

### 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  $\delta_{\text{опт}}$  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  $I_0 W \geq 1000 \text{ аэв}$ , 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  $\delta$  с зазором  $\delta_{\Phi}$  фиктивного дросселя, имеющего те же геометрические размеры и проводимость основного зазора  $G_0$ , равную полной проводимости  $G_n$  магнитной системы рассматриваемого дросселя, т. е.

$$k_{\Phi} = \frac{\delta}{\delta_{\Phi}} = \frac{G_n}{G_0} \quad (4)$$

\*) 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  $aw_0$ :

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

$$aw_0 = \frac{I_0 W}{l_c}, \quad (8)$$

где  $l_c$  — длина силовой линии по стали.

Из (6), (7) и (8) получим:

$$\frac{\delta'_{\text{опт}}}{K_\Phi} = 1,6 \cdot 10^{-4} aw_0 \frac{1}{K_c}. \quad (9)$$

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

В [2] дана методика получения зависимости коэффициента выпучивания  $K_v$  от относительного зазора. Аналогично можно получить зависимости для коэффициента рассеяния  $K_p$  и коэффициента фиктивного зазора  $K_\Phi$ , учитывая что:  $K_\Phi = K_v + K_p - 0,5$ . (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 |              |            |               |
|---------------------|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|------------------|--------------|------------|---------------|
| $a$                 | $b$ | $c$ | $h$ | $x$                 | $y$ | $z$ | $\nu'_v$         | $\theta''_v$ | $\theta_a$ | $\theta_{га}$ |
| 20                  | 24  | 30  | 80  | 1,2                 | 1,5 | 4   | 0,5с             | $a'$         | $a$        | $a$           |

Коэффициент выпучивания определяется по выражению (11):

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

0,5 — коэффициент, учитывающий наличие двух зазоров;

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

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

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

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



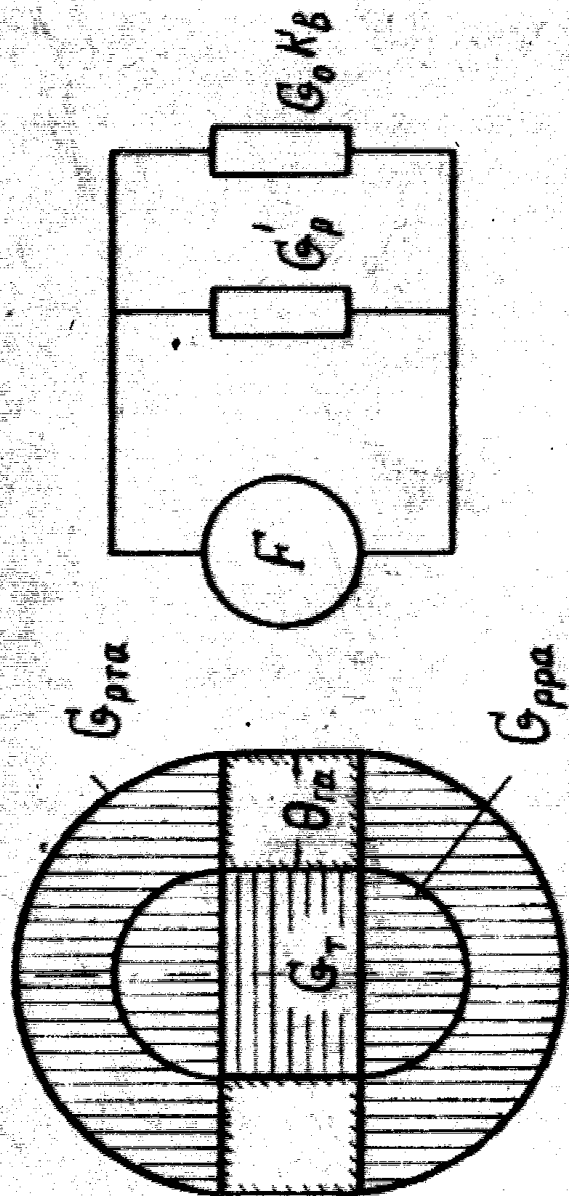


Рис. 2.

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  $G_{\text{р}}$ :

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

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 Кремп 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:

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

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

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

Здесь удельная проводимость, при использовании кривой Кремп и Кольдервуда:

$$g_{\text{рра}} = 0,1. \quad (22)$$

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

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

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]

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

В таблице 2 приведены основные этапы вычислений, необходимых для получения зависимости  $\frac{\partial'}{K_{\text{ф}}} = f(\partial')$ , 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.

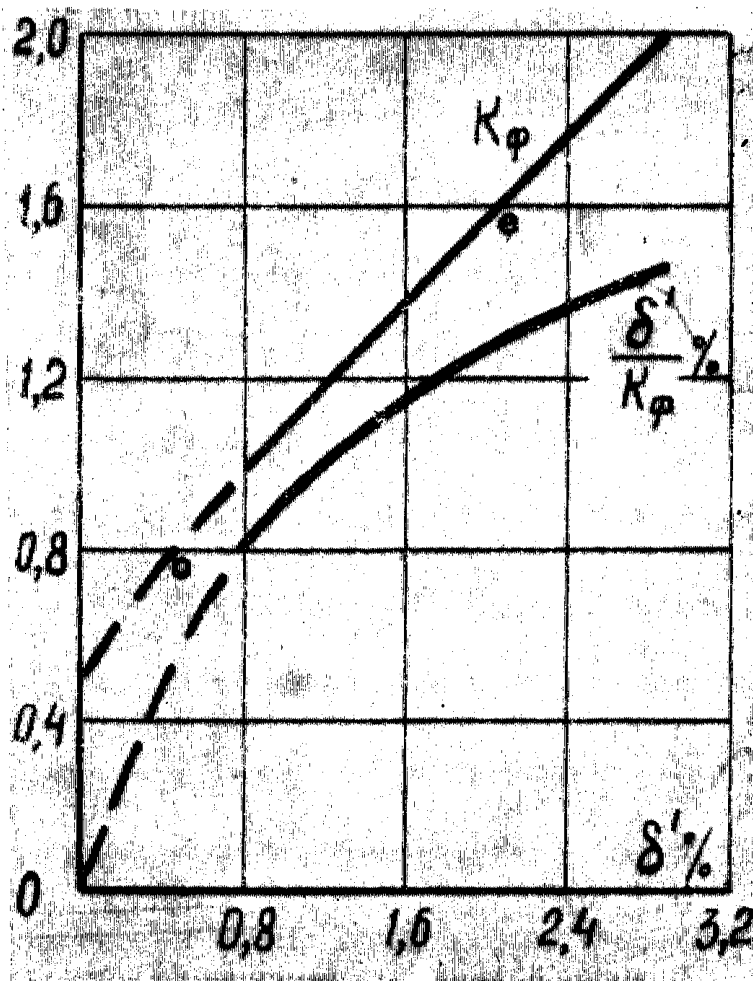


Рис. 3.

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                        |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|-----|------|-----------------------------------|
| $\frac{v'_B}{\Delta}$                      | 1,88 | 2,25 | 3    | 4,5  | 7,5 | 11,3 | $\Delta = \delta$<br>$\Omega = a$ |
| $\frac{\theta'_B}{\Delta}$                 | 0,7  | 0,8  | 1,2  | 2,4  | 4,7 | 7,7  |                                   |
| $g'_{гв}$                                  | 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                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $g'_{\text{рTB}}$                                                                    | 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   | $\Omega = a$<br>$\Delta = 0,5\delta$                                                                                                                             |
| $\frac{a}{\delta}$                                                                   | 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 |                                                                                                                                                                  |
| $g''_{\text{рTB}}$                                                                   | 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   | $\Omega = ax$<br>$\Delta = 0,5\delta$<br>$2x = 2,4$                                                                                                              |
| $\frac{a}{\delta}$                                                                   | 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 |                                                                                                                                                                  |
| $g_{\text{пра}}$                                                                     | 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  | $\frac{\theta'_{\text{ra}}}{\Delta} = \frac{a}{0,75a}$ ;<br>$g_{\text{пра}} = 0,98$ ;<br>$l_{\text{C}} = 14,14a$<br>$\delta' = \frac{100}{a/\delta \cdot 14,14}$ |
| $\frac{\theta'_{\text{B}}}{a}$                                                       | 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 |                                                                                                                                                                  |
| $\frac{1}{x} \left( z - \frac{\theta'_{\text{a}}}{a} \right) (g_{\text{пра}} + 0,1)$ | 2,1  | 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 |                                                                                                                                                                  |
| $K_{\Phi}$                                                                           | 1,97 | 1,73 | 1,46 | 1,17 | 0,94 | 0,8  |                                                                                                                                                                  |
| $\delta'^0_0$                                                                        | 2,82 | 2,35 | 1,77 | 1,18 | 0,71 | 0,47 |                                                                                                                                                                  |
| $\frac{\delta'}{K_{\Phi}} \%$                                                        | 1,43 | 1,36 | 1,21 | 1,0  | 0,75 | 0,59 |                                                                                                                                                                  |

При определении оптимального зазора было использовано выражение (25):

$$\frac{\delta'_{\text{ОПТ}}}{K_{\Phi}} = \frac{K_{\delta}}{K_{\Sigma}} a w_0, \quad (25)$$

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  $K_{\Sigma} = 0,9$  (для стали Э-310):

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

Данные таблицы 3 подтверждают высказанные соображения.

Таблица 3.

| Результаты эксперимента |      |                        | Результаты расчета по выражению |                                                          |              |                        |                                                         |              |                        |                             | Примечание                     |
|-------------------------|------|------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------|------------------------|---------------------------------------------------------|--------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                         |      |                        | $a w_0$                         | при $\frac{K_{\delta}}{K_{\Sigma}} = 1,78 \cdot 10^{-4}$ |              |                        | при $\frac{K_{\delta}}{K_{\Sigma}} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ |              |                        | по выражению (2)            |                                |
|                         |      |                        |                                 | $\frac{\delta'}{K_{\Phi}}$                               | $\delta' \%$ | $\delta'_{\text{ОПТ}}$ | $\frac{\delta'}{K_{\Phi}}$                              | $\delta' \%$ | $\delta'_{\text{ОПТ}}$ | $\delta'_{\text{ОПТ сум.}}$ |                                |
| $I_0$                   | $W$  | $\delta'_{\text{ОПТ}}$ | $\frac{a}{\text{см}}$           |                                                          |              | ММ                     |                                                         |              | ММ                     |                             |                                |
| 1                       | 800  | 0,9                    | 28,3                            | 0,005                                                    | 0,37         | 1,05                   | 0,004                                                   | 0,3          | 0,85                   | 1,28                        | $l_{\Sigma} = 28,3 \text{ см}$ |
| 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                        | $K_{\Sigma} = 0,9$             |
| 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):

$$\frac{\delta'}{K_{\Phi}} = 1,4 \cdot 10^{-3} a w_0 \quad (27)$$

## 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.