



ронах треугольника и звезды, отнесенные к напряжению той обмотки, на которой происходит короткое замыкание;  $U_Y$  и  $U_{\Delta}$  — номинальные междуфазные напряжения обмоток, соединенных в звезду и треугольник;

$I_{Y_{\max}}^{(2)}$ ,  $I_{Y_{\min}}^{(2)}$  и  $I_{\Delta_{\max}}^{(2)}$ ,  $I_{\Delta_{\min}}^{(2)}$  — максимальные и минимальные величины токов в фазах со стороны звезды и треугольника.

Ток при двухфазном к. з. за трансформатором может быть определен в соответствии с выражением (2) как

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}.$$

#### 10. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1000 в

Особенностью расчета токов к. з. в сетях напряжением ниже 1000 в является необходимость учета сопротивлений шин, трансформаторов тока, рубильников, автоматов и прочей аппаратуры. Вызвано это тем, что суммарные величины сопротивлений цепи короткого замыкания в таких сетях очень малы и соизмеримы с сопротивлениями аппаратуры. Если не учитывать сопротивления аппаратуры, то токи могут быть сильно преувеличены. Необходимо также учитывать активные сопротивления трансформаторов, питающих место к. з. Сопротивления системы до вводов трансформатора обычно можно не учитывать, т. е. считать, что трансформатор питается от системы бесконечной мощности.

**Пример 11.** Схема сети 0,4 кв трансформатора 560 квз из примера 10 дана на рис. 12. Определить ток трехфазного короткого замыкания в конце кабельной линии  $K_A$  и в конце воздушной линии  $K_B$ .

Трансформатор соединен с шинами 0,4 кв алюминиевыми шинами сечением  $50 \times 5$  мм, расположенными в одной плоскости, с расстоянием между шинами 240 мм. Общая длина шин от трансформатора до автоматов отходящей линии 15 м.

На стороне 0,4 кв трансформатора установлен рубильник на 1000 а, на отходящих линиях — автоматы на номинальный ток 200 а и трансформаторы тока ТКФ-3 с коэффициентом трансформации 200/5.

Кабельная линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами  $3 \times 70$  мм<sup>2</sup>; длина ее 200 м. Воздушная линия длиной 200 м выполнена проводом А-70; нулевой провод А-35. Выход со щита 0,4 кв выполнен алюминиевым кабелем сечением  $3 \times 70 + 1 \times 35$  мм<sup>2</sup> и длиной 20 м.

**Решение.** Среднее геометрическое расстояние между шинами  $D_{ср} = 1,26 \cdot 240 = 300$  мм. По приложению П-22 активное сопротивление

ление 1 м шири 50 × 5 мм равно 0,142 мом/м; индуктивное при  $D_{ср}=300$  мм равно 0,2 мом/м. Сопротивления всей ошиновки равны:  $r_m=0,142 \cdot 15=2,12$  мом и  $x_m=0,2 \cdot 15=3,0$  мом.  
Сопротивление контактов рубильника на 1000 а по приложению П-24 равно  $r_p=0,08$  мом.

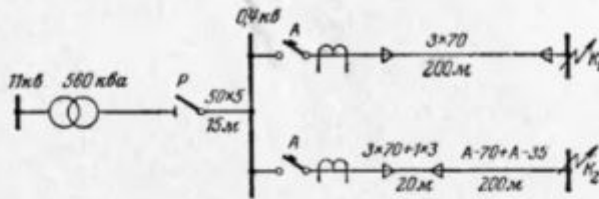


Рис. 12. Схема к примеру 11.

Сопротивления обмоток распределителей и контактов автоматов на 200 а по приложению П-24 равны:

$$x_a=0,28 \text{ мом}; r_a=0,36+0,6=0,96 \text{ мом.}$$

Сопротивления трансформаторов тока по приложению П-23 равны:  $r_{тт}=0,19$  мом,  $x_{тт}=0,17$  мом.

Сопротивления трансформатора 560 кВа, отнесенные к 0,4 кВ, по приложению П-25 равны:  $r_t=4,79$  мом;  $x_t=15,0$  мом.

Сопротивления кабеля 3 × 70 мм<sup>2</sup> по приложениям П-9 и П-10 равны:  $r=0,443$  ом/км;  $x=0,08$  ом/км (индуктивное сопротивление кабеля до 1000 в мало отличается от индуктивного сопротивления кабеля 6 кв). Сопротивления всего кабеля равны:  $r_k=0,443 \cdot 0,2=0,0886$  ом=88,6 мом;  $x_k=0,08 \cdot 0,2=0,016$  ом=16 мом.

Суммарное сопротивление до места короткого замыкания  $K_1$  равно:

$$r_{\Sigma} = r_t + r_m + r_p + r_a + r_{тт} + r_k = \\ = 4,79 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 88,6 = 96,74 \text{ мом;}$$

$$x_{\Sigma} = x_t + x_m + x_a + x_{тт} + x_k = \\ = 15 + 3 + 0,28 + 0,17 + 16 = 34,45 \text{ мом.}$$

Ток

$$I^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{96,74^2 + 34,45^2}} = 2250 \text{ а.}$$

Для воздушной линии активное сопротивление по приложению П-2 равно 0,46 ом/км; индуктивное сопротивление можно определить, как указано выше, по чертежам опор.

Принимаем  $x \approx 0,3$  ом/км.

Сопротивления всей линии равны:  $r_{л} = 0,46 \cdot 0,2 = 92$  мом;  $x_{л} = 0,3 \cdot 0,2 = 60$  мом. Сопротивления кабеля равны:  $r_k = 0,443 \cdot 0,02 = 8,86$  мом;  $x_k = 0,08 \cdot 0,02 = 1,6$  мом. Остальные сопротивления такие



же, как и для кабельной линии. Ток при коротком замыкании в точке  $K_2$  равен:

$$I^{(2)} = \frac{400 \times 1000}{\sqrt{3} \sqrt{(4,79 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 8,86 + 92)^2 + (15 + 3 + 0,28 + 0,17 + 1,6 + 60)^2}} = 1800 \text{ а.}$$

Поскольку сети напряжением 0,4 кВ работают с заземленной нейтралью, в них, кроме междуфазных, могут возникать также однофазные к. з. на землю.

Для вычисления тока однофазного короткого замыкания в сетях 0,4 кВ с заземленной нейтралью согласно [Л. 6, 7] рекомендуется пользоваться приближенным выражением

$$I^{(1)} = \frac{U_\phi}{z_n + \frac{1}{3} z_r^{(1)}}, \quad (37)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение сети, равное  $\frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,23 \text{ кВ}$ ;

$z_n$  — сопротивление короткозамкнутой петли проводов фаза—нуль;

$$z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2};$$

активное сопротивление  $r_n$  берется по справочным таблицам; индуктивное  $x_n$  можно определить по формулам на основании чертежей опор; рекомендуется принимать [Л. 6, 7] удельное сопротивление  $x_n = 0,6 \text{ ом/км}$  для петли проводов из цветных металлов любого сечения;

$\frac{1}{3} z_r^{(1)}$  — треть полного сопротивления трехфазного трех-  
стержневого трансформатора с обмотками, соединенными по схеме  $Y/Y_0$ , при однофазном коротком замыкании на стороне низшего напряжения.

Эта величина определяется на основании данных приложения П-21.

Величины  $\frac{1}{3} z_r^{(1)}$ , приведенные в приложении П-21,

относятся только к трансформаторам, выполненным по ГОСТ 401-41, в основном к трансформаторам старой серии ТМ. Пользоваться этими данными для трансформаторов других типов нельзя.



Следует особо отметить, что пользоваться вместо величины  $\frac{1}{3} z_{\tau}^{(1)}$  величиной  $z_{\tau}$ , определенной по выражению (10), недопустимо.

**Пример 12.** Определить ток однофазного короткого замыкания в конце воздушной линии примера 11 (точка  $K_2$  на рис. 12).

**Решение.** Сопротивление трансформатора 560 кВа  $z_{\tau}^{(1)}/3$  по приложению П-21 равно 0,052 ом.

Активное сопротивление петли фаза — нуль длиной 200 м, состоящей из 200 м провода А-70 и 200 м провода А-35, равно по приложению П-2  $r_{\pi} = 0,46 \cdot 0,2 + 0,92 \cdot 0,2 = 0,276$  ом. Индуктивное сопротивление петли  $x_{\pi} = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$  ом.

Полное сопротивление проводов

$$z_{\pi} = \sqrt{0,276^2 + 0,12^2} = 0,3 \text{ ом.}$$

$$I^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3(0,3 + 0,052)}} = 655 \text{ а.}$$

Если линии выполнены стальными проводами, то сопротивление стальных проводов в расчете принимается для тока, равного трехкратному номинальному току плавкой вставки предохранителя или трехкратному номинальному току расцепителя автомата, имеющего обратную зависимость от тока характеристику. Если же автомат имеет только электромагнитный мгновенный расцепитель, то сопротивление стальных проводов определяется для тока, равного 1,4 тока срабатывания автомата до 100 а и 1,25 для других автоматов. Так поступают, если неизвестен разброс автоматов по току срабатывания. Если же разброс известен, то сопротивления стальных проводов принимаются для тока, равного току срабатывания автомата, умноженному на 1,1 и на коэффициент, учитывающий разброс автомата.

**Пример 13.** Автомат дает разброс по току срабатывания  $\pm 30\%$ . Для какого тока следует определить сопротивления стальных проводов?

**Решение.** Сопротивления стальных проводов следует определять для тока, равного току срабатывания автомата, умноженному на 1,1, т. е.  $1,3 \cdot 1,1 = 1,43$ .

**Пример 14.** Определить ток однофазного короткого замыкания в конце линии длиной 200 м, выполненной проводом ПС-50 в фазе и ПС-25 в нуле.

Линия защищена предохранителем с плавкой вставкой на 30 а и питается от трансформатора мощностью 50 кВа.

**Решение.** По приложению П-21  $z_{\tau}^{(1)}/3 = 0,51$  ом. Внешнее индуктивное сопротивление петли фаза — нуль по [Л. 6, 7] принимается 0,6 ом/км.



Активное сопротивление проводов для тока 3·30=90 а по приложению П-11 равно для ПС-50 3,7 ом/км и для ПС-25 6,4 ом/км. Внутреннее индуктивное сопротивление по приложению П-12 для ПС-50 равно 1,15 ом/км и для ПС-25 1,72 ом/км. Сопротивление предохранителя в расчете не учитывается, так как оно мало:

$$x_n = \sqrt{(3,7 \cdot 0,2 + 6,4 \cdot 0,2)^2 + (0,6 \cdot 0,2 + 1,15 \cdot 0,2 + 1,72 \cdot 0,2)^2} = 2,12 \text{ ом};$$

$$I^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3}(2,12 + 0,51)} = 88 \text{ а.}$$

Требования ПУЭ в этом случае не выполняются, так как  $I^{(3)}$  меньше утробного номинального тока плавкой вставки предохранителя (90 а).

Необходимо отметить, что в выражении (37) полные сопротивления проводов и трансформатора складываются арифметически, а не геометрически; это несколько преувеличивает суммарное сопротивление и уменьшает ток короткого замыкания, что идет в запас надежности работы защиты. С учетом этого можно считать, что в примере 14 требования ПУЭ выполнены.

**Пример 15.** Определить ток короткого замыкания в примере 14, если линия защищена автоматом с мгновенным электромагнитным расцепителем, имеющим ток срабатывания 30 а.

**Решение.** Согласно ПУЭ сопротивления стальных проводов следует определять для тока, равного 1,4 тока срабатывания автомата, или 1,4·30=42 а. По приложению П-11 активное сопротивление стальных проводов для тока 42 а 3,45 ом/км для ПС-50 и 7 ом/км для ПС-25. Внутреннее индуктивное сопротивление по приложению П-12 равно 0,89 ом/км для ПС-50 и 2,1 ом/км для ПС-25.

$$I^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(3,45 \cdot 0,2 + 7 \cdot 0,2)^2 + (0,6 \cdot 0,2 + 0,89 \cdot 0,2 + 2,1 \cdot 0,2)^2 + 0,51}} = 84 \text{ а.}$$

Требования ПУЭ выполнены: ток  $I^{(3)}$  больше 1,4 тока срабатывания автомата (42 а).

Следует отметить, что в данном случае определяется ток короткого замыкания между фазой и заземленным нулем, а не между фазой и землей. Разница заключается в том, что ток в этом случае проходит только по проводам фазы и нуля. Если же фазный провод коснется земли, а не нулевого провода, то ток к. з. будет проходить от фазы по земле, через повторные заземления нулевого провода, заземление нуля у самого трансформатора.

матора и по нулевому проводу. В цепи короткого замыкания появятся дополнительные сопротивления самой земли и переходные сопротивления заземлителей, а сопротивление линии увеличится. Расчет в этом случае сложен и не рассматривается.

### II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ К. З. ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ, СОЕДИНЕННЫМ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА — ЗВЕЗДА С ЗАЗЕМЛЕННЫМ НУЛЕМ

Рассматривая поведение релейной защиты при однофазных к. з. за трансформатором  $Y/Y_0$ , следует учитывать, что токи на стороне высшего напряжения будут



Рис. 13. Однополюсное короткое замыкание за трансформатором, соединенным по схеме  $Y/Y_0$ .  
а — распределение токов;  
б — векторная диаграмма токов.

проходить во всех трех фазах (рис. 13). Величины токов равны:

$$I_{Y_{\max}}^{(1)} = \frac{2}{3} I_{Y_0}^{(1)} \frac{U_{Y_0}}{U_Y}, \quad (38)$$

$$I_{Y_{\min}}^{(1)} = \frac{1}{3} I_{Y_0}^{(1)} \frac{U_{Y_0}}{U_Y}, \quad (39)$$

где  $I_{Y_0}^{(1)}$  — полный ток короткого замыкания фаза—нуль на стороне 0,4 кВ;

$I_{Y_{\max}}^{(1)}$  и  $I_{Y_{\min}}^{(1)}$  — соответственно максимальный и минимальный токи со стороны питания;

$U_{Y_0}$  и  $U_Y$  — номинальные междуфазные напряжения трансформатора,