

**О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ПРОДОЛЬНОЙ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ,  
ВЫПОЛНЕННОЙ ПО СХЕМЕ С РАВНОВЕСИЕМ ВТОРИЧНЫХ  
Э. Д. С.**

Л. В. БАГИНСКИЙ

(Представлено проф. докт. техн. наук И. Д. Кутявиным)

В последние годы осуществлен ряд мероприятий, направленных на повышение селективности и надежности продольной дифференциальной защиты генераторов. Важнейшее место среди этих мероприятий занимают применение быстронасыщающихся трансформаторов (б. н. т.) и повышение уставок реле с целью получения первичных токов срабатывания до  $I_{\text{ср}} = (1,3-1,5) I_{\text{нг}}$ . Последнее исключает возможность ложного действия защиты при повреждениях в ее цепях. Однако это мероприятие не в состоянии обеспечить селективность работы защиты при внешних коротких замыканиях, так как токи небаланса при этом могут достигать десятков ампер [1]. В практике уже зарегистрирован случай неселективного действия защиты при  $I_{\text{ср}} = 1,2 I_{\text{нг}}$  при внешнем коротком замыкании [2].

Применение б. н. т. обеспечивает надежную отстройку от токов небаланса даже при  $I_{\text{ср}} < I_{\text{нг}}$ . Однако применяющаяся в настоящее время схема обладает свойством реагировать на повреждения в соединительных проводах. Таким образом, ни одно из этих мероприятий не может одновременно повысить надежность и селективность защиты.

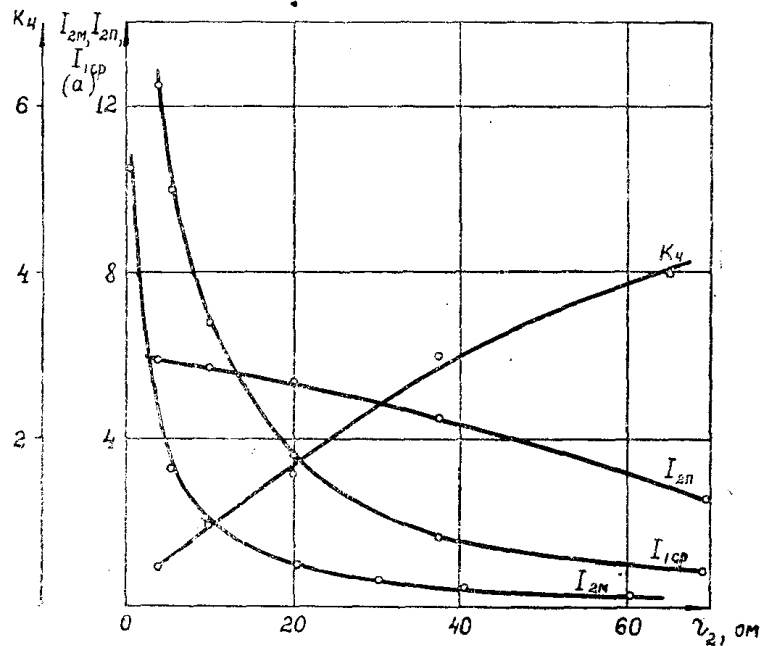
Длительный опыт эксплуатации, а также исследования, проведенные на кафедре электрические станции, сети и системы Томского политехнического института, показывают, что схема дифференциальной защиты с равновесием вторичных э. д. с. при правильной настройке может отвечать всем требованиям, предъявляемым к основной защите генераторов.

Схема дифференциальной защиты генераторов с равновесием вторичных э. д. с. подробно рассмотрена Г. В. Зевеке в [3], который исследовал основные свойства этой схемы в отношении ее чувствительности, причем последняя оказалась практически выше чувствительности схемы с циркулирующими токами. На основании этого Г. В. Зевеке пришел к выводу о возможности применения рассматриваемой схемы в качестве дифференциально-земляной при заземленных через активные сопротивления нейтралей генераторов. Для этого число витков вторичных обмоток цепи равновесия э. д. с.

трансформаторов тока  $\omega_2$  подбирают таким образом, чтобы сопротивление цепи реле  $z_2$  и сопротивление взаимной индукции  $z_M$  находились бы в соотношении  $z_2 = 4z_M$ . При этом уставку реле должна выбираться из условия получения необходимого первичного тока срабатывания при замыканиях на землю.

Такой способ настройки защиты обладает весьма существенными недостатками, обусловленными стремлением не только совместить функции дифференциальной и земляной защит в одной схеме, но и иметь в этой схеме общие для обеих защит исполнительные органы. Поэтому при уставках, обеспечивающих необходимую чувствительность защиты от замыканий на землю, защита может работать неселективно при внешних коротких замыканиях. Кроме того, высокая чувствительность реле обуславливает большое его сопротивление и, следовательно, перенапряжения при коротких замыканиях в зоне защиты.

Поскольку в настоящее время нейтрали генераторов не заземляются, дифференциально-земляную защиту выполнить без усложнения конструкции трансформаторов тока невозможно. Поэтому настройка схемы должна отвечать лишь требованиям защиты от внутренних междуфазных повреждений. Как известно, наиболее жесткими эти требования должны быть при защите гидрогенераторов с катушечной обмоткой. В этом случае защита должна работать селективно при  $I_{1cp} = 0,5 I_{нг}$  с коэффициентом чувствительности  $k_4 = 2$ , причем опасные перенапряжения в схеме, а также срабатывания защиты при повреждениях в ее цепях недопустимы.



Фиг. 1.

Требования в отношении чувствительности и селективности защиты могут быть выполнены посредством введения активных добавочных сопротивлений в цепь реле [4]. Количественное влияние их на характеристики защиты показано на фиг. 1. Зависимости, представленные на фиг. 1, сняты опытным путем при следующих условиях. Трансформаторы тока имели длину средней магнитной линии  $l_{cp} = 45,6$  см, сечение сердечника  $q = 37$  см<sup>2</sup>, числа витков первичной

и вторичной обмоток  $\omega_1 = 200$ ,  $\omega_2 = \omega_3 = 100$ ; максимальное расхождение вольтамперных характеристик трансформаторов  $10,9\%$ . Сопротивление цепи циркуляции токов  $r_3$  подбиралось таким образом, чтобы при  $I_1 = I_{НГ}$  индукция в сердечниках была бы  $B = 500$  гс. Перед каждым включением схемы на внешнее короткое замыкание сердечники трансформаторов тока намагничивались постоянным током в противоположных направлениях до насыщения для получения максимальных остаточных потоков разных знаков. За номинальный ток был принят  $I_{НГ} = 2,5$  а. Максимальный переходный ток небаланса  $I_{2М}$  замерялся при  $I_1 = 6 I_{НГ}$  тщательно отградуированным реле типа ЭТ-520, срабатывание которого регистрировалось промежуточным реле, включенным по схеме „на прилипание.“ Первичная цепь питалась от синхронного генератора при напряжении порядка 600 в через дроссель с большой индуктивностью. Величина  $I_{1ср}$  определялась плавным повышением первичного тока от нуля до момента срабатывания реле при уставке  $I_U = \kappa_H I_{2М}$  (где коэффициент надежности  $\kappa_H = 3$ ), а  $\kappa_4 = I_{2П} : \kappa_H I_{2М}$ . Ток в реле при повреждении в зоне защиты  $I_{2П}$  замерен при  $I_1 = 2,4 I_{НГ} = 6$  а, что соответствует минимально возможному току двухполюсного короткого замыкания на выводах гидрогенераторов.

Из кривых фиг. 1 следует, что для достижения селективной работы защиты при  $I_{1ср} = (1,3-1,5) I_{НГ}$  достаточно иметь сопротивление цепи реле  $r_2 = (20-30)$  ом, а при  $I_{1ср} = (0,4-0,6) I_{НГ}$  —  $r_2 = (40-60)$  ом. При этом опасные напряжения в цепях защиты не будут возникать, поскольку  $r_2 = (40-60)$  ом соответствует сопротивлению цепи реле дифференциальной защиты с циркулирующими токами  $r_p = (10-15)$  ом [3]. Последняя длительное время эксплуатировалась при добавочных сопротивлениях порядка (10-20) ом, причем ни одного случая возникновения опасных напряжений не зарегистрировано.

Добавочные сопротивления в цепях реле являются дополнительными элементами и поэтому в некоторой степени усложняют схему. Ценным свойством дифференциальной защиты с равновесием э. д. с. является возможность достичь такой же селективности при заданных  $I_{1ср}$  без применения добавочных сопротивлений. Для этого достаточно снизить число витков  $\omega_2$  обмоток, соединенных на равновесие э. д. с., с таким расчетом, чтобы сопротивления этих обмоток трансформаторов тока, реле и соединительных проводов  $r_{np}$ , приведенные к числу витков обмоток цепи циркуляции  $\omega_3$ , было бы равно  $r'_2 = (40-60)$  ом, то есть

$$r'_2 = 2 r_{вит} \omega_2 \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + r_{np} \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + r_p \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2}.$$

Здесь  $r_{вит}$  — сопротивление одного витка вторичной обмотки цепи равновесия э. д. с. Решение этого уравнения дает искомое число витков:

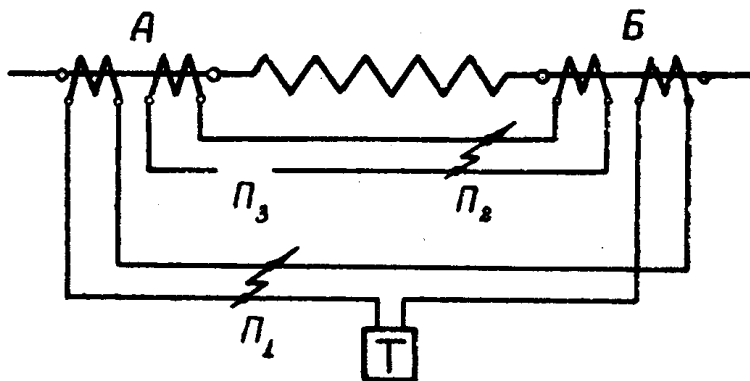
$$\omega_2 = \frac{r_{вит}}{r'_2} \omega_3 + \omega_3 \sqrt{\frac{r_{вит}^2}{r'_2} \omega_3^2 + \frac{r_{np}}{r'_2} + \frac{r_p}{r'_2}}. \quad (1)$$

Поскольку в рассматриваемой схеме могут применяться реле не большей чувствительности, чем ЭТ-520/10,  $r_p \ll r_{np}$  и может не учитываться в расчетах. Расчеты показывают, что следует применять соединительные провода с сечением  $s = 2,5$  мм<sup>2</sup> и что тепловая

устойчивость их будет обеспеченной с достаточным запасом. Отношение чисел витков вторичных обмоток цепей циркуляции токов и равновесия э. д. с. лежит в пределах  $\frac{\omega_3}{\omega_2} = (5-10)$ .

Необходимо отметить, что степень селективности, свойственная защите с равновесием э. д. с. ( $k_H = 3$ ), недостижима для защиты с равновесием токов при эквивалентном сопротивлении цепи реле ( $r_p \cong 0,25 r_s$ ). Это объясняется идеальной уравновешенностью схемы защиты с равновесием э. д. с. В защите с циркулирующими токами может существовать небаланс плеч величиной порядка 20—30 %, что способно вызвать увеличение тока небаланса в 2—3 раза против его значений при уравновешенных плечах. Так, по данным [5] небаланс плеч в 30 % вызывает увеличение переходного тока небаланса в 3,3 раза.

Отметим также, что в схеме с циркулирующими токами применение добавочных сопротивлений приводит к некоторому снижению надежности схемы, так как сами сопротивления являются дополнительными элементами.



Фиг. 2.

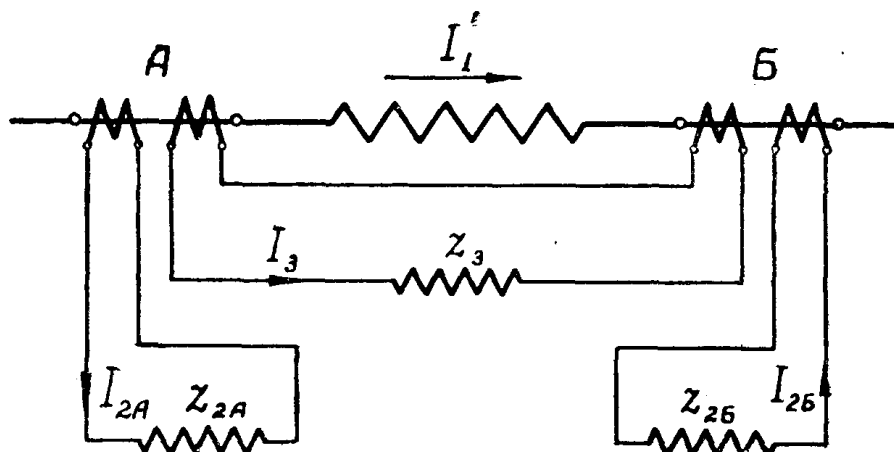
Рассмотрим надежность схемы дифференциальной защиты с равновесием э. д. с. при рекомендованной выше настройке. Как известно, возможны следующие виды повреждений схемы (см. фиг. 2): 1. Короткое замыкание в цепи равновесия э. д. с. (точка  $\Pi_1$ ). 2. Короткое замыкание в цепи циркуляции токов (точка  $\Pi_2$ ). 3. Обрыв цепи циркуляции токов (точка  $\Pi_3$ ).

Так как между проводами в точке  $\Pi_1$  напряжение равно нулю, можно разделить цепи равновесия э. д. с. на две цепи. С учетом этого эквивалентная схема для случая металлического короткого замыкания между проводами цепи равновесия э. д. с. принимает вид, показанный на фиг. 3.

В руководящих указаниях по релейной защите издания 1939 г. утверждается, что короткие замыкания в цепи равновесия э. д. с. вызывают ложные действия защиты. Пользуясь схемой фиг. 3, нетрудно показать, что это утверждение справедливо лишь при настройке схемы, предложенной Г. В. Зевеке, или в случае применения добавочных сопротивлений. В первом случае ложное действие вызывается слишком малой уставкой реле ( $I_{1cp} \ll I_{нг}$ ). Хотя при этом доля тока, трансформированного в цепь реле, существенно ограничивается сопротивлением последнего, первичный ток достаточно велик, чтобы обусловить выделение в катушке реле мощности, значительно превышающей 0,1 ватт. При применении добавочных сопротивлений лож-

ное действие произойдет, если точка  $\Pi_1$  будет расположена между ним и реле.

В случае, если схема рассчитана по выражению (1), сопротивление  $r_2$  равномерно распределено по всей цепи равновесия э. д. с. Точкой  $\Pi_1$  оно разбивается на две части, то есть  $z_2 = z_{2A} + z_{2B}$ . Ток в каждой из этих частей (контуров) будет тем больше, чем меньше



Фиг. 3.

сопротивление этой части. Наименьшее сопротивление контур, содержащий реле, будет иметь при расположении точки  $\Pi_1$  в непосредственной близости от реле, то есть при  $z_{2A} \cong z_{2B} \cong 0,5 z_2$ . Тогда ток в реле в рассматриваемом режиме после пренебрежения малыми членами выразится следующим образом:

$$I_{2A} = \frac{I_1' z_3'}{z_2 + z_3'} \quad (2)$$

Здесь все величины приведены к числу витков  $w_2$ . Определим, каким должно быть сопротивление  $z_2$  для срабатывания реле при  $I_1 = I_{нг}$ , для чего положим  $I_1' = I_{нг}'$ ,  $I_2 = I_y$  и  $\frac{I_y'}{I_{нг}'} = \alpha$ . Тогда

$$z_2 = z_3' \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что для срабатывания реле при  $I_y = 0,2 I_{нг}'$  (это приблизительно соответствует  $I_{иср} = 0,4 I_{нг}'$ )  $z_2$  должны быть очень малыми. Например, при  $z_3 = 1$  ом,  $\frac{w_2}{w_3} = 0,2$  и  $\alpha = 0,3$  имеем:

$$z_2 = 1,0,2^2 \left( \frac{1}{0,2} - 1 \right) = 0,16 \text{ ом.}$$

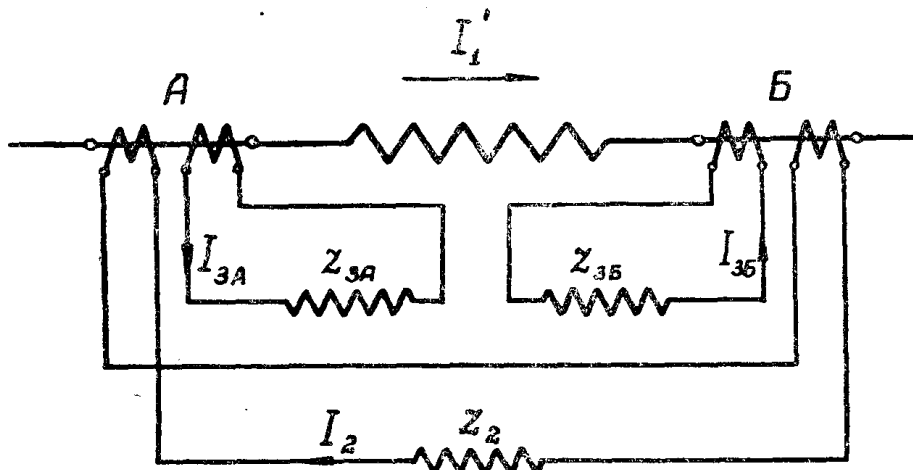
Действительная величина  $z_2$  при  $z_3' = 40$  ом составит

$$z_2 = 40 \frac{w_2^2}{w_3^2} = 40 \cdot 0,2^2 = 1,6 \text{ ом.}$$

Следовательно, срабатывание реле при данной настройке совершенно невозможно.

Справедливость уравнений (2) и (3) проверена опытами.

Эквивалентная схема замещения цепей защиты при коротком замыкании в цепи циркуляции токов представлена на фиг. 4. Очевидно, что замыкание в середине проводов цепи циркуляции образует как бы дополнительную дифференциальную цепь с сопротивлением, равным



Фиг. 4.

нулю, и с уравновешенными плечами. Поэтому цепь равновесия э. д. с. оказывается шунтированной этой новой дифференциальной цепью и  $I_2 = 0$ . Поэтому наибольший ток  $I_2$  будет иметь место при максимальном неравенстве  $z_{3A}$  и  $z_{3B}$ , то есть когда точка  $\Pi_2$  (фиг. 2) располагается на выводах одного из трансформаторов тока, например, Б. При этом  $z_{3A} + z_{3B} = z_3$ , а  $z_{3A} - z_{3B} = r_{np}$ . Решение контурных уравнений для этих условий после пренебрежения малыми членами будет иметь следующий вид:

$$r'_{np} = I_2 \frac{z'_3 + z_2}{I_1} \quad (4)$$

Применив те же подстановки, что и для случая замыкания в точке  $\Pi_1$ , определим величину  $r'_{np}$ , при которой может ложно сработать защита:

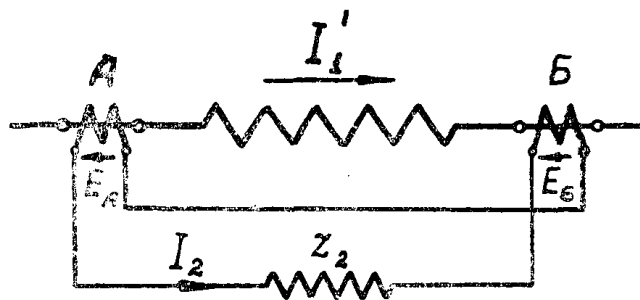
$$r'_{np} = \alpha (z_2 + z'_3) \quad (5)$$

Очевидно, что уравнение (5) справедливо лишь для условий  $\alpha < 1$ , так как  $r'_{np} < z'_3$ . Кроме того,  $z_2$  больше  $r'_{np}$  не менее, чем в  $\left(\frac{\omega_3}{\omega_2}\right)^2$  раз, и поэтому срабатывание защиты возможно лишь при  $\alpha \ll 0,2$ . Следовательно, при коротком замыкании в цепи циркуляции токов ложное действие защиты невозможно.

Уравнения (4) и (5) хорошо согласуются с данными опыта.

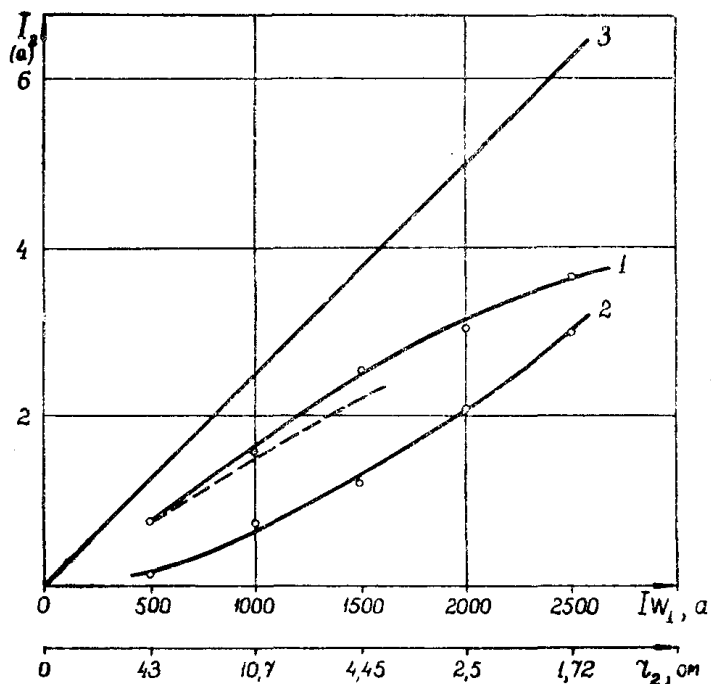
Наиболее часто встречающимся видом повреждений в схемах дифференциальных защит является обрыв цепи циркуляции токов. В [3] утверждается, что в этом режиме неизбежно ложное действие защиты, так как практически весь первичный ток в данном случае является намагничивающим. При этом вольтамперные характеристики

якобы значительно расходятся. С этим утверждением нельзя согласиться. В самом деле, Б. А. Нечаев [6] показал, что вольтамперные характеристики в области высоких индукций сближаются, а не расходятся, если сердечники изготовлены из стали одной марки. Более того, дифференциальная защита с равновесием э. д. с. холостого хода трансформаторов тока [7] вообще работает без цепи циркуляции, причем ее селективность выше, чем селективность схемы с циркулирующими токами.



Фиг. 5.

Для подтверждения этих выводов были проделаны следующие опыты. В схеме, приведенной на фиг. 5, использовались те же трансформаторы тока, что и в опыте, по результатам которого построены кривые на фиг. 1. Сопротивление цепи равновесия э. д. с. было чисто активным и равнялось  $r_2 = 1 \text{ ом}$ . При различных  $I_1$  были измерены токи  $I_2$  и по результатам измерений была построена кривая 1 (см. фиг. 6). Там же прямой 3 представлена зависимость  $I_2 = f(I\omega_1)$



Фиг. 6.

при  $I_{1cp} = 0,5 I_{нг}$ , если принимать каждое из значений  $I_1$ , имевших место в опыте, за  $I_{нг}$ . Этот опыт показывает, что даже при  $r_2' \ll 40 \text{ ом}$  реле достаточно надежно отстроено от  $I_2$ . Для количественной оценки устойчивости схемы по отношению к данному виду повреждений была снята зависимость  $I_2 = f(I\omega_1)$  при  $r_2' = 43 \text{ ом}$  (см. кривую 2 фиг. 6). При этом для каждого отсчета было принято  $I\omega_1 = I_{нг}$ . Сопротивление цепи реле подсчитывалось как

$r_2 = 43 \left( \frac{100}{I \omega_1} \cdot 5 \right)$ , так как  $\omega_3 \cong \frac{I \omega_1}{5}$ . Рассчитанные таким образом

величины сопротивлений  $r_2$ , которые вводились в цепь реле в данном опыте, на фиг. 6 подписаны под соответствующими им значениями  $I \omega_1$ . Кривая 2 на фиг. 6 показывает, что запас надежности при  $I_{ср} = 0,5 I_{НГ}$  и рекомендуемой настройке схемы составляет не менее 2. Следовательно и при обрыве цепи циркуляции токов ложное действие защиты невозможно.

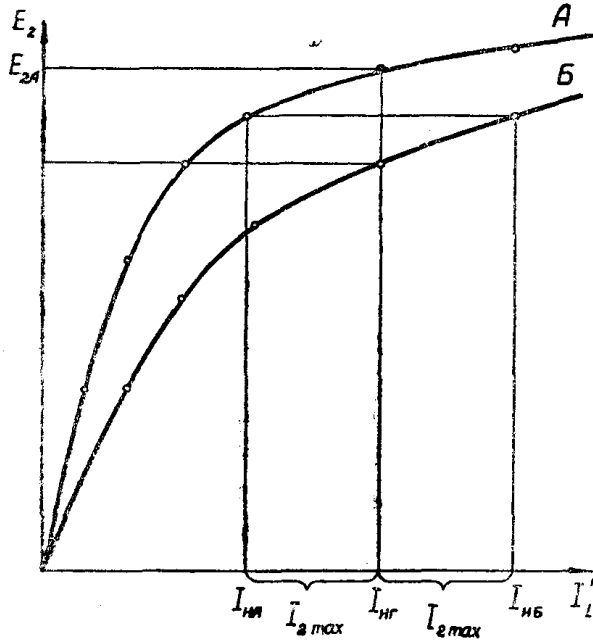
Устойчивость схемы по отношению к этому виду повреждения может быть проверена посредством графоаналитического расчета по известным параметрам схемы и характеристикам холостого хода

трансформаторов тока. В самом деле, ток  $I_2$  в схеме фиг. 5 может быть выражен через ее параметры следующим образом:

$$I_2 = \frac{E_A - E_B}{z_2}, \quad (6)$$

$$I_2 = I_1' \frac{z_{МА} - z_{МБ}}{z_2 + z_{МА} + z_{МБ}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) показывает, что ограничивающее влияние  $z_2$  на ток  $I_2$  будет заметно сказываться только в случае, если величины  $z_2$  и  $z_{МА} + z_{МБ}$  будут соизмеримыми. При трансформаторах тока класса "Д"  $z_2$  будет отличаться от  $z_{МА} + z_{МБ}$  не менее, чем на один порядок. Поэтому вектора  $I_2$  и  $I_1'$  будут практически



Фиг. 7.

совпадать по фазе, а  $E_A$  и  $E_B$  — будут сдвинуты на угол приблизительно  $180^\circ$ .

Эти соображения дают возможность пользоваться следующей методикой расчета. На фиг. 7 приведены характеристики холостого хода  $E_2 = f(I_1')$  в действующих значениях. Очевидно, что если бы  $z_2 = \infty$  и  $I_2 = 0$ , то токи намагничивания были бы равны  $I_{НА} = I_{НБ} = I_1'$ . Тогда при  $I_1' = I'_{НГ}$  мы имели бы по кривым холостого хода  $E_A$  и  $E_B$  для этого случая. Если же  $I_2 \neq 0$ , то  $I_{НА} = I_1' - I_2$  и  $I_{НБ} = I_1' + I_2$ , а

$$I_2 = \frac{I_{НБ} - I_{НА}}{2}. \quad (8)$$

Отложив от значения  $I_1' = I'_{НГ}$  в обе стороны  $I_2$ , получим величины токов намагничивания  $I_{НА}$  и  $I_{НБ}$ , которым будут соответствовать э. д. с.  $E_A$  и  $E_B$ . То обстоятельство, что э. д. с. трансформаторов тока А и Б неравны, указывает на наличие во вторичном контуре сопротивления величиной

$$r_2 = \frac{E_A - E_B}{I_2}.$$



Если бы сопротивление  $r_2$  оказалось пренебрежительно малым, то  $E_A \cong E_B$ , и при этом мы имели бы наибольший возможный ток в цепи реле.

Отсюда следует, что для отыскания  $I_{2max}$  достаточно совместить на одном графике кривые холостого хода трансформаторов тока  $E_2 = f(I_1)$ , восстановить перпендикуляр из точки на оси  $I_1$ , соответствующей желаемому значению первичного тока, и провести горизонталь между кривыми  $E_2 = f(I_1)$  таким образом, чтобы перпендикуляр делил ее на равные отрезки. Тогда каждый из этих отрезков в масштабе  $I_1$  будет равен току  $I_{2max}$  в действующих значениях. Аналогично может быть рассчитан ток  $I_2$  с учетом влияния  $r_2$  (если соблюдается неравенство  $r_2 \ll z_{MA} + z_{MB}$ ). При этом задача усложняется тем, что по графику фиг. 7 приходится подбирать такое значение тока  $I_2$ , которое удовлетворяло бы уравнению (6).

Изложенная методика расчета дает весьма ограниченную точность по следующим причинам:

1. Не учитывается несинусоидальность тока  $I_2$ . Между тем вследствие значительных насыщений сердечников ток  $I_2$  содержит высокий процент высших гармонических.

2. Точность графических построений не может быть высокой, так как в области построений кривые идут весьма полого.

3. Невозможно учесть влияние индуктивности вторичной цепи на высшие гармонические тока  $I_2$ .

Чтобы иметь некоторый запас надежности в результатах расчета, ограничивающее влияние сопротивления  $r_2$  на ток  $I_2$  учитывать не следует.

Для проверки изложенной методики расчета кривая 1 на фиг. 6 была построена расчетным путем (см. пунктирную линию на фиг. 6) до значений  $I\omega_1 = 1500$  а, при котором можно еще считать, что  $r_2 \ll z_{MA} + z_{MB}$  ( $r_2 = 1$  ом),  $z_{MA} + z_{MB} = 13,3$  ом). Из сопоставления опытной и расчетной кривых на фиг. 6 следует, что погрешность расчета не превосходит (10–15)%. Такая погрешность соизмерима с погрешностью, которая может иметь место при настройке схемы и поэтому приемлема с точки зрения инженерных расчетов.

## Выводы

1. Продольная дифференциальная защита с равновесием э. д. с. может с успехом применяться для защиты мощных гидрогенераторов. При этом высокая селективность достижима при  $I_{1cp} = (0,4–0,6) I_{НГ}$  ( $\kappa_H = 3$ ).

2. Высокая селективность достигается за счет снижения чисел витков вторичных обмоток трансформаторов тока, соединенных на равновесие э. д. с., с таким расчетом, чтобы приведенное значение суммы сопротивлений соединительных проводов и этих обмоток составляло бы  $r'_2 = (40–60)$  ом, если  $I_{1cp} = (0,4–0,6) I_{НГ}$ , и  $r'_2 = (20–30)$  ом, если  $I_{1cp} = (1,2–1,5) I_{НГ}$ .

3. Схема обладает чрезвычайно высокой надежностью. Ни один из видов повреждений схемы не вызывает ложной работы защиты даже при  $I_{1cp} = (0,4–0,6) I_{НГ}$ . При этом запас надежности составляет не менее 2 при самых опасных повреждениях. Повреждение может быть легко обнаружено посредством применения обычной для дифференциальной защиты схемы сигнализации.

4. Высокие коэффициенты надежности в отношении селективности и устойчивости против повреждений в ее цепях свидетельствуют

о нецелесообразности специального подбора трансформаторов тока в комплект для дифференциальной защиты генераторов с равновесием э. д. с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Царев М. И. Дифференциальная защита генераторов с вспомогательными быстронасыщающимися трансформаторами, Электрические станции, 1949, № 7.
2. Дроздов А. Д. О дифференциальной защите генераторов и трансформаторов, Электрические станции, № 9, 1955.
3. Зевеке Г. В. Дифференциальная защита электрических машин, Электрические станции, № 1, 1940.
4. Кутявин И. Д., Багинский Л. В., Багинская А. С. Повышение селективности дифференциальной защиты генераторов путем включения в цепи реле добавочных сопротивлений, Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, т. 98, 1959.
5. Кутявин И. Д. О способах уравнивания плеч дифференциальной защиты генераторов. Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, т. 70, 1951.
6. Нечаев Б. А. Трансформаторы тока с малым сечением стали в схемах дифференциальных защит генераторов, Электрические станции № 1, 1956.
7. Багинский Л. В. О применении трансформаторов тока с малым объемом стали для дифференциальной защиты генераторов, Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, т. 94, 1959.