

### К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАЗОРА В ДРОССЕЛЯХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ\*)

Аспирант Е. И. ГОЛЬДШТЕЙН

Для современных марок электротехнических сталей, в частности для Э-310, суммарная длина оптимального зазора  $\sigma_{\text{ОПТ}}$  может быть определена по формуле из [1 стр. 107]:

$$\delta_{\text{ОПТ}} = 1,6 \cdot 10^{-4} I_0 W \frac{Q_3}{Q_c} \quad [\text{см}], \quad (1)$$

- $I_0$  — постоянная составляющая выпрямленного тока;
- $W$  — число витков обмотки дросселя;
- $Q_3$  — «уширенная» площадь поперечного сечения зазора;
- $Q_c$  — площадь поперечного сечения стали сердечника.

В практике инженерных расчетов, в связи с трудностью определения величины  $Q_3$ , пренебрегают «выпучиванием» и рассеянием магнитного потока [1 фор. (4, 5)]:

$$\delta_{\text{ОПТ}} = 1,6 \cdot 10^{-4} I_0 W \quad [\text{см}] \quad (2)$$

Но использование формулы (2) приводит к заметным погрешностям, особенно при  $I_0 W \geq 1000 \text{ав}$ , поэтому в большинстве случаев величину оптимального зазора приходится уточнять экспериментально. Задачей настоящей работы является получение графических зависимостей, пригодных для выбора оптимального зазора с учетом как «выпучивания» так и рассеяния магнитного потока.

Для связи между «уширенным» и истинным ( $Q_0$ ) сечениями зазора используем выражение (3):

$$Q_3 = Q_0 k_{\Phi}, \quad (3)$$

где коэффициент фиктивного зазора  $K_{\Phi}$  связывает реальный зазор  $\sigma$  с зазором  $\sigma_{\Phi}$  фиктивного дросселя, имеющего те же геометрические размеры и проводимость основного зазора  $G_0$ , равную полной проводимости  $G_{\Pi}$  магнитной системы рассматриваемого дросселя, т. е.

$$K_{\Phi} = \frac{\delta}{\delta_{\Phi}} = \frac{G_{\Pi}}{G_0} \quad (4)$$

\*) Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора И. Д. Кутявина.



Связь  $Q_0$  с  $Q_C$  определяется выражением (5):

$$Q_C = Q_0 K_C, \quad (5)$$

где  $K_C$  — коэффициент заполнения сталью сердечника. Из (1) с учетом (3) и (5) получим:

$$\delta_{\text{ОПТ}} = 1,6 \cdot 10^{-4} I_0 W \frac{K_\Phi}{K_C} \quad (6)$$

Перейдем к относительному воздушному зазору  $\delta'$  и удельным ампервитком  $a\omega_0$ :

$$\delta' = \frac{\delta}{l_C}, \quad (7)$$

$$a\omega_0 = \frac{I_0 W}{l_C}, \quad (8)$$

где  $l_C$  — длина силовой линии по стали.

Из (6), (7) и (8) получим:

$$\frac{\delta'_{\text{ОПТ}}}{K_\Phi} = 1,6 \cdot 10^{-4} a\omega_0 \frac{1}{K_C}. \quad (9)$$

Для определения оптимального зазора по выражению (9) необходимо иметь зависимость  $\delta'/K_\Phi = f(\delta')$ .

В [2] дана методика получения зависимости коэффициента выпучивания  $K_B$  от относительного зазора. Аналогично можно получить зависимости для коэффициента рассеяния  $K_P$  и коэффициента фиктивного зазора  $K_\Phi$ , учитывая что:  $K_\Phi = K_B + K_P - 0,5$ . (10)

На рис. 1 и рис. 2 показаны П-образная схема и ее схема замещения. В таблице 1 приведены основные параметры геометрии, а также координаты полей выпучивания и рассеяния, используемые при определении отдельных проводимостей.

Таблица 1.

Основные размеры мм				Параметры геометрии			Координаты полей			
$a$	$b$	$c$	$h$	$x$	$y$	$z$	$\nu'_B$	$\theta''_B$	$\theta_a$	$\theta_{га}$
20	24	30	80	1,2	1,5	4	0,5с	$a'$	$a$	$a$

Коэффициент выпучивания определяется по выражению (11):

$$K_B = 0,5 \left( 1 + g_{\text{ПР}} \frac{\delta}{ax} \right), \quad (11)$$

0,5 — коэффициент, учитывающий наличие двух зазоров;

$g_{\text{ПР}}$  — приведенная проводимость.

$$g_{\text{ПР}} = g_a + x(g'_B + 0,5g''_B). \quad (12)$$

Удельная проводимость  $g_a$  определяется как сумма удельных проводимостей с грани «а» ( $g_{га}$ ) и «ребер» торцевой поверхности ( $g_{рта}$ ).

$$g_a = g_{га} + g_{рта}. \quad (13)$$







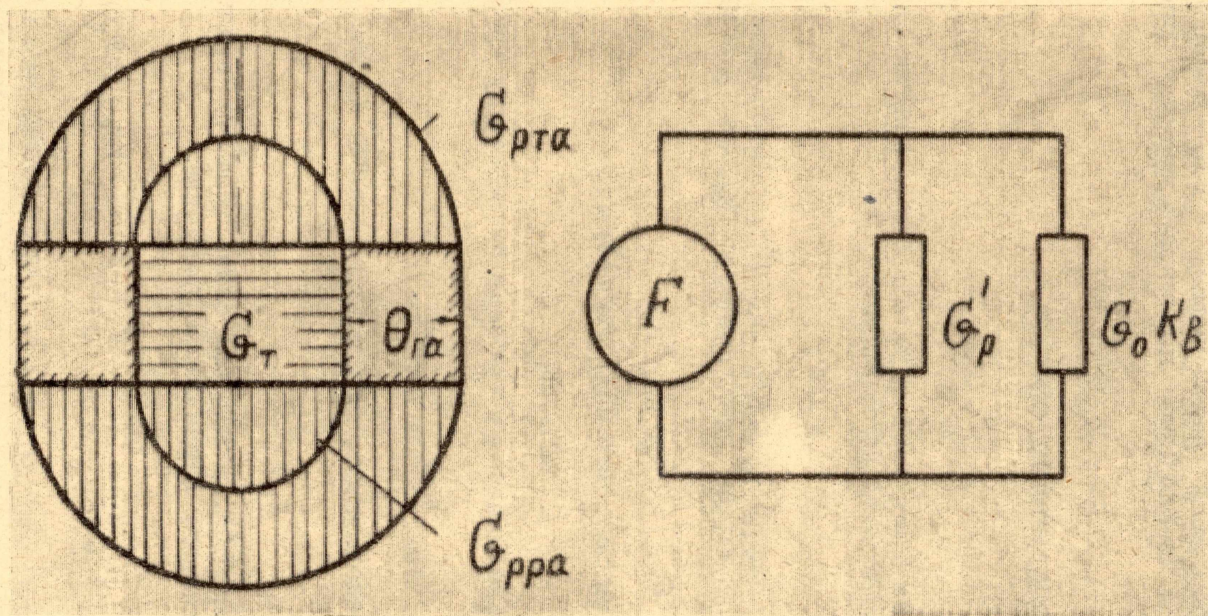


Рис. 2.



Аналогично:

$$g'_{\text{в}} = g'_{\text{гв}} + g'_{\text{ртв}}, \quad (14)$$

$$g''_{\text{в}} = g''_{\text{гв}} + g''_{\text{ртв}}. \quad (15)$$

Удельные проводимости с грани и «ребер» определяются по экспериментальным кривым, полученным Б. К. Булем [3, фиг. 6, 8, 9]. Использование указанных кривых позволяет учесть влияние на величину удельной проводимости размера полюса в направлении, перпендикулярном рассматриваемой грани (размер  $\Omega$ ). Для определения коэффициента рассеяния необходимо подсчитать полную проводимость рассеяния  $G_{\text{р}}$ :

$$G_{\text{р}} = G_{\text{т}} = 2G_{\text{рга}} + 2G_{\text{рра}} \quad (16)$$

Проводимость между гранями «в»

$$G_{\text{т}} = \mu_0 \frac{b}{c} l'_{\text{р}}, \quad (17)$$

где расчетная длина поля рассеяния  $l'_{\text{р}}$  определяется по соответствующей координате поля выпучивания

$$l'_{\text{р}} = h - \theta'_{\text{в}}. \quad (18)$$

Проводимость между гранями «а»  $G_{\text{рга}}$  определяем, в соответствии с рекомендациями, по кривым Кремпа и Кольдервуда [3, фиг. 13]:

$$G_{\text{рга}} = 0,5\mu_0 g_{\text{рга}} l''_{\text{р}}, \quad (19)$$

причем расчетная длина этого поля рассеяния:

$$l''_{\text{р}} = h - \theta_{\text{а}}. \quad (20)$$

Аналогично определяется и проводимость между «ребрами» грани «а»:

$$G_{\text{рра}} = 0,5\mu_0 g_{\text{рра}} l''_{\text{р}}. \quad (21)$$

Здесь удельная проводимость, при использовании кривой Кремпа и Кольдервуда:

$$g_{\text{рра}} = 0,1. \quad (22)$$

Из выражений (16)–(22), учитывая связь геометрических размеров с параметрами геометрии сердечника, получим:

$$K_{\text{р}} = 0,5 + 0,333 \frac{\delta}{a} \left[ \frac{1}{y} \left( z - \frac{\theta'_{\text{в}}}{a} \right) + \frac{1}{x} \left( z - \frac{\theta_{\text{а}}}{a} \right) (g_{\text{рга}} + 0,1) \right] \quad (23)$$

Необходимо отметить, что выражение (23) получено для коэффициента рассеяния по числу потокосцеплений, т. е. для магнитной системы переменного тока при следующей связи между приведенной ( $G'_{\text{р}}$ ) и геометрической ( $G_{\text{р}}$ ) проводимостями рассеяния [4]

$$G'_{\text{р}} = 0,333G_{\text{р}} \quad (24)$$

В таблице 2 приведены основные этапы вычислений, необходимых для получения зависимости  $\frac{\delta'}{K_{\text{ф}}} = f(\delta')$ , построенной на рис. 3. На



Этом же рисунке приведена зависимость  $K_{\phi} = f(\delta')$  и показаны результаты ее экспериментальной проверки, проведенной при двух значениях относительного зазора.

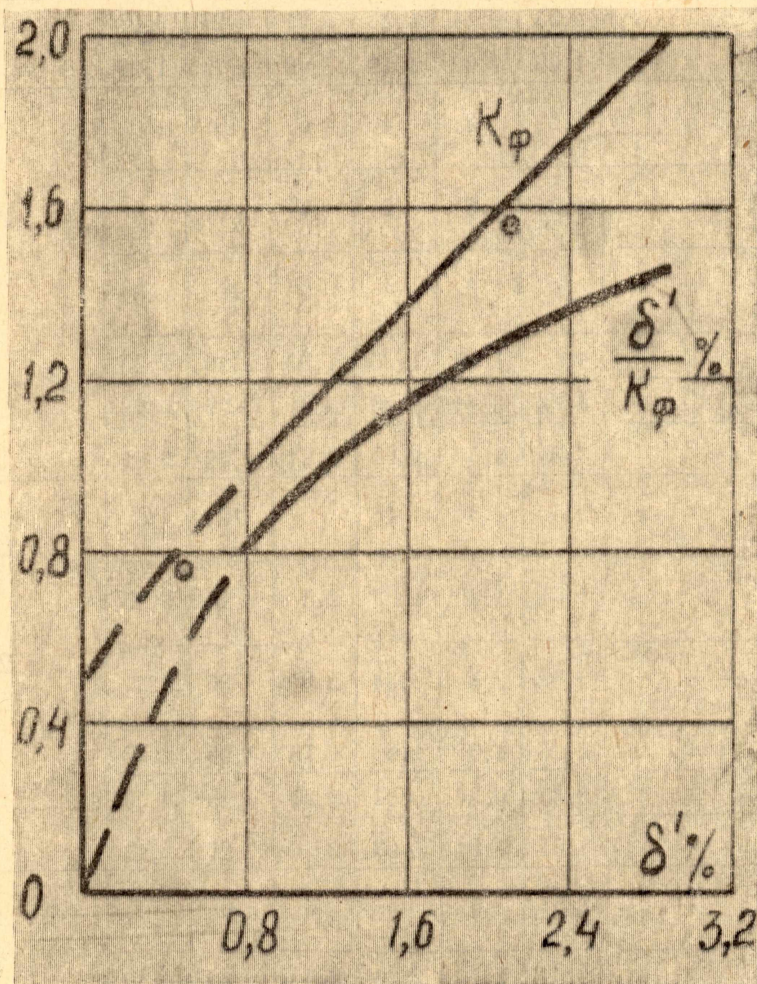


Рис. 3.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для оптимального воздушного зазора сделано в таблице 3; причем необходимо обратить внимание, что кривые рис. 3 приведены к одному зазору, поэтому и расчетный  $\sigma'$  — на один зазор П-образной системы.

Таблица 2.

$\frac{\Omega}{\Delta} = \frac{a}{\delta}$	2,5	3	4	6	10	15	Примечание
$\frac{v'_{\text{в}}}{\Delta}$	1,88	2,25	3	4,5	7,5	11,3	$\Delta = \delta$
$\frac{\theta'_{\text{в}}}{\Delta}$	0,7	0,8	1,2	2,4	4,7	7,7	$\Omega = a$
$g'_{\text{ГВ}}$	0,74	0,68	0,86	1,18	1,5	1,71	



Таблица 2.

$\frac{\Omega}{\Delta} = \frac{a}{\delta}$	2,5	3	4	6	10	15	Примечание
$g'_{\text{PTB}}$	0,35	0,34	0,33	0,31	0,29	0,28	
$g'_{\text{B}}$	1,09	1,02	1,19	1,49	1,79	1,99	
$\frac{\Omega}{\Delta}$	2,5	3	4	6	10	15	$\Omega = a$ $\Delta = 0,5\delta$
$\frac{a}{\delta}$	1,25	1,5	2	3	5	7,5	
$\frac{\theta''_{\text{B}}}{\Delta}$	2,5	3	4	6	10	15	
$g''_{\text{TB}}$	1,6	1,66	1,75	1,93	2,16	2,33	
$g''_{\text{PTB}}$	0,35	0,34	0,33	0,31	0,29	0,28	
$g''_{\text{B}}$	1,95	2,0	2,08	2,24	2,45	2,61	
$\frac{\Omega}{\Delta}$	2,5	3	4	6	10	15	
$\frac{a}{\delta}$	1,04	1,25	1,67	2,5	4,18	6,25	
$\frac{\theta_a}{\Delta}$	2,08	2,5	3,34	5,0	8,36	12,5	
$g_{\text{ra}}$	1,46	1,5	1,6	1,75	1,98	2,13	
$g_{\text{pra}}$	0,35	0,34	0,33	0,31	0,29	0,28	
$g_a$	1,81	1,84	1,93	2,06	2,27	2,41	
$\frac{a}{\delta}$	2,5	3	4	6	10	15	
$g_a$	2,06	2,14	2,26	2,4	2,63	2,80	
$x(g'_{\text{B}} + 0,5 g''_{\text{B}})$	2,62	2,56	2,84	3,31	3,81	4,21	
$g_{\text{ПР}}$	4,68	4,70	5,10	5,71	6,44	7,01	
$K_{\text{B}}$	1,28	1,15	1,03	0,89	0,77	0,69	
$\frac{\theta'_{\text{B}}}{\delta}$	0,7	0,8	1,2	2,4	4,7	7,7	
$\frac{\theta'_{\text{B}}}{a}$	0,28	0,27	0,3	0,4	0,47	0,51	
$\frac{1}{y} \left( z - \frac{\theta'_{\text{B}}}{a} \right)$	2,48	2,49	2,47	2,4	2,36	2,33	$\frac{\theta_{\text{ra}}}{\Delta} = \frac{a}{0,75a}$ ; $g_{\text{pra}} = 0,98$ ; $l_{\text{C}} = 14,14a$ $\delta' = \frac{100}{a/\delta \cdot 14,14}$
$\frac{1}{x} \left( z - \frac{\theta'_a}{a} \right) (g_{\text{pra}} + 0,1)$	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	
$K_{\text{P}}$	1,69	1,58	1,43	1,28	1,17	1,11	
$K_{\text{Ф}}$	1,97	1,73	1,46	1,17	0,94	0,8	
$\delta' \%$	2,82	2,35	1,77	1,18	0,71	0,47	
$\frac{\delta'}{K_{\text{Ф}}} \%$	1,43	1,36	1,21	1,0	0,75	0,59	



При определении оптимального зазора было использовано выражение (25):

$$\frac{\delta'_{\text{ОПТ}}}{K_{\Phi}} = \frac{K_{\delta}}{K_C} a \omega_0, \quad (25)$$

где  $K_{\delta}$  из выражения (9) равен  $1,6 \cdot 10^{-4}$ .

Многочисленные эксперименты, проведенные автором на II и III — образных сердечниках, показали, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных получается при коэффициенте  $K_{\delta}$  равном  $1,56 \cdot 10^{-4}$ , что дает при  $K_C = 0,9$  (для стали Э-310):

$$\frac{K_{\delta}}{K_C} = 1,4 \cdot 10^{-4} \quad (26)$$

Данные таблицы 3 подтверждают высказанные соображения.

Таблица 3.

Результаты эксперимента			Результаты расчета по выражению								Примечание
			$a \omega_0$ СМ	при $\frac{K_{\delta}}{K_C} = 1,78 \cdot 10^{-4}$			при $\frac{K_{\delta}}{K_C} = 1,4 \cdot 10^{-4}$			по выражению (2)	
$I_0$ а	W	$\delta_{\text{ОПТ}}$ ММ		$\frac{\delta'}{K_{\Phi}}$	$\delta' \%$	$\delta_{\text{ОПТ}}$ ММ	$\frac{\delta'}{K_{\Phi}}$	$\delta' \%$	$\delta'_{\text{ОПТ}}$ ММ	$\delta_{\text{ОПТ}}$ сум. ММ	
1	800	0,9	28,3	0,005	0,37	1,05	0,004	0,3	0,85	1,28	$l_C =$ $= 28,3 \text{ см}$
2	800	2,0	56,6	0,010	1,2	3,4	0,008	0,77	2,2	2,56	
1,6	800	1,5	45,2	0,008	0,77	2,2	0,0064	0,51	1,44	2,05	$K_C = 0,9$
2	1200	5,0	85	—	—	—	0,012	1,72	4,86	3,84	
1,8	1600	8,3	102	—	—	—	0,0142	2,70	7,56	4,6	

### ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая методика позволяет получить удобные для инженерных расчетов зависимости  $K_{\Phi} = f(\delta')$  и  $\frac{\delta'}{K_{\Phi}} = f(\delta')$  при  $x = \text{const}$ .

2. Погрешности при использовании полученных зависимостей не превышают 10% в диапазоне  $0,4 \leq \delta' \leq 3,0$

3. Представляется целесообразным получение указанных зависимостей для нормализованных сердечников ( $z = \text{const}$ ,  $y = \text{const}$ ) при нескольких значениях  $x$ , перекрывающих возможный диапазон изменения этого параметра.

4. Для определения оптимального зазора при стали Э-310 следует использовать выражение (27):

$$\frac{\delta'}{K_{\Phi}} = 1,4 \cdot 10^{-3} a \omega_0 \quad (27)$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бамдас А. М., Савиновский Ю. А., «Дроссели фильтров радиоаппаратуры» изд. «Советское Радио», 1962.
2. Гольдштейн Е. И., «К учету выпучивания поля при расчете трансформаторов и дросселей с воздушными зазорами», Сборник трудов Томского филиала ВНИИЭМ, 1963.
3. Буль Б. К., «Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров для круглых и прямоугольных полюсов». ВЗЭИ 1961.
4. Ступель Ф. А., «Электромеханические реле». Изд. Харьковского университета, 1956.