

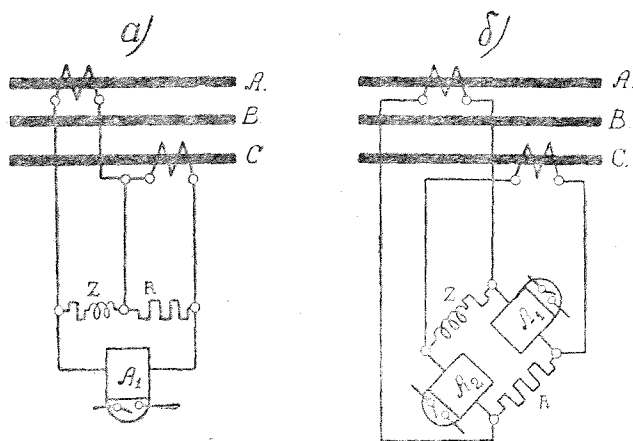
## РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ ТОКОВ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

И. Д. КУТЯВИН и Н. В. ЛИСЕЦКИЙ

За последние годы в технике релейной защиты появилось стремление к переходу от схем защит, реагирующих на полные величины токов, напряжений и мощностей, к схемам, использующим отдельные симметричные составляющие указанных величин. Подобные схемы включают в себя фильтры токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности.

Теория фильтров симметричных составляющих приведена в работах многих авторов. Однако расчет, изготовление отдельных элементов, сборка и настройка фильтров освещены недостаточно. В настоящей работе приводится расчет фильтров токов прямой и обратной последовательности.

Как известно, токовые цепи релейных защит имеют весьма малые сопротивления, и для хорошей настройки фильтров необходимо дополнительное согласование сопротивлений их отдельных элементов с сопротивлениями токовых цепей защиты. Кроме того, индуктивные сопротивления фильтров, при их выполнении в виде дросселей со стальными сердечниками, могут изменять свои величины при коротких замыканиях в сетях



Фиг. 1

из-за насыщения сердечников и этим самым расстраивать фильтры. Если указанные сопротивления изготовлять без стальных сердечников, то они будут чересчур громоздкими и не экономичными. Все эти обстоятельства заставляют более подробно рассмотреть работу указанных фильтров в токовых цепях релейной защиты.

Принципиальные схемы рассматриваемых фильтров приведены на фиг. 1. Схема фиг. 1а представляет собой принципиальную схему фильтра токов прямой последовательности. Для получения схемы фильтра токов обратной последовательности достаточно на указанной фигуре поменять мес-

тами сопротивления  $Z$  и  $R$ . Схема фиг. 1б представляет собой комбинированный фильтр токов положительной и отрицательной последовательностей, В этой схеме реле  $A_1$  обтекается токами прямой последовательности, а реле  $A_2$  — токами обратной.

Как известно, фильтр токов, показанный в схеме фиг. 1а, должен иметь следующее соотношение между добавочными сопротивлениями:

$$Z = (r + jx) = Re^{j60}. \quad (1)$$

То же для схемы фиг. 1б:

$$(Z_p + Z) = (Z_p + R)e^{j60} \quad (2)$$

где  $Z_p$  — сопротивление токовой обмотки реле.

Как видно из выражения (1) и (2), одно из сопротивлений является чисто активным, а второе смешанным, состоящим из активного сопротивления  $r$  и реактивного —  $x$ . Для схемы фиг. 1а  $r = 0,5 R$  и  $x = 0,5 \sqrt{3} R$ . Для схемы фиг. 1б сопротивления  $Z_p$  можно считать чисто активными. Тогда для этой схемы

$$\left. \begin{aligned} r &= (R - Z_p) 0,5, \\ x &= (R + Z_p) 0,5 \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для осуществления фильтра по одной из рассматриваемых схем необходимо изготовить сопротивления  $R$  и  $Z$ . Как показали опыты, для получения хорошей настройки фильтра сопротивление  $R \geq (10 + 15) Z_p$ . Сопротивления  $R$  и  $Z$  рассчитываются на пропуск вторичного тока короткого замыкания и не должны от него зависеть.

Сопротивление  $R$  изготовляется из константановой или реотановой проволоки диаметром 1,5–2 мм в виде спирали. Данный материал принят из-за малой зависимости  $R$  от нагрева элемента.

Индуктивное сопротивление фильтра, с точки зрения его размеров, целесообразно выполнять в виде дросселя с воздушным зазором. Для того, чтобы не нарушалась настройка фильтра при коротких замыканиях, индукцию в стали при этих режимах необходимо допускать не более 8–10 тысяч гауссов. В связи с этим возникает вопрос об определении величины расчетного тока. Если поставить условие, чтобы дроссель не насыщался при всех токах короткого замыкания, то за расчетный ток надо принять действующее значение полного тока короткого замыкания в начальный момент времени. Однако это условие необходимо только для мгновенно действующих защит.

Для максимальных токовых защит, имеющих большую выдержку времени и работающих при установившемся процессе короткого замыкания, расстройка фильтра в начальный период времени не может приводить к отказу в работе защиты, так как кратность тока короткого замыкания в этот период времени велика, поэтому за расчетный ток дросселей фильтров этих защит следует принимать установившийся ток при двухполюсном коротком замыкании.

Ток в дросселях фиг. 1 будет иметь наибольшее значение при двухполюсном коротком замыкании между фазами А и С и для защиты генераторов будет равен

$$i_{pd} = \frac{I_n}{n_T} (1 + 2 I_{* \infty}^{(2)}) \approx 5,7 \frac{I_n}{n_T}, \quad (4)$$

где  $I_n$  — номинальный ток генератора,  
 $n_T$  — коэффициент трансформации трансформаторов тока и  
 $I_{* \infty}^{(2)}$  — относительное значение установившегося тока двухполюсного короткого замыкания.

При определении  $I_{*}^{(2)\infty}$  по кривым затухания расчётный реактанс генератора принят равным

$$x_p = x''_d + x_2 = x''_d. \quad 2,22 = 2,22.0,125 \cong 0,28.$$

Кроме того, при вычислении  $i_{p0}$  предположено, что в период короткого замыкания в первичной цепи защиты сохраняется предшествующий замыканию ток нагрузки. Сделав указанные допущения, можно произвести приближённый расчёт дросселя.

Э.д.с. дросселя при коротком замыкании в первичной цепи

$$E = i_{p0} x = 222. S. B_k. W. 10^{-8}. \quad (5)$$

Число витков дросселя определится из (5):

$$W = \frac{i_{p0} x 10^8}{222 S B_k} = \frac{2,57 I_n x}{S n_T B_k} 10^6, \quad (6)$$

где  $x$  — индуктивное сопротивление дросселя из (3),

$S$  — сечение сердечника дросселя,

$B_k$  — магнитная индукция в стали сердечника.

При определении числа витков дросселя из (6) сечение сердечника  $S$  и магнитную индукцию  $B_k$  следует принимать равными:  $S = 1,5 \div 2 \text{ см}^2$ ,  $B_k = 8 \div 10$  тысяч гаусс.

Величину воздушного зазора можно определить из следующего:

$$A W_k = i_{p0} W \sqrt{2} = 0,8 B_k \tau \frac{S}{S_p}. \quad (7)$$

Тогда длина воздушного зазора из (7):

$$\tau = \frac{i_{p0} W \sqrt{2} S_p}{0,8 B_k S} = 1,77 \frac{i_{p0} W S_p}{B_k S}, \quad (8)$$

где  $S_p$  — расчётное сечение воздушного зазора с учётом выпучивания силовых линий.

Величину  $S_p$  можно определить из следующего выражения <sup>1)</sup>:

$$S_p = S(1 + y)^2, \quad (9)$$

где  $y$  — коэффициент, учитывающий выпучивание силовых линий в воздушном зазоре.

Однако коэффициент  $y$  сам зависит от величины воздушного зазора и размеров сечения сердечника. Так, например, согласно фиг. 147 указанной книги А. Я. Буйлова <sup>1)</sup> для воздушного зазора  $\tau = 0,5 \div 1,5 \text{ см}$ , кривые  $y = f(\tau)$  можно заменить прямыми

$$y = a + b \tau. \quad (10)$$

Тогда расчётное сечение воздушного зазора:

$$S_p = S(1 + a + b \tau)^2. \quad (11)$$

Ориентировочные значения постоянных  $a$  и  $b$  указаны в табл. 1 в зависимости от стороны сечения сердечника  $d$  в сантиметрах (предполагается, что сердечник имеет квадратное сечение)

Таблица 1

| $d_{\text{см}}$ | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  |
|-----------------|------|------|------|------|
| $a$             | 0,27 | 0,25 | 0,21 | 0,18 |
| $b$             | 0,35 | 0,28 | 0,25 | 0,23 |

<sup>1)</sup> См. А. Я. Буйлов „Основы электроаппаратостроения“, 1946 г., стр. 246–250.

Подставив значение  $S_p$  из (11) в (8), получим для воздушного зазора  $\sigma$  следующее выражение:

$$\sigma = \frac{c - 2b(a+1) - \sqrt{c[c - 4b(a+1)]}}{2b^2}, \quad (12)$$

где 
$$c = \frac{B_k}{1,77 i_{p0} W} \cong \frac{n_T B_k}{10 I_n W}. \quad (13)$$

Ввиду того, что при определении  $\sigma$  приходится пользоваться формулой (12), в числителе которой стоит очень малая разность относительно больших величин, возникает необходимость проверки результатов расчёта. Для этого можно воспользоваться известной формулой для индуктивности тороида с длиной средней силовой линии, равной  $\sigma$ :

$$x = \omega L = \omega \frac{4\pi W^2 S_p}{\sigma} 10^{-9} \cong 4 \frac{S_p W^2}{\sigma} 10^{-6} \text{ ом}. \quad (14)$$

Тогда число витков дросселя

$$W \cong 100 \sqrt{\frac{25x\sigma}{S_p}}, \quad (15)$$

где  $x$  — индуктивное сопротивление дросселя.

Пример. Рассчитать сопротивления фильтра  $R$  и  $Z$ , выполненного по схеме фиг. 1а и предназначенного для защиты генератора от сверхтоков. Для защиты предполагается использовать реле типа ЭТ—521,6 с током трогания  $2,5 \text{ а}$ .

Сопротивление обмотки реле при последовательном соединении его катушек для получения диапазона тока трогания  $1,5 \div 3 \text{ а}$

$$Z_p = \frac{0,1}{3^2} = 0,0111 \text{ ом}.$$

Активное сопротивление фильтра

$$R = 15 Z_p = 0,167 \text{ ом}.$$

Активное сопротивление дросселя

$$r = 0,5 R = 0,5 \cdot 0,167 = 0,0835 \text{ ом}.$$

Индуктивное сопротивление дросселя

$$x = 0,5 \sqrt{3} R = 0,5 \sqrt{3} \cdot 0,167 = 0,145 \text{ ом}.$$

Примем следующие размеры сердечника дросселя: сечение —  $S = 2 \text{ см}^2$ , сторона сечения сердечника  $d = 1,40 \text{ см}$ , размеры окна  $2,2 \times 2,2 \text{ см}$  и наружные размеры  $5 \times 5 \text{ см}$  (см. фиг. 2).

Число витков дросселя из (6)

$$W = \frac{2,57 \cdot 5 \cdot 0,145}{2 \cdot 10^4} 10^6 = 93 \text{ виткам}.$$

Постоянная

$$C = \frac{n_T B_k}{10 I_n W} = \frac{10^4}{10 \cdot 7 \cdot 93} = 2,15.$$

Из табл. 1 для  $d = 1,4$  находим  $a = 0,21$  и  $b = 0,25$ . Воздушный зазор дросселя из (12):

$$\sigma = \frac{2,15 - 2 \cdot 0,25(1 + 0,21) - \sqrt{2,15[2,15 - 4 \cdot 0,25(1 + 0,21)]}}{2 \cdot 0,25^2} = 1 \text{ см}.$$

Для проверки полученных  $W$  и  $\sigma$  из (11) находим расчётные сечения сердечника:

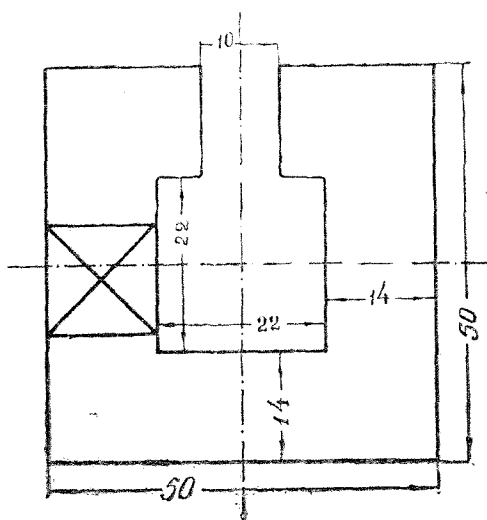
$$S_p = 2(1 + 0,21 + 0,25,1)^2 = 4,28.$$

Тогда число витков дросселя из (15):

$$W = \sqrt{\frac{25,0,145,1}{4,28}} = 92.$$

Принимаем  $W = 92$  виткам.

Активные сопротивления фильтра  $R$  можно изготовить из константана диаметром  $d = 1,8$  мм и длиной 0,915 м.



Фиг. 2

Обмотку дросселя можно выполнить проводом ПЭШО диаметром  $d = 1,8$  мм. Диаметр провода с изоляцией  $d_{из} = 1,92$  мм. Число витков в слое 10, число слоёв 9,2. Длина среднего витка 13 см. Полная длина провода 12,1 м. Активное сопротивление дросселя  $r = 0,085$  ома, что можно считать допустимым.