

**О РАСЧЕТЕ ИНДУКТИВНОСТИ
РАССЕЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ОБМОТКАМИ,
ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА ОДНОМ СТЕРЖНЕ
МАГНИТОПРОВОДА**

Ю. В. ФРАКМАН.

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических сетей и систем)

С точки зрения расчета индуктивности рассеяния, любое относительное положение обмоток трансформатора можно назвать произвольным. Существующие методы расчета относительно сложны и недостаточно наглядны. Поэтому изложенный ниже метод расчета найдет практическое применение в проектировании силовых трансформаторов. При логическом обосновании предлагаемого метода несколько развиваются современные физические представления о процессе рассеяния, что придает настоящей работе определенный теоретический интерес.

За основу рассуждений принята известная простотой и наглядностью формула Каппа.

Возможность расчета индуктивности рассеяния упомянутых обмоток, с помощью теории многообмоточных трансформаторов [1], путем многократного использования формулы Каппа позволяет распространить на произвольное расположение обмоток упрощающие допущения, принятые при выводе последней формулы, и, в частности, считать магнитные силовые линии прямыми.

Для определения направления магнитных силовых линий в поле рассеяния между расчетными (использованными в выводе формулы Каппа) сечениями обмоток рассмотрим механическое взаимодействие последних. Результирующая сила отталкивания обмоток [2] всегда направлена вдоль прямой, соединяющей их центры инерции. Если учесть, что поле рассеяния обмоток, расположенных на одном стержне, обладает осевой симметрией, эту закономерность можно распространить и на расчетные сечения обмоток. Тогда согласно представлению о поперечном расписе магнитных силовых линий последние можно считать направленными нормально к прямой, соединяющей центры инерции расчетных сечений обмоток.

Охарактеризуем относительное расположение рассматриваемых обмоток углами γ , образованными нормалью к осям обмоток и прямой, соединяющей центры инерции их расчетных сечений — рис. 1.

При концентрическом расположении обмоток ($\gamma=0$), как и в случае чередующегося расположения симметричных дисковых обмоток ($\gamma=\pi/2$), высоты и радиальные размеры последних измеряются соответственно в продольном и поперечном направлениях магнитных силовых линий. Примем, что такой порядок определения размеров обмоток справедлив и при любом промежуточном ($0 \leq \gamma < \pi/2$) поло-

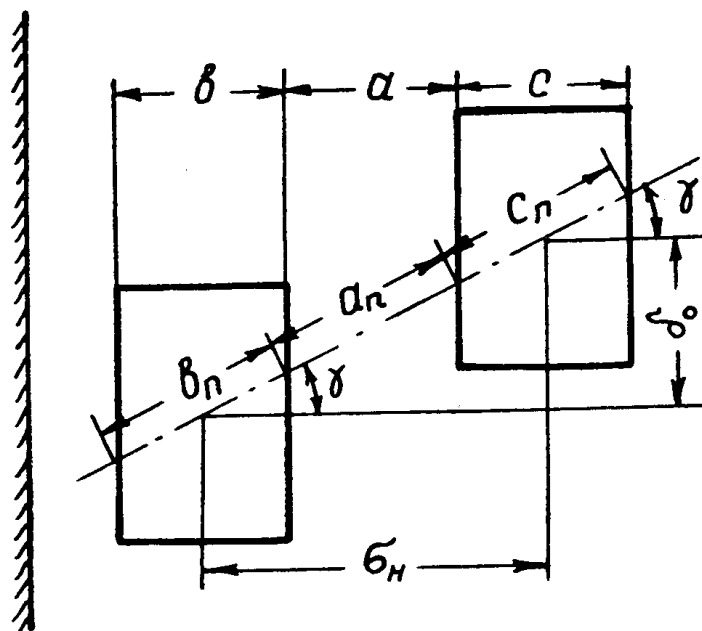


Рис. 1

жении последних. В этом случае расчетная картина поля рассеяния реального трансформатора не изменится, если заменить реальный трансформатор расчетным (фиктивным), у которого расстояние между центрами инерции расчетных сечений обмоток такое же, какое у реального трансформатора, а высоты обмоток и радиальные размеры поля рассеяния в $\cos \gamma$ раз меньше одноименных размеров реального трансформатора, измеренных соответственно вдоль и нормально геометрической оси обмоток последнего — рис. 1 и 2. На этих рисунках размеры расчетного трансформатора помечены индексом п (промежуточное положение обмоток).

В расчетном трансформаторе $\gamma = 0$, поэтому для определения индуктивности рассеяния его обмоток можно непосредственно использовать формулу Каппа. Однако для практических расчетов удобнее, пользуясь указанным выше соотношением, выразить размеры расчетного трансформатора через размеры реального. В этом случае формулу Каппа для расчета индуктивности рассеяния равновысоких, произвольно расположенных на одном стержне, обмоток трансформатора можно записать в виде

$$L_{12s} = \frac{\mu_0 w_1^2 l}{h_{06} \cos \gamma} \left(a + \frac{b + c}{3} \right) \rho \quad (1)$$

или

$$L_{12s} = \frac{2\pi \mu_0 w_1^2}{h_{06} \cos \gamma} \left(a R_a + \frac{1}{3} b R_b + \frac{1}{3} c R_c \right) \rho, \quad (2)$$

где L_{12s}

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

$$w_1$$

$$b, c \text{ и } a$$

— суммарная индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к обмотке 1;

— магнитные проницаемости воздуха или масла и материала обмоток (медь или алюминий), принятые равными магнитной проницаемости пустоты;

— количество витков в обмотке 1;

— радиальные размеры обмоток и зазора между ними;

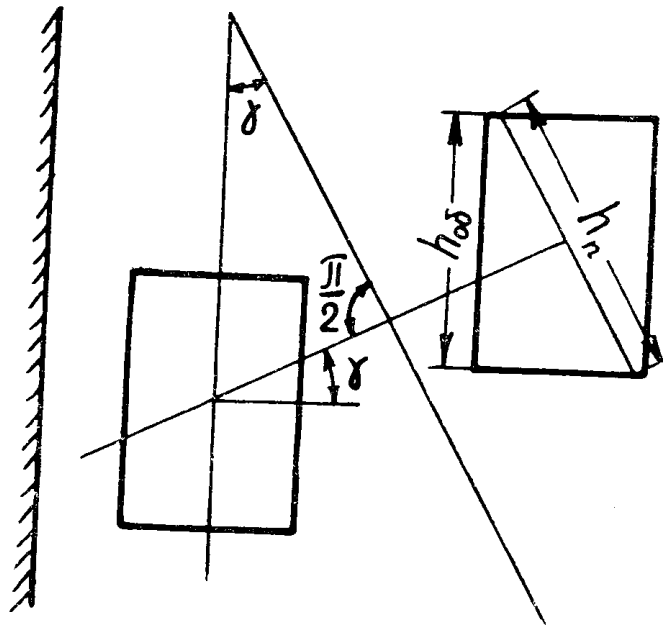


Рис. 2

- R_b, R_c и R_a — средние радиусы обмоток и зазора между ними;
 $h_{об}$ — высота обмоток;
 $\tau = a + b + c$ — радиальный размер поля рассеяния;
 $\rho = 1 - \frac{\tau}{\pi h_{об}} (1 - e^{-\pi h_{об}/\tau})$ — коэффициент Роговского;
 σ_n и σ_o — радиальное и осевое расстояния между центрами инерции расчетных сечений обмоток реального трансформатора;
 $\gamma = \arctg \frac{\sigma_o}{\sigma_n}$.

В том случае, когда обмотки реального трансформатора отличаются по высоте, формулы (1) и (2) согласно [3] следует переписать следующим образом:

$$L_{12s} = \frac{\mu_0 W_1^2 I \varphi^2}{h_{\max} \cos \gamma} \left(a + \frac{b + c}{3} \right) \rho_m, \quad (3)$$

$$L_{12s} = \frac{2\pi\mu_0 W_1^2 \varphi^2}{h_{\max} \cos \gamma} \left(a R_a + \frac{1}{3} b R_b + \frac{1}{3} c R_c \right) \rho_m, \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) h_{\max} и h_{\min} — соответственно высоты более и менее высокой обмоток;

$$\rho_{\max} = 1 - \frac{\tau}{\pi h_{\max}} \left(1 - e^{-\pi h_{\max}/\tau} \right);$$

$$\rho_{\min} = 1 - \frac{\tau}{\pi h_{\min}} \left(1 - e^{-\pi h_{\min}/\tau} \right);$$

$$\varphi = \sqrt{0,5[1 + (h_{\max} \rho_{\min}/h_{\min} \rho_{\max})^2]};$$

$$\rho_m = 1 - \frac{\varphi \tau}{\pi h_{\max}} \left(1 - e^{-\pi h_{\max}/\varphi} \right);$$

$$\gamma = \arctg \frac{\sigma_o}{\varphi \sigma_n};$$

остальные обозначения совпадают с принятыми в формулах (1) и (2).

Согласно закону о переходе количества в качество накопление количественных изменений скачкообразно приводит к качественным изменениям. Рассмотрение формул (1) — (4) показывает что (при конечном расстоянии между обмотками) скачок имеет место по достижении равенства $\gamma = \pi/2$ и заключается во взаимной замене определенных при $\gamma = 0$ понятий о высоте и радиальной толщине обмоток. Таким образом, формулы (1) — (4) правомерны в области ограниченной неравенством $\gamma < \pi/2$. Уместно отметить, что формулы (3) и (4), по отношению к формулам (1) и (2), являются более общими и превращаются в последние в случае равновысоких обмоток.

При соблюдении равенства $\gamma = \pi/2$ в расчете следует использовать результаты вывода (формулу) Роговского для симметричных чередующихся дисковых обмоток [4].

Таблица 1

№ пп.	$h_{об}$	w	q	r	R
—	см	—	см	см	ом
1	2	3	4	5	6
1	18	841	2,95	3,3	5,67
2	18	714	5,87	6,23	6,49
3	12	477	6,24	6,6	3,96

Таблица 2

1—2		Значение угла γ				
		0°	$17^\circ 10'$	$35^\circ 40'$	$54^\circ 40'$	75°
x_p	ом	11,78	12,35	14,5	20,4	45,5
x_k	ом	11,95	12,4	13,8	18,3	50,4
Δx_p	%	1,42	0,4	5,07	11,5	9,73

Таблица 3

1—3		Значение угла γ				
		0°	$16^\circ 20'$	$34^\circ 40'$	$54^\circ 20'$	$76^\circ 20'$
x_p	ом	21	21,9	25,6	36	89
x_k	ом	19,4	20	22,8	32,1	98,5
Δx_p	%	8,25	9,5	12,3	12,15	9,65

Для проверки проведенных рассуждений были изготовлены два трансформатора, характеристики обмоток которых приведены в табл. 1. В этой таблице через q и r обозначены соответственно внутренний и внешний радиусы обмоток, а через R — сопротивление последних постоянному току.

В табл. 2 приведены и сопоставлены ($\Delta x\%$) результаты расчета (x_p) по формуле (4) и опыта короткого замыкания (x_k) обмоток 1 и 2, а в табл. 3 — обмоток 1 и 3 при различных значениях угла γ .

Сравнение результатов опыта и расчета показывает, что точность полученных формул такая же, как у формулы Каппа, то есть около 10 проц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Петров. Трансформаторы, т. 1, ОНТИ, 1934.
2. Ф. Энгельс. Диалектика природы, ГИПЛ, 1952.
3. Ю. В. Фракман. О расчете рассеяния трансформаторов с разновысокими обмотками. Изв. ТПИ, № 172, 1967.
4. Б. Хэг. Электромагнитные расчеты, ОНТИ, 1934.