

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

Часть I. Схема совмещенной защиты генераторов от внешних и внутренних междуфазных коротких замыканий

Н. А. ДУЛЬЗОН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

Принципиальная схема этой защиты приведена на рис. 1. Средний стержень сердечника ДТТ в этом случае, как правило, выполняется с воздушным зазором. На крайних стержнях располагаются две вторичные обмотки, в одну из которых включается сравнительно чувствительное реле для максимальной защиты, а во вторую — более грубое реле для защиты от внутренних повреждений.

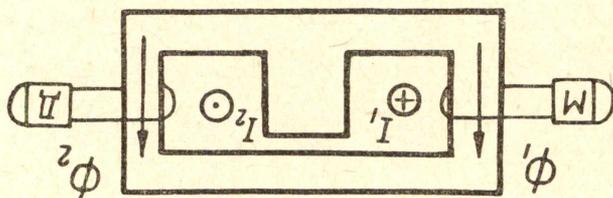


Рис. 1.

ДТТ равны и противоположны. Вследствие этого магнитные потоки в правой и левой половинах сердечника будут направлены встречно и вынуждены замыкаться через средний стержень с воздушным за-

зором. В нормальном режиме и при сквозных сверхтоках токи в первичных обмотках

и при сквозных сверхтоках токи в первичных обмотках

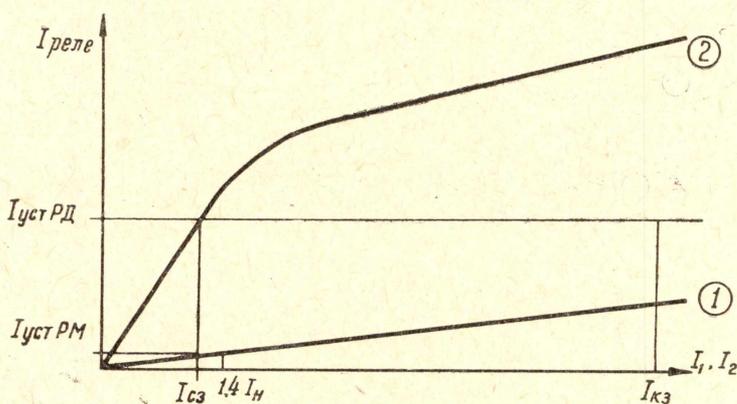


Рис. 2.

зором. В этом режиме ДТТ может быть мысленно представлен в виде двух отдельных трансформаторов тока с воздушным зазором, для которых зависимость тока в реле от первичного тока представляет собой пологую прямую линию, угол наклона которой зависит от величины воздушного зазора (рис. 2, кривая 1). Уставка более чувствитель-

ного реле (реле М на рис. 1). $I_{устрм}$ принимается такой, чтобы оно сработало при требуемом первичном токе срабатывания максимальной защиты, т. е. примерно при $1,4 I_{ном}$. Уставка второго реле $I_{устрд}$ выбирается с определенным запасом так, чтобы это реле не приходило в действие при максимальных сквозных сверхтоках.

При внутренних междуфазных коротких замыканиях первичные токи в ДТТ не равны друг другу. Относительно разности этих токов ДТТ представляет собой обычный трансформатор тока со сплошным сердечником и с двумя вторичными обмотками. Для такого трансформатора зависимость вторичных токов от первичного имеет вид кривой 2 на рис. 2. При внутреннем коротком замыкании срабатывают оба реле. При этом реле Д отключает генератор без выдержки времени, а реле М (с выдержкой времени) выполняет функции резерва. Чувствительность защиты от внутренних повреждений по первичному току $I_{срд}$ зависит от крутизны кривой 2, что должно учитываться при расчете ДТТ.

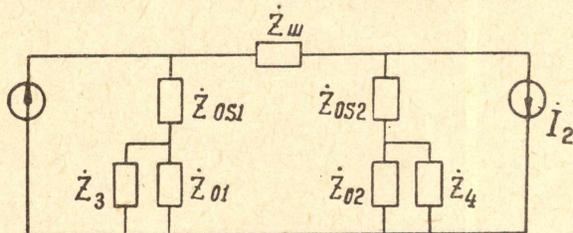


Рис. 3.

Схема замещения рассматриваемой защиты представлена на рис. 3. На рисунке:

$\dot{Z}_3 = \frac{1}{\dot{Y}_3}$; $\dot{Z}_4 = \frac{1}{\dot{Y}_4}$ — соответственно, сопротивления цепи максимальной защиты и защиты от внутренних повреждений;

$\dot{Z}_{01} = \frac{1}{\dot{Y}_{01}}$; $\dot{Z}_{02} = \frac{1}{\dot{Y}_{02}}$ — сопротивления намагничивания левой и правой половин сердечника;

$\dot{Z}_{0s1} = \frac{1}{\dot{Y}_{0s1}}$; $\dot{Z}_{0s2} = \frac{1}{\dot{Y}_{0s2}}$ — сопротивления намагничивания соответствующие потокам рассеяния первичного тока;

$\dot{Z}_{0m} = \frac{1}{\dot{Y}_{0m}}$ — сопротивление намагничивания, соответствующее промежутку между первичными токопроводами, включая средний стержень с воздушным зазором.

Для системы уравнений, описывающих эту схему замещения, главный определитель

$$\Delta = \left[\frac{\dot{Y}_{0m}}{\dot{Y}_{0s1}} + \frac{\dot{Y}_{0m}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right] (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_3)(\dot{Y}_{02} + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_{0m}(\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4). \quad (1)$$

Частные определители для вычисления вторичных и намагничивающих токов:

$$\Delta_3 = i_1 \dot{Y}_3 \left[\frac{\dot{Y}_{0m}}{\dot{Y}_{0s2}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{0m} \right] - i_2 \dot{Y}_3 \left[\frac{\dot{Y}_{0m}}{\dot{Y}_{0s2}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{0m} \right]; \quad (2)$$

$$\Delta_4 = i_2 \dot{Y}_4 \left[\left(\frac{\dot{Y}_{0m}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) + \dot{Y}_{0m} \right] -$$

$$- I_1 \dot{Y}_4 \left[\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{\text{ос1}}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) + \dot{Y}_{\text{ош}} \right]; \quad (3)$$

$$\Delta_{01} = \frac{\Delta_3 \dot{Y}_{01}}{\dot{Y}_3}; \quad \Delta_{02} = \frac{\Delta_4 \dot{Y}_{02}}{\dot{Y}_4}. \quad (4)$$

Расчетным условием при внешнем коротком замыкании является равенство первичных токов $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_{\text{кз}}$. При этом токи в схеме будут:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_1 \dot{Y}_3 (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})}{\Delta}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{I}_1 \dot{Y}_4 (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})}{\Delta}. \quad (6)$$

При внутреннем коротком замыкании наименьшие вторичные токи будут при $\dot{I}_2 = 0$. Тогда

$$\dot{i}_3 = \frac{\dot{I}_1 \dot{Y}_3 \left[\left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{\text{ос2}}} + 1 \right) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{\text{ош}} \right]}{\Delta}, \quad (7)$$

$$\dot{I}_4 = \frac{- \dot{I}_1 \dot{Y}_4 \left[\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{\text{ос1}}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) + \dot{Y}_{\text{ош}} \right]}{\Delta}; \quad (8)$$

$$\dot{i}_{01} = \dot{i}_3 \frac{\dot{Y}_{01}}{\dot{Y}_3}; \quad \dot{i}_{02} = \dot{I}_4 \frac{\dot{Y}_{02}}{\dot{Y}_4}. \quad (9)$$

Из выражений (5) и (6) видно, что при однофазном исполнении и при обрыве в цепи защиты от внутренних замыканий ($\dot{Y}_4 = 0$) резко снижается ток в цепи максимальной защиты.

Если, при рассмотрении формул (7) и (8), пренебречь потоками рассеяния первичных обмоток ($\dot{Y}_{\text{ос1}} = \dot{Y}_{\text{ос2}} = \infty$), то они принимают вид:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_1 \dot{Y}_3 (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_{\text{ош}})}{(\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_3) (\dot{Y}_{02} + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4)}; \quad (10)$$

$$\dot{I}_4 = \frac{- \dot{I}_1 \dot{Y}_4 \dot{Y}_{\text{ош}}}{(\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_3) (\dot{Y}_{02} + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4)}. \quad (11)$$

Из последних выражений видно, что при внутреннем коротком замыкании в генераторе обрыв цепи максимальной защиты ($\dot{Y}_3 = 0$) приводит к повышению чувствительности защиты от внутренних повреждений, так как ток \dot{I}_4 в этом режиме возрастает. Разумеется, что обрыв в любой цепи приводит к отказу защиты с оборванной цепью. Учитывая сказанное, данную защиту нельзя рекомендовать для однофазного исполнения.

В целях экономии провода однофазная схема по рис. 1 может быть составлена так, как показано на рис. 4, а, где вторичные обмотки ДТТ соединены согласно, либо так, как на рис. 5, а, где эти обмотки соединены встречно. Первой принципиальной схеме соответствует схема замещения 4, б.

Для схемы 4, б при сквозных токах в генераторе ($I_1 = I_2$) ток в цепи максимальной защиты:

$$I_3 = \frac{I_1 \dot{Y}_3 [\dot{Y}_4 (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{\text{онр}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})]}{\Delta} \quad (12)$$

Ток в цепи защиты от внутренних междуфазных повреждений

$$I_4 = \frac{I_1 \dot{Y}_4 [\dot{Y}_3 (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{\text{онр}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})]}{\Delta} \quad (13)$$

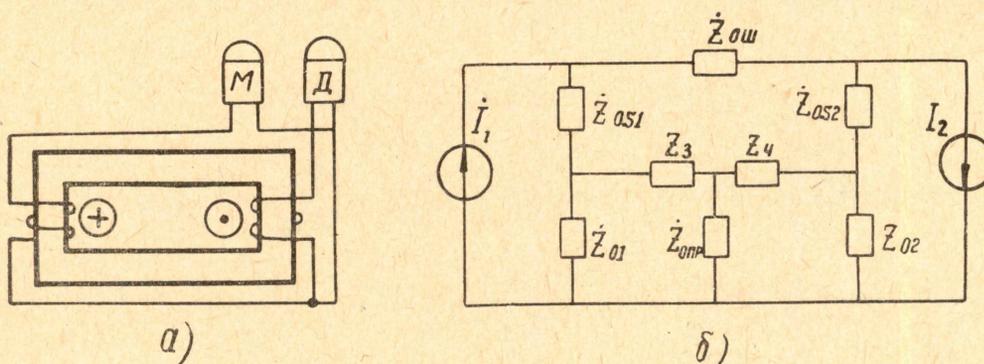


Рис. 4.

Ток в нулевом проводе

$$I_{\text{онр}} = \frac{I_1 \dot{Y}_{\text{онр}} [\dot{Y}_3 (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) - \dot{Y}_4 (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})]}{\Delta} \quad (14)$$

В последних выражениях:

$$\Delta = \left(\frac{\dot{Y}_{\text{онр}}}{\dot{Y}_{0s1}} + \frac{\dot{Y}_{\text{онр}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) [\dot{Y}_{01} \dot{Y}_{02} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{\text{онр}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})] + \dot{Y}_{\text{онр}} [(\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_{\text{онр}} (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4)].$$

\dot{Y}_3 — проводимость цепи максимальной защиты;

\dot{Y}_4 — проводимость цепи защиты от внутренних междуфазных повреждений;

$\dot{Y}_{\text{онр}}$ — проводимость нулевого провода.

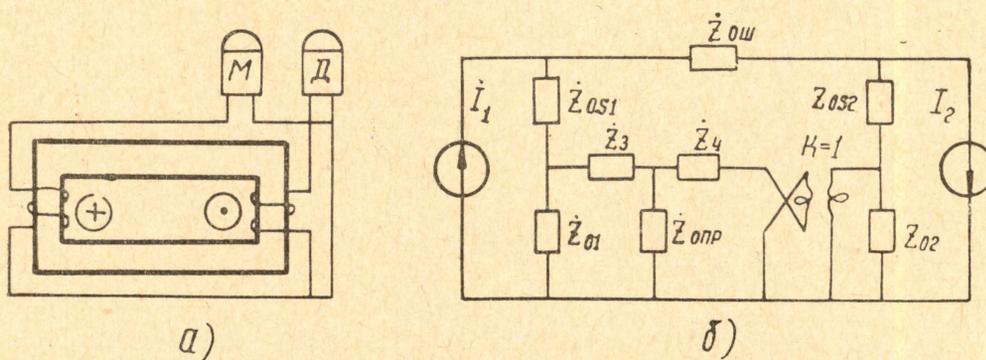


Рис. 5.

Для второй принципиальной схемы защиты (рис. 5, а) легко может быть получена электрическая схема замещения, представленная

на рис. 5, б. Расчет этой схемы дает следующие значения токов в ней:

$$i_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad i_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta}; \quad i_{01} = \frac{\Delta_{01}}{\Delta}; \quad i_{02} = \frac{\Delta_{02}}{\Delta}; \quad i_{\text{онп}} = \frac{\Delta_{\text{онп}}}{\Delta}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_3 = & i_2 \dot{Y}_3 \left\{ \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} [\dot{Y}_4 \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_{\text{онп}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})] + \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) \dot{Y}_{01} \dot{Y}_4 + \right. \\ & \left. + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{\text{онп}} + 2\dot{Y}_4) \right\} - i_1 \dot{Y}_3 \left\{ \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) [\dot{Y}_4 \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_{\text{онп}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})] + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} \dot{Y}_{01} \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{\text{онп}} + 2\dot{Y}_4) \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_4 = & i_1 \dot{Y}_4 \left\{ \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} [\dot{Y}_3 \dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{\text{онп}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})] + \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) \dot{Y}_{02} \dot{Y}_3 + \right. \\ & \left. + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{\text{онп}} + 2\dot{Y}_3) \right\} - i_2 \dot{Y}_4 \left\{ \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) [\dot{Y}_3 \dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{\text{онп}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})] + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} \dot{Y}_{02} \dot{Y}_3 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_{\text{онп}} + 2\dot{Y}_3) \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{01} = & i_2 \dot{Y}_{01} \left\{ \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} [(\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_{02} + (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_4] - \right. \\ & \left. - \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \right\} - \\ & - i_1 \dot{Y}_{01} \left\{ \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) [(\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_{02} + (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_4] - \right. \\ & \left. - \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{02} = & i_1 \dot{Y}_{02} \left\{ \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} [(\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_{01} + (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_3] - \right. \\ & \left. - \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \right\} - \\ & - i_2 \dot{Y}_{02} \left\{ \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) [(\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_{01} + (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \dot{Y}_3] - \right. \\ & \left. - \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{онп}}) \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{онп}} = & i_2 \dot{Y}_{\text{онп}} \left\{ \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) \dot{Y}_3 - \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s1}} + 1 \right) (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) \dot{Y}_4 + \right. \\ & \left. + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 - \dot{Y}_4) \right\} - i_1 \dot{Y}_{\text{онп}} \left\{ \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{0s2}} + 1 \right) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) \dot{Y}_3 - \right. \end{aligned}$$

$$- \frac{Y_{\text{ош}}}{Y_{\text{ос1}}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) \dot{Y}_4 + \dot{Y}_{\text{ош}} (\dot{Y}_3 - \dot{Y}_4) \Big\},$$

Главный определитель

$$\Delta = \left(\frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{\text{ос1}}} + \frac{\dot{Y}_{\text{ош}}}{\dot{Y}_{\text{ос2}}} + 1 \right) [\dot{Y}_{01} \dot{Y}_{02} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) + \dot{Y}_{\text{опр}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})] + \dot{Y}_{\text{ош}} [(\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02}) (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_4) + \dot{Y}_{\text{опр}} (\dot{Y}_{01} + \dot{Y}_{02} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4)].$$

При равенстве первичных токов ($I_1 = I_2$) токи в реле максимальной защиты, защиты от внутренних междуфазных повреждений и ток в нулевом проводе соответственно будут

$$i_3 = \frac{i_1 \dot{Y}_3 [\dot{Y}_4 (\dot{Y}_{01} - \dot{Y}_{02}) - \dot{Y}_{\text{опр}} (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02})]}{\Delta}; \quad (16)$$

$$i_4 = \frac{i_1 \dot{Y}_4 [\dot{Y}_3 (\dot{Y}_{02} - \dot{Y}_{01}) - \dot{Y}_{\text{опр}} (\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01})]}{\Delta}; \quad (17)$$

$$i_{\text{опр}} = \frac{-i_1 \dot{Y}_{\text{опр}} [(\dot{Y}_3 + \dot{Y}_{01}) \dot{Y}_4 + (\dot{Y}_4 + \dot{Y}_{02}) \dot{Y}_3]}{\Delta}. \quad (18)$$

Анализ двух последних схем (рис. 4, а, 5, а) показывает, что при сквозных токах в генераторе и обрыве в одной из вторичных цепей ДТТ, как и в предыдущем случае (рис. 1), резко снижается ток в неповрежденной цепи (12, 13, 16, 17). Следовательно, рассматриваемые схемы также не могут быть рекомендованы для однофазного исполнения.

Рассмотрим возможные варианты защиты от внешних и внутренних междуфазных повреждений в трехфазном исполнении.

Трехфазная схема защиты, соответствующая рис. 1, показана на рис. 6, а.

При внешних междуфазных коротких замыканиях обрыв цепи защиты от внутренних повреждений одной из фаз приводит к снижению тока в цепи максимальной защиты этой же фазы. Однако отказа в действии максимальной защиты не будет за счет действия двух оставшихся исправных фаз.

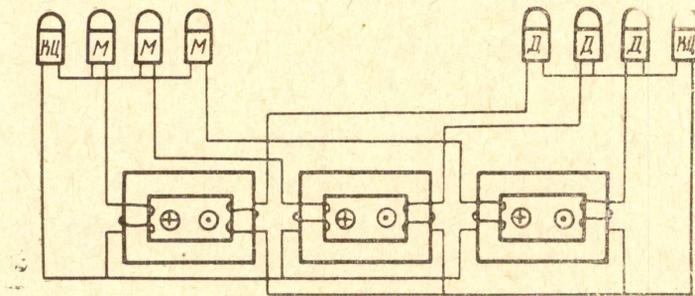
При аналогичном повреждении вторичной цепи и внутреннем междуфазном коротком замыкании отказа в работе защиты тоже не будет по тем же причинам.

Вместе с тем при обрыве во вторичных цепях в нулевом проводе соответствующей защиты потечет фазный ток, что позволяет с помощью реле, установленного в нулевом проводе (реле КЦ, рис. 6, а), осуществить надежный контроль цепей. Кроме того, в силу вышеуказанных причин, в нулевом проводе неповрежденной защиты тоже потечет ток, который может привести к срабатыванию второго реле контроля цепей.

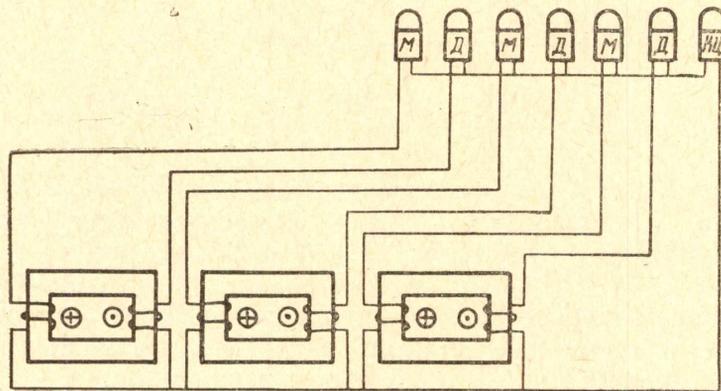
Как видим, рассмотренная схема удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям и может быть использована. В этой схеме для соединения дифференциальных трансформаторов тока с релейной панелью требуется восьмижильный контрольный кабель.

В нулевом проводе трехфазной схемы защиты, соответствующей рис. 4, а, при сквозных токах в генераторе и обрыве в одной из вторичных цепей будет протекать лишь небольшой ток, равный току в исправной цепи поврежденной фазы, так как от неповрежденных фаз в нулевом проводе (при симметричных ДТТ) ток не протекает, что видно из (14). Это обуславливает определенные затруднения при выполнении контроля исправности вторичных цепей.

Из рис. 5 видно, что при выполнении трехфазной схемы (рис. 6, б) такое затруднение с контролем цепей не возникает. Эта схема удовлетворяет всем требованиям; работа ее мало отличается от варианта по



а)



б)

Рис. 6.

рис. 6, а, и, вместе с тем, в ней экономится один провод вторичных соединений. Поэтому данная схема может быть рекомендована для использования.