ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 191 1969

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 распоре магнитных силовых линий последние можно считать направленными нормально к прямой, соединяющей центры инерции расчетных сечений обмоток.

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

При концентрическом расположении обмоток ($\angle\gamma=0$), как и в случае чередующегося расположения симметричных дисковых обмоток ($\angle\gamma=\pi/2$), 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 ($0\leqslant\gamma<\pi/2$) поло-

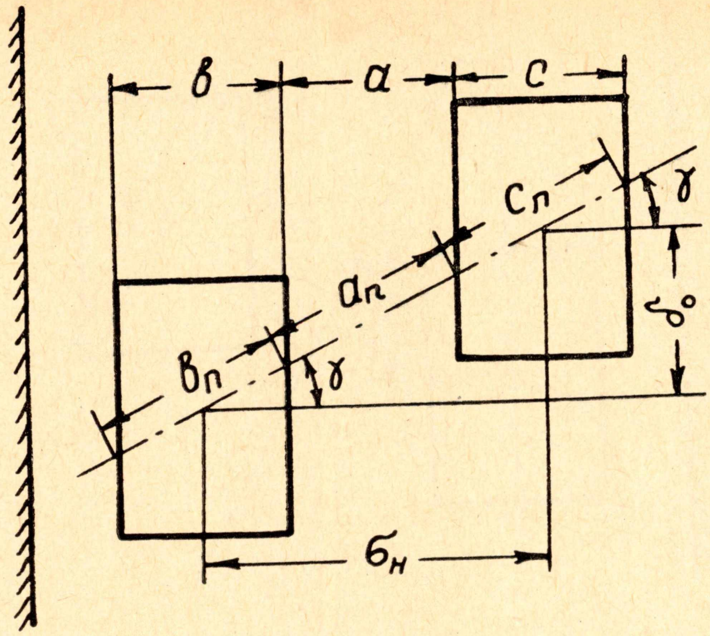

Рис. 1

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 $\angle\gamma=0$, 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

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

или

$$L_{12s} = \frac{2\pi\mu_0 w_1^2}{h_{об}\cos\gamma}\left(aR_a + \frac{1}{3}bR_b + \frac{1}{3}cR_c\right)\rho, \tag{2}$$

где L_{12s} — суммарная индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная к обмотке 1;

$\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$[*гн/м*] — магнитные проницаемости воздуха или масла и материала обмоток (медь или алюминий), принятые равными магнитной проницаемости пустоты;

w_1 — количество витков в обмотке 1;

b, c и a — радиальные размеры обмоток и зазора между ними;

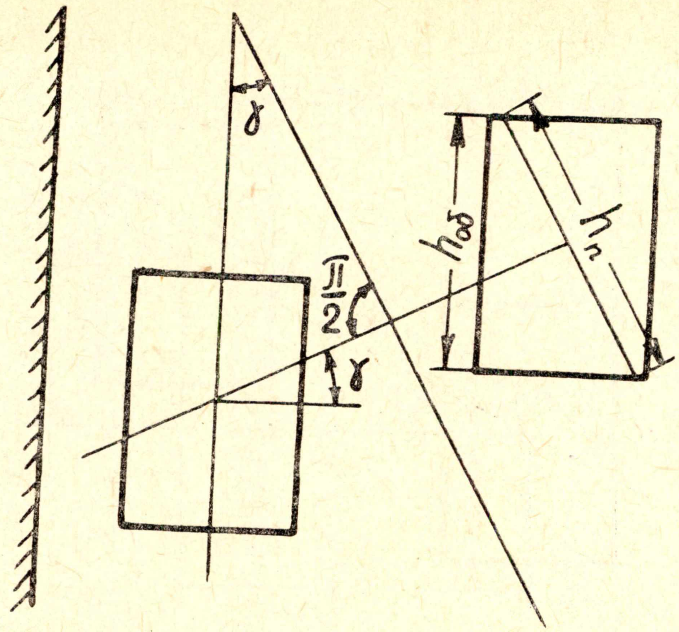

Рис. 2

$R_в$, 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;

$\sigma_н$ и $\sigma_о$ — радиальное и осевое расстояния между центрами инерции расчетных сечений обмоток реального трансформатора;

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_о}{\sigma_н}.$$

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

$$L_{12s} = \frac{\mu_0 w_1^2 l \varphi^2}{h_{max} \cos\gamma}\left(a + \frac{b + c}{3}\right)\rho_m, \tag{3}$$

$$L_{12s} = \frac{2\pi\mu_0 w_1^2 \varphi^2}{h_{max} \cos\gamma}\left(aR_a + \frac{1}{3} bR_b + \frac{1}{3} cR_c\right)\rho_m, \tag{4}$$

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

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

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

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

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

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_о}{\varphi\sigma_н};$$

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°10′	35°40′	54°40′	75°
$x_р$	*ом*	11,78	12,35	14,5	20,4	45,5
$x_к$	*ом*	11,95	12,4	13,8	18,3	50,4
$\Delta x_р$	%	1,42	0,4	5,07	11,5	9,73

Таблица 3

1—3		Значение угла γ				
		0°	16°20′	34°40′	54°20′	76°20′
$x_р$	*ом*	21	21,9	25,6	36	89
$x_к$	*ом*	19,4	20	22,8	32,1	98,5
$\Delta x_р$	%	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 ($x_р$) по формуле (4) и опыта короткого замыкания ($x_к$) 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.