

**ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ
ОТ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ
ЗАМЫКАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА**

**Часть 2. Расчет дифференциального трансформатора тока
с двумя отдельными вторичными обмотками**

Н. А. ДУЛЬЗОН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

Схема замещения для этого варианта показана на рис. 3.

При равенстве первичных токов $I_1 = I_2$, что соответствует сквозному току в генераторе, токи в реле определяются из выражений (5) и (6). Соответствующие намагничивающие токи могут быть определены из (4).

Согласно «Руководящим указаниям по релейной защите» ток срабатывания реле максимальной защиты, приведенный к первичной стороне, должен быть

$$I_{ср1} = \frac{K_n}{K_B} I_n, \quad (18)$$

где K_n — коэффициент надежности, принимаемый равным $1,1 \div 1,2$;

K_B — коэффициент возврата реле;

I_n — номинальный ток защищаемого генератора.

По условию отстройки от внешних коротких замыканий ток срабатывания реле защиты от внутренних повреждений нужно принять с определенным запасом, больше тока в нем при внешнем коротком замыкании.

$$I_{ср2} = K_3 I_{кз} \quad (19)$$

где K_3 — коэффициент запаса;

$I_{кз}$ — максимальный ток в генераторе при внешнем коротком замыкании

С учетом выражений (18) и (19), формулы (5) и (6) примут вид

$$i_{ср1} = \frac{K_n I_n \dot{Y}_3 (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})}{K_B \Delta}; \quad (20)$$

$$i_{ср2} = \frac{K_3 I_{кз} \dot{Y}_4 (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})}{\Delta}. \quad (21)$$

Токи в реле при внутреннем коротком замыкании определяются по формулам (7) и (8), а намагничивающие токи половин сердечника —

по формулам (9). Если задаться током срабатывания защиты от внутренних замыканий I_{c3} , а ток срабатывания защиты от сквозных токов при внутреннем повреждении принять как долю α от тока I_{c3} , то токи срабатывания реле этих защит будут

$$i_{cp1} = \frac{\alpha I_{c3} \dot{Y}_3 \left[\left(\frac{\dot{Y}_{ош}}{\dot{Y}_{ос2}} + 1 \right) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{ош} \right]}{\Delta}; \quad (22)$$

$$i_{cp2} = \frac{I_{c3} \dot{Y}_4 \left[\frac{\dot{Y}_{ош}}{\dot{Y}_{ос1}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) + \dot{Y}_{ош} \right]}{\Delta}. \quad (23)$$

Соответствующие намагничивающие токи при срабатывании защиты от внутренних повреждений

$$i_{01} = \frac{I_{c3} Y_{01} \left[\left(\frac{\dot{Y}_{ош}}{\dot{Y}_{ос2}} + 1 \right) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{ош} \right]}{\Delta}; \quad (24)$$

$$i_{02} = \frac{I_{c3} Y_{02} \left[\frac{\dot{Y}_{ош}}{\dot{Y}_{ос1}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) + \dot{Y}_{ош} \right]}{\Delta}. \quad (25)$$

Совместное решение уравнений (20—25) затруднено ввиду нелинейности проводимостей \dot{Y}_{01} и \dot{Y}_{02} . Для упрощения задачи примем $\dot{Y}_{01} = \dot{Y}_{02} = \dot{Y}_{ос}$, что соответствует линейризации кривой намагничивания материала сердечника ДТТ. Кроме того, учитывая, что при внутреннем коротком замыкании магнитный поток замыкается в основном по стали, примем для выражений (22—25) $Y_{ош} = \infty$ и $Y_{ос} = \infty$; при внешнем коротком замыкании в формулах (20, 21) примем $\dot{Y}_{ос1} = \dot{Y}_{ос2} = \dot{Y}_{ос}$. С учетом этих допущений получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} i_{cp1} &= \frac{K_H I_H \dot{Y}_3 (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{ос})}{\Delta K_B}; \\ i_{cp2} &= \frac{K_3 I_{K3} \dot{Y}_4 (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{ос})}{\Delta}; \\ i_{cp1} &= \frac{\alpha I_{c3} \dot{Y}_3}{2\dot{Y}_{ос} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4}; \\ i_{cp2} &= \frac{I_{c3} \dot{Y}_4}{2\dot{Y}_{ос} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4}; \\ I_{01} = I_{02} = I_{ос} &= \frac{I_{c3} \cdot \dot{Y}_{ос}}{2\dot{Y}_{ос} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4}, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где

$$\Delta = \left(\frac{2\dot{Y}_{ош}}{\dot{Y}_{ос}} + 1 \right) (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{ос}) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{ос}) + \dot{Y}_{ош} (2\dot{Y}_{ос} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4).$$

Выражение комплексных величин, входящих в эту систему уравнений, через модули дает

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ср1}} &= \frac{K_{\text{н}} I_{\text{н}} Y_3 (Y_4 + Y_{\text{ос}})}{K_{\text{в}} |\Delta|}; \\ I_{\text{ср2}} &= \frac{K_3 I_{\text{кз}} Y_4 (Y_3 + Y_{\text{ос}})}{|\Delta|}; \\ I_{\text{ср1}} &= \frac{\alpha I_{\text{сз}} Y_3}{2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4}; \\ I_{\text{ср2}} &= \frac{I_{\text{сз}} Y_4}{2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4}; \\ I_{\text{ос}} &= \frac{I_{\text{сз}} Y_{\text{ос}}}{2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4}, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где

$$|\Delta| = \sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}} \right)^2 (Y_3 + Y_{\text{ос}})^2 (Y_4 + Y_{\text{ос}})^2 + Y_{\text{ош}}^2 (2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4)^2 + \frac{2(2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}})}{Y_{\text{ос}}} (Y_3 + Y_{\text{ос}}) (Y_4 + Y_{\text{ос}}) (2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4) Y_{\text{ош}} \cdot \sin \varphi}.$$

При выводе последних формул было принято, что фазные углы вторичных цепей примерно равны друг другу

$$\varphi_3 \cong \varphi_4 = \varphi$$

и что сумма фазного угла вторичной цепи и угла потерь в стали близка к 90° , то есть

$$\sin(\gamma_c + \varphi) = 1.$$

Таким образом, нами получена система уравнений, в которую входят искомые величины ω_3 , ω_4 , a и δ в следующем виде:

$$Y_{\text{ос}} = \frac{a \omega_c l_c \sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega B_c ab}; \quad (28)$$

$$Y_3 = \frac{\omega_3^2}{Z_3}; \quad (29)$$

$$Y_4 = \frac{\omega_4^2}{Z_4}; \quad (30)$$

$$Y_{\text{ош}} = f(\delta), \quad (31)$$

где Z_3 и Z_4 — действительные сопротивления вторичных цепей.

Дополнительно для токов срабатывания реле, приведенных к первичной стороне, имеем

$$I_{\text{ср1}} = I'_{\text{ср1}} \omega_3; \quad (32)$$

$$I_{\text{ср2}} = I'_{\text{ср2}} \omega_4, \quad (33)$$

где $I'_{\text{ср1}}$, $I'_{\text{ср2}}$ — соответственно действительные токи срабатывания реле защиты от внешних и внутренних повреждений.

Отметим, что при заданном действительном токе срабатывания реле защиты от внутренних повреждений $I'_{\text{ср2}}$ ток срабатывания реле

защиты от сквозных токов I'_{cp1} не может быть задан произвольно и подлежит определению.

Решим систему уравнений (27). Воспользовавшись первым уравнением в этой системе, исключим величину $|\Delta|$ (а следовательно, и неизвестную δ) из остальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_{cp2}}{I_{cp1}} &= \frac{AY_4(Y_3 + Y_{oc})}{Y_3(Y_4 + Y_{oc})}; \\ I_{cp1} &= \frac{\alpha I_{c3} Y_3}{2Y_{oc} + Y_3 + Y_4}; \\ I_{cp2} &= \frac{I_{c3} Y_4}{2Y_{oc} + Y_3 + Y_4}; \\ I_{oc} &= \frac{I_{c3} Y_{oc}}{2Y_{oc} + Y_3 + Y_4}, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где
$$A = \frac{K_3 K_B I_{K3}}{K_H I_H}.$$

Решение системы уравнений (34) дает

$$w_4 = \frac{\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc}}{I'_{cp2}}; \quad (35)$$

$$a = \frac{P_2 \sqrt{2} \cdot 10^8}{B_c \omega b \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}; \quad (36)$$

$$w_3 = \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right) \sqrt{\frac{Z_3 \left(\frac{1}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}{P_2 \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}}; \quad (37)$$

$$I'_{cp1} = \alpha \sqrt{\frac{P_2 \left(\frac{1}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}{Z_3 \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}}. \quad (38)$$

В формулах (35—36) через P_2 обозначена мощность во вторичной цепи защиты от внутренних повреждений при ее срабатывании, то есть

$$P_2 = (I'_{cp2})^2 Z_4. \quad (39)$$

Из первого уравнения системы (27) найдем

$$Y_{ош} = \frac{Y}{\frac{4Y^2}{Y_{os}^2} + \frac{4Y \sin \varphi}{Y_{os}} + 1} \times \left\{ \sqrt{\left[\frac{K_3 I_{K3} (\alpha A + 1)}{I_{c3} \alpha A} \right]^2 \left[\frac{4Y^2}{Y_{os}^2} + \frac{4Y \sin \varphi}{Y_{os}} + 1 \right] - \cos^2 \varphi - \left(\frac{2Y}{Y_{os}} + \sin \varphi \right)} \right\}, \quad (40)$$

где

$$Y = \frac{I_{c3} \alpha A \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}{P_2 (\alpha A + 1)^2}.$$

Для расчета по этой формуле требуется знание проводимости рассеяния Y_{os} , которая сложным образом зависит от различных факторов. Аналитическое определение этой проводимости затруднено и поэтому наиболее целесообразно определять ее экспериментально. Последнее возможно, так как основные параметры ДТТ могут быть определены вне зависимости от величины Y_{os} по формулам (35--38) и, следовательно, может быть изготовлен макет ДТТ. Однако в большинстве случаев в этом нет нужды, так как магнитное сопротивление путей рассеяния обычно велико и, как показывают практические расчеты, погрешность расчета не велика, если принять $Y_{os} = \infty$. При этом допущении формула (40) будет

$$Y_{ош} = Y \left\{ \sqrt{\left[\frac{K_3 / K_3 (\alpha A + 1)}{I_{c3} \alpha A} \right]^2 - \cos^2 \varphi} - \sin \varphi \right\}. \quad (41)$$

По известной проводимости $Y_{ош}$ (пропорциональной магнитному сопротивлению промежутка, заключенного между первичными токопроводами ДТТ) представляется возможным найти необходимый воздушный зазор у среднего стержня ДТТ.

Расчеты показывают, что для мощных генераторов требуемая величина зазора оказывается больше ширины окна ДТТ. В этом случае средний стержень не выполняется и на крайние стержни магнитопровода наматываются две одинаковые дополнительные обмотки, которые замыкаются последовательно так, чтобы при нормальном режиме генератора э. д. с. в них складывались, а при внутренних коротких замыканиях — вычитались.

Принципиальная схема ДТТ с короткозамкнутой обмоткой приведена на рис. 1, а. На рис. 1, б представлена схема замещения этого ДТТ, полученная по методике, изложенной в [4]. В этой схеме Z_K — комплексное сопротивление цепи короткозамкнутой обмотки. Если принять те же

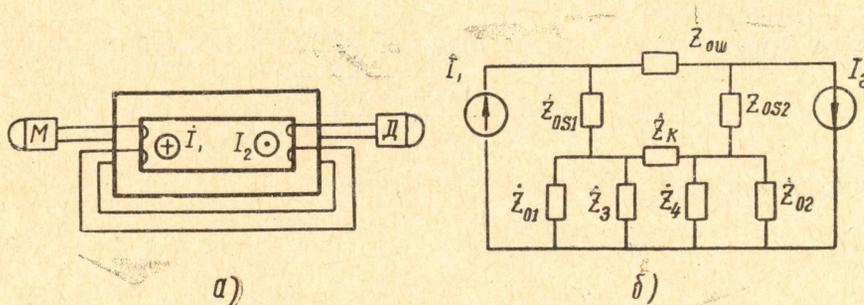


Рис. 1.

допущения, что и в предыдущем случае, и дополнительно пренебречь реактивными сопротивлениями вторичных цепей и короткозамкнутой обмотки (что допустимо, так как для защиты мощных генераторов приходится использовать грубое реле с малым индуктивным сопротивлением), то модули токов во вторичных цепях соответствующих режимам

будут описываться такими же уравнениями, как в системе (27), с той разницей, что знаменатель первых двух уравнений системы будет

$$|\Delta'| = \sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}}\right)^2 [(Y_3 + Y_{\text{ос}})(Y_4 + Y_{\text{ос}}) + Y_{\text{к}}(2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4)]^2 + Y_{\text{ош}}^2 (2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4)^2}. \quad (42)$$

Модуль тока в короткозамкнутой обмотке при сквозном токе в генераторе I_1

$$I_{\text{к}} = \frac{I_1 Y_{\text{к}} (2Y_{\text{ос}} + Y_3 + Y_4)}{|\Delta'|} = \frac{I_1 Y_{\text{к}}}{\sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}}\right)^2 (Y + Y_{\text{к}})^2 + Y_{\text{ош}}^2}}. \quad (43)$$

В уравнениях (42) и (43).

$Y_{\text{к}}$ — проводимость короткозамкнутой обмотки.

Из первого уравнения системы (27) с учетом (42) найдем необходимую величину проводимости короткозамкнутой обмотки при заданной проводимости $Y_{\text{ош}}$ (соответствующей отсутствию среднего стержня магнитопровода ДТТ)

$$Y_{\text{к}} = Y \left\{ \frac{Y_{\text{ос}}}{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}} \sqrt{\left[\frac{K_3 I_{\text{кз}} (\alpha A + 1)}{I_{\text{сз}} \alpha A} \right]^2 - \left(\frac{Y_{\text{ош}}}{Y} \right)^2 - 1} \right\}, \quad (44)$$

где значение Y то же, что и в формуле (40).

С другой стороны, проводимость короткозамкнутой обмотки равна

$$Y_{\text{к}} = \frac{\omega_{\text{к}}^2}{\sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}}, \quad (45)$$

где $r_{\text{к}}$, $x_{\text{к}}$ и $\omega_{\text{к}}$ — соответственно активное сопротивление, реактивное сопротивление рассеяния и число витков короткозамкнутой обмотки.

Если обозначить через $L_{\text{к}}$ индуктивность рассеяния одного витка, через $l_{\text{к}}$ среднюю длину витка и через $q_{\text{к}}$ сечение провода короткозамкнутой обмотки, тогда

$$r_{\text{к}} = 2\rho \frac{l_{\text{к}} \omega_{\text{к}}}{q_{\text{к}}}; \quad x_{\text{к}} = 2\omega L_{\text{к}} \omega_{\text{к}},$$

где ρ — удельное сопротивление;

ω — угловая частота.

С учетом этих величин из выражения (41) можно найти число витков

$$\omega_{\text{к}} = \frac{2Y_{\text{к}} \sqrt{\rho^2 l_{\text{к}}^2 + \omega^2 L_{\text{к}}^2 q_{\text{к}}^2}}{q_{\text{к}}}. \quad (46)$$

Если индуктивностью $L_{\text{к}}$ пренебречь, то

$$\omega_{\text{к}} = \frac{2Y_{\text{к}} \rho l_{\text{к}}}{q_{\text{к}}}. \quad (47)$$

По этому выражению можно определить необходимое число витков короткозамкнутой обмотки, задавшись ее сечением. Определим плотность тока в короткозамкнутой обмотке. Ток в этой обмотке, приведенный к первичной стороне, определяется формулой (43). Соответственно плотность тока

$$j_{\text{к}} = \frac{I_{\text{к}}}{q_{\text{к}} \omega_{\text{к}}} = \frac{I_1 Y_{\text{к}}}{q_{\text{к}} \omega_{\text{к}} \sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}}\right)^2 (Y + Y_{\text{к}})^2 + Y_{\text{ош}}^2}} \quad (48)$$

Замена величины Y_k в числителе этого выражения через (47) дает

$$j_k = \frac{I_1}{2\rho l_k \sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}}\right)^2 (Y + Y_k)^2 + Y_{\text{ош}}^2}}. \quad (48a)$$

Как видим, плотность тока в короткозамкнутой обмотке, при заданном значении Y_k , не зависит от принятого сечения провода.

Если плотность тока, полученная по формуле (48), окажется в допустимых пределах, то расчет можно считать законченным. В противном случае оказывается необходимым снизить плотность тока до допустимой величины $j_{\text{доп}}$. Как видно из (48), последнее может быть достигнуто только за счет увеличения Y_k . Попытка уменьшить плотность тока за счет увеличения удельного сопротивления короткозамкнутой обмотки не приводит к желаемому результату, так как при этом одновременно пропорционально уменьшается допустимая плотность тока.

Пользуясь выражением (48), найдем необходимую величину проводимости короткозамкнутой обмотки, исходя из допустимой плотности тока

$$Y_{k\text{доп}} = \frac{Y_{\text{ос}}}{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}} \sqrt{\left(\frac{I_1}{2\rho l_k j_{\text{доп}}}\right)^2 - Y_{\text{ош}}^2 - Y}. \quad (49)$$

Увеличение проводимости Y_k до значения $Y_{k\text{доп}}$ связано с повышением коэффициента запаса K_3 , новое значение которого может быть найдено из (44). Разумеется, что новое значение K_3 требует уточнения всех данных ДТТ по формулам (35—41). Отметим, что этим способом не всегда может быть найдено приемлемое решение, так как увеличение коэффициента запаса связано с необходимостью повышения чувствительности реле максимальной защиты, а чувствительность изготавливаемых промышленностью реле ограничена.

Другой путь снижения плотности тока в короткозамкнутой обмотке состоит во введении в эту цепь добавочного сопротивления R_d .

При рассмотрении этого вопроса пренебрежем индуктивным сопротивлением короткозамкнутой обмотки и добавочного сопротивления. Проводимость короткозамкнутой цепи равна

$$Y_k = \frac{\omega_k^2}{R_k}, \quad (50)$$

где R_k — сопротивление цепи короткозамкнутой обмотки;

$$R_k = 2\rho \frac{l_k \omega_k}{q_k} + R_d.$$

Из (50) находим, что

$$\omega_k q_k = Y_k \left\{ \sqrt{\frac{R_d q_k^2}{Y_k} + \rho^2 l_k^2} + \rho l_k \right\}. \quad (51)$$

Потребовав, чтобы при первичном токе ДТТ, равном номинальному току генератора ($I_1 = I_n$), в короткозамкнутой обмотке обеспечивалась допустимая плотность тока $j_{\text{доп}}$, найдем из (48)

$$\omega_k q_k = \frac{I_n Y_k}{j_{\text{доп}} \sqrt{\left(\frac{2Y_{\text{ош}} + Y_{\text{ос}}}{Y_{\text{ос}}}\right)^2 (Y + Y_k)^2 + Y_{\text{ош}}^2}}. \quad (52)$$

Приравняем правые части уравнений (51) и (52) и найдем соотношение между добавочным сопротивлением и сечением короткозамкнутой обмотки в виде

$$R_d = \frac{P_{дс}}{j_{доп}^2 q_k^2}. \quad (53)$$

Таким образом, если задаться удельным сопротивлением материала короткозамкнутой обмотки ρ , конструктивно определить среднюю длину витка этой обмотки l_k и принять ее сечение q_k , то, пользуясь формулами (51) и (53), можно найти число витков w_k и величину добавочного сопротивления R_d . Мощность, выделяющаяся на добавочном сопротивлении, при номинальной нагрузке генератора будет

$$P_{дс} = I_k^2 R_d = j_{доп}^2 R_d q_k^2; \\ P_{дс} = \frac{I_n^2 Y_k}{\left(\frac{2Y_{ош} + Y_{ос}}{Y_{ос}}\right)^2 (Y + Y_k)^2 + Y_{ош}^2} - \\ - \frac{2I_n Y_k l_k \rho j_{доп}}{\sqrt{\left(\frac{2Y_{ош} + Y_{ос}}{Y_{ос}}\right)^2 (Y + Y_k)^2 + Y_{ош}^2}}. \quad (54)$$

Итак, по формулам (35—38), (40), (46), либо (51) и (53) можно найти необходимую толщину набора сердечника ДТТ, числа витков его вторичных обмоток и при необходимости число витков дополнительной короткозамкнутой обмотки и добавочное сопротивление в цепи этой обмотки. При этом необходимо задаться индукцией в сердечнике B_c при токе срабатывания защиты от внутренних повреждений, которую, по-видимому, в целях лучшего использования стали целесообразно принимать соответствующей максимальной магнитной проницаемости материала сердечника. Кроме того, нужно задаться еще величинами коэффициента запаса K_3 мощности в цепи защиты от внутренних повреждений при токе срабатывания этой защиты P_2 и отношения первичного тока срабатывания защиты от сквозных токов при внутреннем повреждении к току срабатывания защиты от внутренних повреждений α . Так как защита от сквозных токов в генераторе выполняет роль резерва по отношению к защите от внутренних повреждений, то величину α целесообразно принимать меньше, или равной единице. Однако для турбогенераторов эта величина может быть принята и больше единицы, но так, чтобы был обеспечен достаточный коэффициент чувствительности резервной защиты.

Необходимая селективность защиты от внутренних коротких замыканий при сквозных сверхтоках в генераторе обеспечивается выбором расчетного коэффициента запаса K_3 . Сквозные сверхтоки в генераторе могут возникать при внешних коротких замыканиях, при включении генератора на параллельную работу методом самосинхронизации и при ошибочном включении при точной синхронизации. В первых двух случаях максимальные возможные токи одинаковы и равны $I_{кз}$. Если иметь в виду обеспечение селективности лишь при этих случаях, то коэффициент запаса следует принимать порядка 1,2—1,5. При этом защита от внутренних повреждений будет без выдержки времени отключать генератор в случае его ошибочного включения в противофазе по методу точной синхронизации. Если последнее нежелательно, тогда коэффициент запаса следует принимать больше 2, так как максимальный возможный ток при таком включении генератора может достигнуть удвоенного тока короткого замыкания. Следует отметить, что коэффи-

коэффициент запаса можно увеличивать лишь до определенного предела. Действительно, как видно из формул (37) и (38), максимальная защита выполнима лишь при

$$\frac{I_{сз}}{\alpha A + 1} - I_{ос} > 0,$$

то есть при

$$\alpha K_3 < \frac{K_H I_H}{K_B I_{K3}} \left(\frac{I_{сз}}{I_{ос}} - 1 \right). \quad (55)$$

В процессе эксплуатации может несколько измениться сопротивление вторичных цепей за счет окисления контактов. Это увеличение сопротивления связано с некоторым уменьшением проводимости данной цепи. Рассмотрим влияние такого незначительного уменьшения проводимости на параметры защиты.

Коэффициент запаса (см. систему уравнений (27) равен

$$K_3 = \frac{I_{ср2} \cdot |\Delta|}{I_{кз} Y_4 (Y_3 + Y_{ос})}.$$

Для простоты примем фазный угол вторичных цепей равным нулю и пренебрежем рассеянием первичной обмотки ($Y_{ос} = \infty$), тогда:

$$K_3 = \frac{I_{ср2}}{I_{кз}} \sqrt{\left(1 + \frac{Y_{ос}}{Y_4}\right)^2 + Y_{ос}^2 \left[\frac{2Y_{ос} + Y_3 + Y_4}{Y_4(Y_3 + Y_{ос})}\right]^2}.$$

Из этого выражения видно, что уменьшение проводимости Y_3 (либо Y_4) приводит к увеличению коэффициента запаса, но в несколько меньшей степени. Таким образом, возможное при эксплуатации увеличение сопротивления вторичной цепи связано с увеличением коэффициента запаса и, следовательно, с этой точки зрения не опасно. Кроме того, при трехфазном исполнении защиты мало вероятно одновременное увеличение переходных сопротивлений во всех трех фазах и для «здоровых» фаз соотношения останутся расчетными.

Ток в реле максимальной защиты, приведенный к первичной стороне, при сквозных токах (27) равен

$$I_{р1} = \frac{I_1 Y_3 (Y_4 + Y_{ос})}{|\Delta|}.$$

Как видим, при уменьшении проводимости Y_3 (либо Y_4) ток в реле максимальной защиты уменьшается. Следовательно, несколько загрузится максимальная защита той фазы, в которой повысилось сопротивление вторичной цепи, что тоже не опасно.

Токи в реле защиты от внутренних междуфазных коротких замыканий и максимальной защиты при внутренних повреждениях соответственно равны (27):

$$I_{р1} = \frac{I_1 Y_3}{2Y_{ос} + Y_3 + Y_4};$$

$$I_{р2} = \frac{I_1 Y_4}{2Y_{ос} + Y_3 + Y_4}.$$

Из этих выражений видно, что уменьшение проводимости в цепи максимальной защиты (Y_3) приводит к уменьшению тока в реле максимальной защиты и к увеличению тока в реле защиты от внутренних повреждений, то есть к некоторому повышению чувствительности защиты

от внутренних повреждений и к загрузке резервной максимальной защиты. Повышение чувствительности защиты от внутренних повреждений невелико, так как $Y_4 \gg Y_3$. При уменьшении проводимости Y_4 аналогично загружается защита от внутренних повреждений и повышается чувствительность максимальной защиты. Как уже отмечалось, все указанные явления имеют место лишь в той фазе, в которой увеличилось переходное сопротивление. Для остальных фаз параметры защиты остаются без изменений. Для трехфазной защиты изменение сопротивления в одной из фаз не приводит к изменению параметров защиты в целом.

Выбор мощности в цепи защиты от внутренних коротких замыканий при ее срабатывании P_2 определяется током срабатывания I'_{cp2} , принятого для защиты реле и суммарным сопротивлением вторичной цепи Z_4 (39). При определении толщины набора сердечника ДТТ по формуле (36) следует принимать наибольшее реально возможное сопротивление $Z_{4м}$ и принять такой ток срабатывания I'_{cp2} , при котором требуемая толщина набора a не выходила бы за конструктивно приемлемые размеры. Полученное при этом значение

$$P_2 = (I'_{cp2})^2 Z_{4м}$$

подставляется в остальные расчетные формулы.

В конкретных условиях при использовании изготовленного ДТТ сопротивление вторичной цепи в общем случае будет меньше, чем $Z_{4м}$. Для того, чтобы не нужно было изменять толщину набора сердечника ДТТ, нужно принять в этих условиях увеличенный ток срабатывания I'_{cp2} так, чтобы мощность P_2 осталась равной расчетной величине. Это связано с необходимостью изменения числа витков W_4 (35).

Аналогично при отличии фактического сопротивления Z_3 от расчетного (37 и 38) следует соответственно изменить число витков W_3 и ток срабатывания максимальной защиты I'_{cp1} . Следовательно, при изготовлении ДТТ нужно предусмотреть отпайки у его вторичных обмоток для наладки защиты при сопротивлениях вторичных цепей, отличающихся от расчетных. Необходимое число отпайек должно определяться в каждом конкретном случае.

В заключение отметим, что при определении проводимости короткозамкнутой обмотки по формуле (44) следует учитывать величину Y_{os} , которую, как уже указывалось, наиболее целесообразно определять экспериментально.

Пример расчета ДТТ для турбогенератора типа ТВС-30

Исходные данные

Тип турбогенератора ТВС-30.

Номинальный ток $I_n = 2065$ а.

Сверхпереходные сопротивления по продольной оси $X_d^* = 0,152$.

Материал сердечника ДТТ: сталь Э330 без дополнительной термической обработки. Максимальная магнитная проницаемость этой стали соответствует индукции $B_c = 5700$ гс при $\omega \omega_c = 0,445$ а/см и $\gamma_c = 55^\circ$. Наибольшее расчетное сопротивление вторичных цепей $Z_{3м} = Z_{4м} = 2$ ома. Ток срабатывания защиты от внутренних повреждений примем равным половине номинального тока $I_{c3} = 1032$ а.

В качестве реле защиты от внутренних повреждений примем реле типа ЭТ521/10 с уставкой $I'_{cp2} = 8,4$ а. Фазный угол вторичной цепи приближенно $\varphi = 0$.

Отношение тока срабатывания максимальной защиты к току срабатывания защиты от внутренних повреждений при междуфазном замыкании внутри генератора примем равным единице: $\alpha = 1$.

Конструктивно принято:

ширина окна ДТТ — $\delta = 13,5$ см;

ширина пакета стали — $\sigma = 3,5$ см;

длина средней магнитной линии $2l_c = 121$ см.

Примем коэффициент отстройки (запаса) защиты от внутренних повреждений от токов в реле при сквозных токах в генераторе $K_3 = 2,2$.

По условию (55) проверяем выполнимость максимальной защиты

$$\begin{aligned} \alpha K_3 &= 1 \cdot 2,2 < \frac{K_H I_H}{K_B I_{K3}} \left(\frac{I_{c3}}{I_{oc}} - 1 \right) = \frac{K_H X_d'}{K_B} \left(\frac{I_{c3}}{a \omega_c l_c} - 1 \right) = \\ &= 1,4 \cdot 0,152 \left(\frac{1032}{27} - 1 \right) = 7,85. \end{aligned}$$

Условие выполняется. Следовательно, максимальная защита выполняется.

Необходимое число витков вторичной обмотки для защиты от внутренних междуфазных коротких замыканий при $I'_{cp2} = 8,4a$ по формуле (35)

$$\omega_4 = \frac{\frac{10,33}{10,33 + 1} 4032 - 0,445 \cdot 60,5}{8,4} = 109 \text{ витков,}$$

где

$$A = \frac{K_3 K_B}{K_H X_d'} = \frac{2,2}{1,4 \cdot 0,152} = 10,33.$$

Требуемая толщина набора сердечника по формуле (36):

$$a = \frac{8,4^2 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^8}{5700 \cdot 314 \cdot 3,5 \cdot 918} = 3,5 \text{ см}$$

Необходимое число витков вторичной обмотки для максимальной защиты по формуле (37)

$$\omega_3 = \left(\frac{10,33}{11,33} 1032 - 27 \right) \sqrt{\frac{Z_3 \left(\frac{1}{11,33} 1032 - 27 \right)}{141 \left(\frac{10,33}{11,33} 1032 - 27 \right)}} = 20,45 \sqrt{Z_3}.$$

Ток срабатывания реле максимальной защиты по формуле (38)

$$I'_{cp1} = \alpha \sqrt{\frac{p_2 \left(\frac{1}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}{Z_3 \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + 1} I_{c3} - I_{oc} \right)}} = \frac{3,14}{\sqrt{Z_3}}.$$

Зависимости ω_3 и I'_{cp1} от Z_3 сведем в табл. 1

Из табл. 1 видно, что в рассмотренном диапазоне сопротивлений Z_3 для максимальной защиты применимо реле типа ЭТ-521/6, сопротивление которого при параллельном соединении катушек (для токов срабатывания от 3 до 6 а) равно 0,01 ом, а при последовательном соединении катушек (для токов срабатывания от 1,5 до 3 а) равно 0,04 ом.

Таблица 1

$z_3, \text{ом}$	0,4	0,54	0,69	0,86	1,05	1,26	1,49	1,74	2,0	2,3
w_3	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
$I'_{\text{ср1}}, \text{а}$	4,94	4,27	3,78	3,39	3,06	2,80	2,56	2,38	2,22	2,07

При сопротивлениях вторичной цепи защиты от внутренних повреждений, отличающихся от расчетного ($Z_{4\text{м}} = 2 \text{ ом}$), мощность в этой цепи при срабатывании защиты должна остаться постоянной

$$P_2 = (I'_{\text{ср2}})^2 Z_4 = 8,4^2 \cdot 2 = 141 \text{ вa}.$$

Отсюда найдем зависимость тока срабатывания реле этой защиты от сопротивления Z_4 :

$$I'_{\text{ср2}} = \sqrt{\frac{141}{Z_4}}.$$

Число витков w_4 при этом (35) изменяется обратно пропорционально величине $I'_{\text{ср2}}$:

$$w_4 = \frac{109 \cdot 8,4}{I'_{\text{ср2}}}.$$

Результаты расчета сводим в табл. 2.

Таблица 2

$z_4, \text{ом}$	0,36	0,47	0,61	0,76	0,92	1,10	1,30	1,51	1,75	2,00
w_4	46	53	60	67	74	81	88	95	102	109
$I'_{\text{ср2}}, \text{а}$	19,8	17,4	15,2	13,6	12,4	11,3	10,4	9,7	9,00	8,4

По данным табл. 2 видно, что во всем диапазоне рассмотренных сопротивлений для защиты от внутренних повреждений применимо реле типа ЭТ521/20 с регулированием тока срабатывания в пределах от 5 до 20 а.

Отметим, что рассмотренный диапазон сопротивлений соответствует длинам соединительных медных проводов от 50 до 270 м при сечении провода $2,5 \text{ мм}^2$ и от 32 до 185 м при $1,5 \text{ мм}^2$. Действительные длины соединительных проводов на электростанциях не выходят за эти пределы.

Из табл. 1 и 2 видно, что вторичные обмотки ДТТ должны иметь отпайки, которые можно принять в соответствии с таблицами. При наладке защиты следует принимать отпайки в соответствии с табл 1 и 2 с ближайшим меньшим числом витков, так как это связано лишь с некоторым увеличением коэффициента запаса, что вполне допустимо.

Найдем требуемую проводимость $Y_{\text{ош}}$ по формуле (41).

$$Y_{\text{ош}} = 542 \left\{ \sqrt{\left[\frac{2,2 \cdot 2065 \cdot 11,33}{1032 \cdot 0,152 \cdot 10,33} \right]^2 - 1} - 0 \right\} = 17200 \frac{1}{\text{ом}},$$

где

$$Y = \frac{1032 \cdot 1 \cdot 1033 \cdot 918}{141 (11,33)^2} = 542 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Расчеты по соответствующим формулам [1, 2, 3] показывают, что для получения проводимости $Y_{\text{ош}} = 17200 \text{ 1/ом}$ требуется воздушный зазор в среднем стержне, превышающий длину этого стержня.

Следовательно, рассчитываемый ДТТ должен выполняться без среднего стержня и с дополнительной короткозамкнутой обмоткой. Для расчета дополнительной короткозамкнутой обмотки требуется знание проводимости рассеяния $Y_{\text{ос}}$. Для определения последней был изготовлен макет ДТТ, на котором экспериментально определены проводимости

$$Y_{\text{ос}} = 9100 \text{ 1/ом} \text{ и } Y_{\text{ош}} = 8500 \text{ 1/ом}.$$

По формуле (44) найдем необходимую проводимость короткозамкнутой обмотки

$$Y_{\text{к}} = 542 \left\{ \frac{9100}{26100} \sqrt{\left[\frac{2,2 \cdot 2065 \cdot 11,33}{1032 \cdot 0,152 \cdot 10,33} \right]^2 - \left(\frac{8500}{542} \right)^2} - 1 \right\} = 4700 \text{ 1/ом}.$$

Если короткозамкнутую обмотку выполнить без добавочного сопротивления, то плотность тока в ней при номинальном токе генератора определяется по формуле (48а)

$$j_{\text{к}} = \frac{2065}{2 \cdot 1,85 \cdot 10^{-2} \cdot 0,19 \sqrt{\left(\frac{26100}{9100} \right)^2 (542 + 4700)^2 - (8500)^2}} =$$

$$= 16,8 \text{ а/мм}^2,$$

где

$$\rho = 0,0185 \frac{\text{ом мм}^2}{\text{м}} \text{ — удельное сопротивление медного провода обмотки;}$$

$$l_{\text{к}} = 0,19 \text{ м} \text{ — конструктивно определенная средняя длина витка короткозамкнутой обмотки.}$$

Плотность тока получилась чрезмерно большой, поэтому короткозамкнутая обмотка должна выполняться с последовательно включенным добавочным сопротивлением.

Примем допустимую плотность тока в короткозамкнутой обмотке равной $j_{\text{доп}} = 2 \text{ а/мм}^2$. Тогда мощность добавочного сопротивления согласно формуле (54) будет

$$P_{\text{дс}} = \frac{(2065)^2 \cdot 4700}{\left(\frac{2 \cdot 8500 + 9100}{9100} \right)^2 (542 + 4700)^2 + (8500)^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2065 \cdot 4700 \cdot 0,0185 \cdot 0,19 \cdot 2}{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot 8500 + 9100}{9100} \right)^2 (542 + 4700)^2 + (8500)^2}} = 120 \text{ вт}.$$

Примем сечение провода короткозамкнутой обмотки $q_{\text{к}} = 1,65 \text{ мм}^2$ (стандартный диаметр провода 1,45 мм), тогда величина добавочного сопротивления по формуле (53)

$$R_{\text{д}} = \frac{120}{(2 \cdot 1,65)^2} = 11 \text{ ом}.$$

Таким образом, в качестве добавочного сопротивления может быть использовано сопротивление типа ПЭ-150 на 11 ом.

Число витков короткозамкнутой обмотки по формуле (51)

$$\omega_k = \frac{4700}{1,65} \left\{ \sqrt{\frac{11 \cdot (1,65)^2}{4700} + (1,85 \cdot 10^{-2} \cdot 0,19)^2 + (1,85 \cdot 10^{-2} \cdot 0,19)} \right\} = 236 \text{ витков.}$$

Рассчитанный ДТТ может быть выполнен и без короткозамкнутой обмотки за счет увеличения величины α (41). Действительно, если принять $\alpha = 2,15$, то условие выполнимости максимальной защиты (55) соблюдается:

$$\alpha K_3 = 2,15 \cdot 2,2 = 4,74 < 7,85.$$

Если принять $P_2 = 149 \text{ вв}$, то требуемая толщина набора сердечника ДТТ (36)

$$a = \frac{149 \sqrt{2} \cdot 10^8}{5700 \cdot 314 \cdot 3,5 \cdot 963} = 3,5 \text{ см.}$$

Число витков и ток срабатывания реле максимальной защиты по (37) и (38)

$$\omega_3 = 963 \sqrt{\frac{Z_3 \cdot 17}{149 \cdot 963}} = 10,5 \sqrt{Z_3};$$

$$I'_{\text{ср1}} = \frac{3,54}{\sqrt{Z_3}}.$$

Зависимость ω_3 и $I'_{\text{ср1}}$ сводим в табл. 3.

Таблица 3

$Z_3, \text{ ом}$	0,44	0,58	0,78	0,91	1,1	1,31	1,53	1,73	2,04
ω_3	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I'_{\text{ср1}, \text{ а}}$	5,34	4,65	4,15	3,72	3,27	3,09	2,86	2,65	2,48

Здесь так же, как и в предыдущем случае, применимо реле типа ЭТ521/6.

При $P_2 = 149 \text{ вв}$ зависимость ω_4 и $I'_{\text{ср2}}$ от Z_4 будет:

Таблица 4

$Z_4, \text{ ом}$	0,34	0,45	0,58	0,72	0,88	1,05	1,24	1,44	1,67	1,9
ω_4	46	53	60	67	74	81	88	95	102	109
$I'_{\text{ср2}, \text{ а}}$	20,9	18,2	16,0	14,4	13,3	11,9	11,0	10,3	9,45	8,85

Требуемая проводимость по формуле (41)

$$Y_{\text{ош}} = 276 \sqrt{\left[\frac{2,2 \cdot 2065 \cdot 23,2}{1032 \cdot 0,152 \cdot 22,2} \right]^2 - 1} - 0 = 8350 \frac{1}{\text{ом}},$$

где

$$Y = \frac{1032 \cdot 2,15 \cdot 10,33 \cdot 963}{149 \cdot (23,2)^2} = 276 \text{ 1/ом.}$$

Действительное значение при отсутствии среднего стержня $Y_{\text{ош}} = 8500 \text{ 1/ом}$ мало отличается от расчетного, следовательно, ДТТ может быть выполнен без среднего стержня и без короткозамкнутой обмотки при $\alpha = 2,15$, что соответствует току срабатывания максимальной защиты при внутренних повреждениях

$$I_{\text{сзм}} = \alpha I_{\text{сз}} = 2,15 \cdot 1032 = 2216 \text{ а.}$$

(при номинальном токе генератора 2065а), что вполне допустимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. К. Буль. Определение погрешностей и пределов применимости формул удельных магнитных проводимостей, Электричество, № 4, 1960.
 2. Б. К. Буль. Исследование поля вблизи воздушного зазора и расчет магнитной проводимости. Вестник электропромышленности, № 9, 1959.
 3. А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. Электромагниты постоянного тока, ГЭИ, 1960.
 4. Н. А. Дульзон. Схема замещения дифференциальных трансформаторов тока, Известия вузов, Электромеханика, № 1, 1963.
-