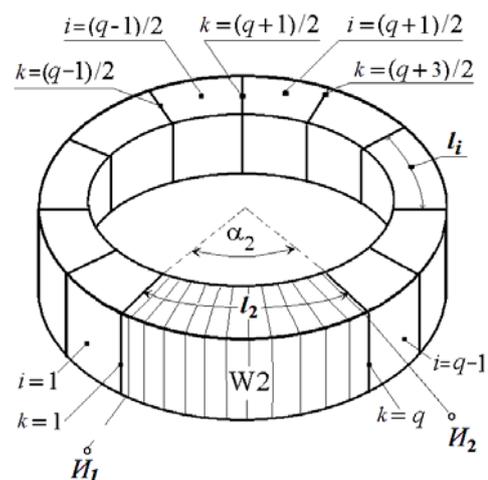


Рисунок 13. Расчетная модель ТТ

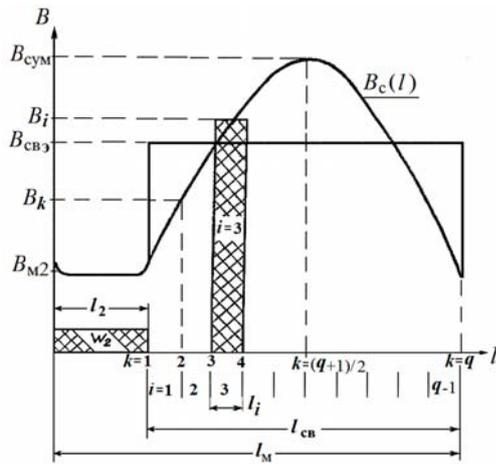


Рисунок 14. К расчету МДС намагничивания

С достаточной для практики точностью распределение магнитной индукции поля рассеяния в произвольном сечении (k) свободного от вторичной обмотки участка МС может быть принято синусоидальным (рис. 14) с максимумом в середине участка МС, свободного от витков вторичной обмотки при $k = (q+1)/2$

$$B_{\sigma k} = B_{\sigma} \cdot \sin\left(\pi \frac{k}{q+1}\right). \quad (12)$$

Значение магнитной индукции (B_k) в произвольном сечении свободного от вторичной обмотки участка МС

$$B_k = \sqrt{B_{\sigma k}^2 + B_{M2}^2}, \quad (13)$$

На участке МС под вторичной обмоткой магнитная индукция принимается неизменной по длине участка и определяется (3) величиной магнитного потока взаимоиндукции Φ_{M2} .

Поскольку на участке МС, свободном от витков вторичной обмотки зависимость $B_c(l)$ симметрична (рис. 14) относительно среднего сечения МС ($k = (q+1)/2$), расчеты можно выполнять для половины этой части МС трансформатора.

Расчет МДС, тока намагничивания

Критерий неравномерности распределения магнитной индукции по длине МС можно представить в виде

$$\xi = (B_{\text{сум}}/B_{M2}) - 1. \quad (14)$$

В зависимости от величины критерия целесообразно использовать разные способы расчета тока намагничивания ТТ.

При значительной неравномерности зависимости $B_c(l_M)$, т.е. при $\xi > 0,25$, свободная часть МС представляется состоящей из $i = q-1$ элементов, а ток намагничивания определяется исходя из закона полного тока –

$$I_0 = \frac{1}{w_1} \int_l H \cdot dl = \frac{1}{w_1} \sum_{j=1}^i H_j \cdot dl_j. \quad (15)$$

При расчетах принимается постоянным значение магнитной индукции в любом сечении по длине i -го элемента МС (l_i) ($i = 3$ на рис. 14), а значения индукций:

$$B_i = 0,5(B_{k(k=i)} + B_{k(k=i+1)}). \quad (16)$$

$$B_{\sigma i} = 0,5(B_{\sigma k(k=i)} + B_{\sigma k(k=i+1)}). \quad (17)$$

Составляющие напряженности магнитного поля в сечении i -го элемента свободной части МС для принятой системы координат (рис. 6)

$$H_{ix} = H_i \cdot \cos(\varphi_2 + \theta_i + \psi_i), \quad (18)$$

$$H_{iy} = H_i \cdot \sin(\varphi_2 + \theta_i + \psi_i). \quad (19)$$

Угол сдвига вектора ЭДС E_{M2} относительно вектора вторичного тока I_2 (рис. 15) определяется характером вторичной нагрузки

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H + r_2}. \quad (20)$$

Сдвиг вектора индукции i -го элемента (B_{CBi}) свободной части МС относительно индукции в части МС под вторичной обмоткой (B_{M2})

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{B_{M2}^2 + B_i^2 - B_{\sigma i}^2}{2B_{M2} \cdot B_i}\right). \quad (21)$$

Аналогично определяются составляющие напряженности магнитного поля в МС под вторичной обмоткой

$$H_{M2x} = H_{M2} \cdot \cos(\varphi_2 + \psi_2), \quad (22)$$

$$H_{M2y} = H_{M2} \cdot \sin(\varphi_2 + \psi_2). \quad (23)$$

Результирующая МДС (F_0) определяется суммированием составляющих МДС по осям координат.

$$F_x = 2 \cdot l_i \cdot \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{ix} + H_{M2x} \cdot l_2, \quad (24)$$

$$F_y = 2 \cdot l_i \cdot \sum_{i=1}^{(q-1)/2} H_{iy} + H_{M2y} \cdot l_2, \quad (25)$$

где l_2 – длина части МС под вторичной обмоткой;

l_i – длина участка свободной части МС,

Результирующая МДС

$$F_0 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}. \quad (26)$$

Угол сдвига вектора результирующей МДС относительно оси X

$$\beta = \arctg(F_y/F_x). \quad (27)$$

Ток намагничивания

$$I_0 = F_0 / w_1. \quad (28)$$

При незначительной ($\xi \leq 0,25$) неравномерности распределения $B_c(l_M)$ определяется эквивалентное значение (рис. 14) магнитной индукции $B_{CBЭ}$, при условии равномерного распределения магнитного потока вдоль свободной части МС.

$$B_{CBЭ} = \frac{1}{15} \left[\begin{array}{l} B_{k(1)} + 2(B_{k(3)} + B_{k(5)} + B_{k(6)}) + \\ + 4(B_{k(2)} + B_{k(4)}) \end{array} \right] \quad (29),$$

где $B_k \dots B_{k(6)}$ – значение магнитной индукции в сечениях $k = 1 \dots 6$ свободной части МС (рис. 13).

Угол сдвига вектора индукции ($B_{CBЭ}$) свободной части МС относительно индукции в части МС под вторичной обмоткой (B_{M2})

$$\theta_3 = \arccos(B_{M2} / B_{CBЭ}). \quad (30)$$

МС представляется состоящей из двух частей (рис. 14): части под вторичной обмоткой длиной l_2 с величиной индукции в стали B_{M2} и части МС длиной $l_{CB} = l_M - l_2$ с магнитной индукцией в стали $B_{CBЭ}$.

Составляющие МДС по осям координат

$$F_{эx} = H_{CBЭ} \cdot l_{CB} \cdot \cos(\varphi_2 + \theta_3 + \psi_{CB}) + H_{M2x} \cdot l_2; \quad (31)$$

$$F_{эy} = H_{CBЭ} \cdot l_{CB} \cdot \sin(\varphi_2 + \theta_3 + \psi_{CB}) + H_{M2y} \cdot l_2, \quad (32)$$

Результирующая МДС, угол сдвига β вектора результирующей МДС относительно оси X и ток намагничивания рассчитываются по (26, 27, 28).

Токковая и угловая погрешности ТТ

$$f = \frac{I_0}{I_{1H} \cdot k_{f1}} \cdot \sin(\beta) \cdot 100, \quad (35)$$

$$\delta = \frac{I_0}{I_{1H} \cdot k_{f1}} \cdot \cos(\beta) \cdot 3440. \quad (36)$$

Представленная математическая модель реализована в подсистеме проектирования и анализа ТТ [4].

Апробация математической модели

Экспериментальные и расчетные по [4] исследования распределения индукции в радиальных сечениях по длине МС при короткозамкнутой вторичной обмотке ($Z_H = 0$) проводились на образце ТТ с размерами МС 345/215/80 мм при токе $I_1 = 150A$, числе витков обмотки $w_2 = 150$ и секторах заполнения $\alpha_2 = 2\pi/3$ (рис. 15, а), $\alpha_2 = 2\pi$ (рис. 15, б), $\alpha_2 = (2 + 2/3)\pi$ (рис. 15, в), $\alpha_2 = (2 + 4/3)\pi$ (рис. 15, г).

Исследования погрешностей многодиапазонного ТТ выполнялись на ТТ размерами МС

$D_H / D_{BH} / H = 345 / 215 / 80$ мм с числом витков $w_2 = 40, 60, 80, 120$, занимающих на МС сектора $\alpha_2 = 120, 180, 240, 360$ град соответственно. Данные экспериментальных (э) и расчетных (р) исследований токовой и угловой погрешностей сведены в табл. 1, 2.

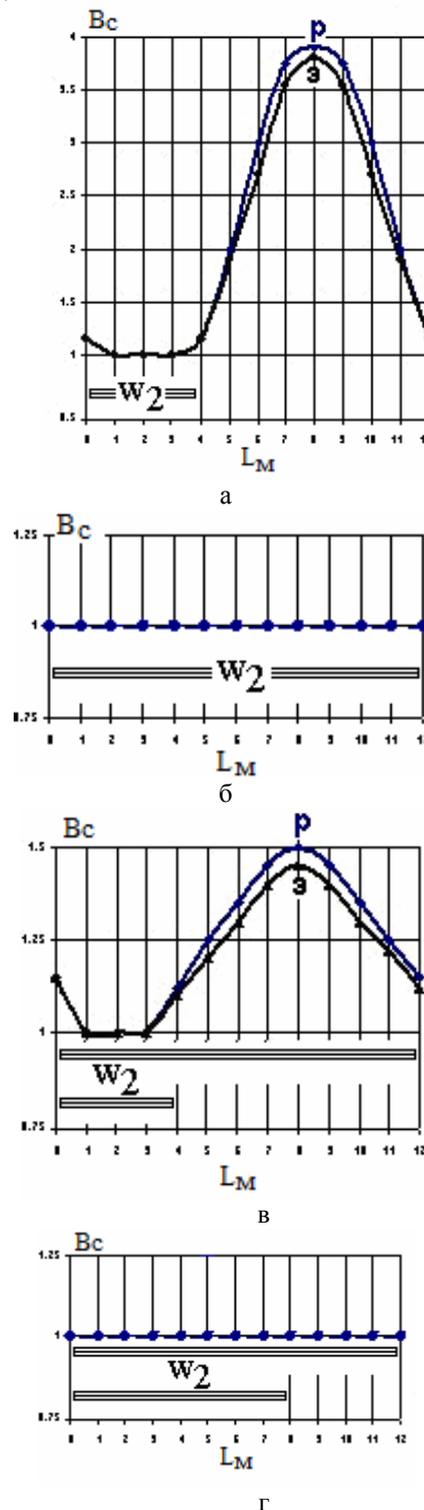


Рисунок 15. Зависимость $B = \varphi(l_M, \alpha_2)$ при различном заполнении магнитопровода

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

Таблица 1. Токовая погрешность

I_1, A	$Z_H, Ом$		$f, \%$			
			$0,5I_{1H}$	I_{1H}	$1,2I_{1H}$	$Z = 0,5Z_H$
200	0,6	э	2,1	1,8	1,7	1,2
		р	2,21	1,7	1,56	1,21
300	0,6	э	1,2	0,95	0,92	0,6
		р	1,2	0,9	0,85	0,59
400	0,8	э	0,8	0,66	0,64	0,43
		р	0,9	0,67	0,62	0,43
600	1,2	э	0,48	0,41	0,38	0,25
		р	0,58	0,44	0,42	0,27

Таблица 2. Угловая погрешность

I_1, A	$Z_H, Ом$		$\delta, мин$			
			$0,5I_{1H}$	I_{1H}	$1,2I_{1H}$	$Z = 0,5Z_H$
200	0,6	э	28	15	14	13
		р	32	20	17	16
300	0,6	э	15	9	7	6
		р	18	13	10	8
400	0,8	э	12	7	6	4
		р	15	10	9	7
600	1,2	э	10	6,5	5,5	5
		р	11	8	6	6

V. ВЫВОДЫ

1. Распределение магнитного поля в магнитопроводе ТТ неравномерно и определяются сектором заполнения магнитопровода витками вторичной обмотки и величиной нагрузки.

2. Т-образная схема замещения ТТ справедлива только для трансформаторов с полным заполнением МС витками вторичной обмотки.

3. П-образная схема замещения ТТ учитывает влияние полей рассеяния обмоток на величину индукции в радиальных сечениях МС.

4. Для практических расчетов количество участков свободной части магнитопровода необходимо принимать не менее десяти.

5. При многослойной вторичной обмотке необходимо учитывать сектор распределения витков последнего слоя.

6. Математическая модель расчета погрешностей дает удовлетворительные результаты расчета распределения индукции в МС и погрешностей ТТ при произвольном расположении вторичной обмотки на магнитопроводе трансформатора.

- [1] Шевченко В.П., Бабийчук О.Б. Исследование магнитного поля трансформатора тока. Электромашиностроение и электрооборудование, №70, 2008, с. 91–94.
- [2] Shevchenko, V. P., Babiychuk, O. B., Boltenev, V. A., Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. Applied Aspects of Information Technology, 2019; Vol.2 No.4: 317–327
- [3] Костадин Брандиски, Илона Ячева САД системи в електромагнетизма. Руководство за QuickField и FEMM. – SIELA, 2002, – 243 с.
- [4] Шевченко В.П. Пакет программ проектирования и анализа трансформаторов тока. – www.twirpx.com, 2017, – 155 МБ.
- [5] Shevchenko V. Heightened the precision of current transformers. – Proceedings of XIV-th International Symposium SIELA 2005, Bulgaria. Vol. I, p. 123–127.
- [6] Кузнецов С.Л., Дегтярев А.А. Математическое моделирование трансформаторов тока с глубоким насыщением магнитопроводов. – Sigre, 2015. – 8 с.
- [7] Приступ А.Г. Моделирование магнитных полей в программе FEMM: учеб.–метод. пособие/ А.Г. Приступ, А.В. Червяков. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 92 с.
- [8] Систематические погрешности измерительных трансформаторов тока: Зависимость от величины первичного тока/А.Е. Усачев, Ф.Ф. Муллин. Проблемы энергетики, 2004, 7-8, с. 35–40.
- [9] Nicola Branchi Electrical machine analysis using finite elements. –Taylor & Francis Group, 2005, – 275 p.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman Transformers and Inductor Design Handbook. Forth Edition.–Taylor and Francis Group, 2011, – 669 p.
- [11] Jay Andersen Current Transformers Theory & Testing. Omicron Academy, 2016, – 54 p.
- [12] Steve Laslo Current Transformers. Bonneville Power Administration. Revision 1.2, 2013, – 142 p.
- [13] Edvard Csanyi The Essentials Of Current Transformers In Power Circuits (Theory and Practice), Electrical Engineering Portal, December, 3rd 2018.
- [14] Heathcote Martin J. J & P Transformer Book 13th Edition. – Elsevier Ltd., 2007. XIV, 974 p.
- [15] Werner D.H., Kwon D.-H. (eds.) Transformation Electromagnetics and Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. – Springer, 2014. –

499 p.

[16] Hurley W.G., Wölfle W.H. Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. – John Wiley & Sons Ltd., 2013. – 360 p.

[17] Poularikas A.D. The Transforms and Applications Handbook. –IEEE Press, 2010, –914 p.

Стаття надійшла до редакції 20.11.21

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

ШЕВЧЕНКО В.П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Одеського національного університета, Одеса, Україна, E-mail: shevospu@gmail.com>

БАБІЙЧУК О.Б. научный сотрудник, научный сотрудник института компьютерных систем Одеського національного університета, Одеса, Україна, E-mail: obbabiychuk@ukr.net

Мета роботи. Розробка на основі детального аналізу розподілу магнітного поля в несиметричних конструкціях ТТ схеми заміщення і складання математичної моделі розрахунку похибок стосовно багатодіапазонного вбудованого ТТ з тороїдальною МС і одновитковою первинною обмоткою при різному заповненні МС витками вторинної обмотки.

Методи дослідження. Експериментальне дослідження розподіл магнітного поля в тороїдальному трансформаторі струму та похибок трансформатора

Отримані результати. Розроблено схеми заміщення трансформатора струму, адекватно відображають розподіл магнітного поля в магнітопроводі трансформатора і математична модель розрахунку похибок.

Наукова новизна. За результатами моделювання у FEMM та експериментальних досліджень визначено характер розподілу магнітного поля при частковому заповненні магнітопроводу витками вторинної обмотки, розроблено схеми заміщення трансформатора струму.

Практична цінність. Розроблено математичну модель розрахунку розподілу магнітного поля в магнітопроводі та похибок трансформатора, на підставі якої складено програму розрахунку похибок трансформаторів струму.

Ключові слова: трансформатор струму; магнітне поле; векторну діаграму; схема заміщення; потік розсіювання; основний магнітний потік; вільна частина магнітопроводу; критерій нерівномірності розподілу магнітного потоку; струмова та кутова похибки трансформатора.

MAGNETIC FIELD OF CURRENT TRANSFORMER

SHEVCHENKO V.P. Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines Department, Odessa National University, Odessa, Ukraine, E-mail: shevospu@gmail.com

BABIYCHUK O.B. Researcher, Researcher, Institute of Computer Systems, Odessa National University, Odessa, Ukraine, E-mail: obbabiychuk@ukr.net

Purpose. Development of equivalent circuits based on a detailed analysis of the magnetic field distribution in asymmetric CT structures and drawing up a mathematical model for calculating errors in relation to a multi-range built-in CT with a toroidal MC and a single-turn primary winding with different filling of the MC with turns of the secondary winding.

Methodology. Experimental study of the magnetic field distribution in a toroidal current transformer and transformer errors

Findings. The equivalent circuits of the current transformer, which adequately reflect the distribution of the magnetic field in the magnetic circuit of the transformer and a mathematical model for calculating the errors, were developed.

Originality. Based on the results of modeling in FEMM and experimental studies, the nature of the distribution of the magnetic field with partial filling of the magnetic circuit with turns of the secondary winding was determined, and equivalent circuits of the current transformer were developed.

Practical value. A mathematical model was developed for calculating the distribution of the magnetic field in the magnetic circuit and the transformer errors, on the basis of which a program for calculating the errors of current transformers was compiled.

Key words: current transformer; a magnetic field; vector diagram; equivalent circuit; leakage flux; main magnetic flux; free part of the magnetic circuit; criterion of non-uniformity of magnetic flux distribution; current and angular errors of the transformer.

REFERENCES

- [1] Shevchenko, V.P., Babiyshuk O.B. (2008). Iedovanie magnitnogo polya transformatora toka. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*, No 70, 91-94.
- [2] Shevchenko, V.P., Babiyshuk, O.B. (2008). Issledovanie magnitnogo polya transformatora toka. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*. No 70, 91-4.
- [3] Brandiski, K., Yacheva, I. (2002) CAD sistemi v elektromagnetizma. Rukovodstvo za QuickField i FEMM. SIELA, 243.
- [4] Shevchenko, V.P. (2017) Paket programm proektirovaniya i analiza transformatorov toka. 155.
- [5] Shevchenko, V. (2005). Heightened the precision of current transformers. Proceedings of XIV-th International Symposium SIELA, Bulgaria. Vol. 1, 123-127.
- [6] Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A. (2015) Matematicheskoe modelirovanie transformatorov toka v rezhimakh s glubokim nasyischniem magnitoprovodov Sigre, 8.
- [7] Pristup, A.G., Chervyakov, A.V. (2012) Modelirovanie magnitnykh poley v programme FEMM: ucheb.-metod. Posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 92.
- [8] Usachev, A.E., Mullin, F.F. (2004) Sistematische-kie pogreshnosti izmeritelnykh transformatorov toka: Zavisimost ot velichiny pervichnogo toka. *Problemy energetiki*, 7-8, 35-40.
- [9] Branchi, N. (2005) Electrical machine analysis using finite elements. Taylor & Francis Group, 275.
- [10] Colonel Wm. T. McLyman (2011) Transformers and Inductor Design Handbook. Forth Edition. Taylor and Francis Group, 669.
- [11] Jay Andersen Current Transformers Theory & Testing. Omicron Academy, 2016, 54.
- [12] Steve Laslo Current Transformers. (2013) Bonneville Power Administration. Revision 1.2, 142.
- [13] Edvard Csanyi The Essentials Of Current Transformers In Power Circuits (Theory and Practice), Electrical Engineering Portal, December, 3rd 2018.
- [14] Heathcote Martin J. J & P Transformer Book 13th Edition. Elsevier Ltd., 2007. XIV, 974.
- [15] Werner D.H., Kwon D.-H. (eds.) (2014) Transformation Electromagnetics and Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. Springer, 499.
- [16] Hurley, W.G., Wölfle, W.H. (2013) Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. John Wiley & Sons Ltd., 360.
- [17] Poularikas, A.D. (2010) The Transforms and Applications Handbook. IEEE Press, 914.