

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО МАГНЕТИЗМА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА РАБОТУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

И. Д. КУТЯВИН

(Представлено проф. доктором техн. наук В. К. Щербаковым)

Всякий переходный процесс в первичной обмотке трансформаторов тока, сопровождающийся появлением в токе намагничивания апериодической составляющей, создает в их сердечниках остаточный магнетизм [1,2].

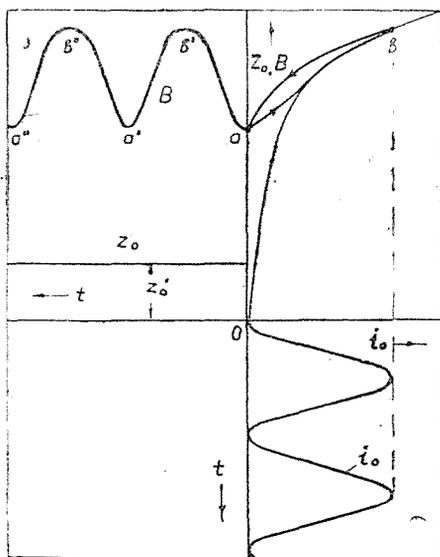
Как показали исследования Н. П. Поташева [1,2] и других авторов, остаточная индукция в сплошных сердечниках трансформаторов тока может достигать 6—7 кГс и весьма устойчива в условиях нормального режима работы. Однако надо иметь в виду, что трансформаторы одной и той же фазы рассматриваемых защит могут иметь разные сопротивления вторичных цепей, что имеет особенное значение при коротких замыканиях в первичной цепи, а также могут находиться в разных условиях в отношении механических вибраций и окружающей температуры. Так, например, трансформаторы тока дифференциальной защиты генераторов, расположенные в распредустройстве, не подвержены механическим вибрациям и в зимнее время могут находиться в условиях отрицательной температуры. Трансформаторы тока, расположенные на нулевых выводах, имеют высокую положительную окружающую температуру и находятся в условиях постоянной вибрации несущих конструкций. Указанный режим продолжается от одного короткого замыкания до другого в течение нескольких недель или даже месяцев. Это может привести к тому, что сердечники трансформаторов тока одной и той же фазы дифференциальной защиты генераторов перед следующим коротким замыканием вне зоны могут иметь разный по величине остаточный магнетизм. Сердечники трансформаторов тока одной и той же фазы дифференциальной защиты шин (и трехобмоточных трансформаторов) могут иметь разный остаточный магнетизм не только по величине, но и по знаку. Это объясняется тем, что внешние короткие замыкания могут происходить на разных отходящих линиях. При этом трансформаторы тока отходящей линии будут участвовать в проведении тока короткого замыкания только при повреждении данной линии, а трансформаторы питающих линий—во всех случаях.

Наличие разного остаточного магнетизма трансформаторов одной и той же фазы вызывает появление больших токов небаланса при сквозных коротких замыканиях и часто приводит к неправильной работе защиты.

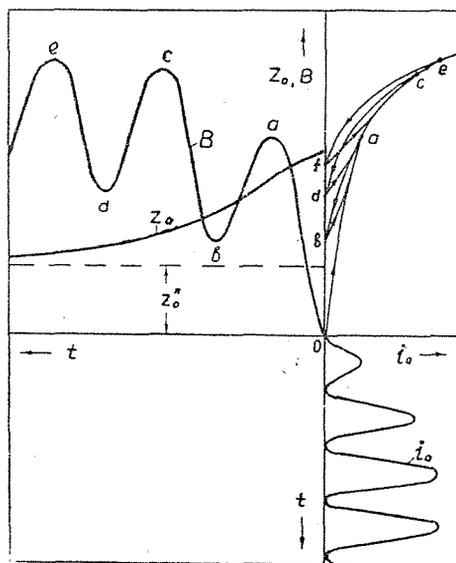
С целью снижения токов небаланса дифференциальной защиты генераторов трансформаторы тока, предназначенные для ее осуществления, подбираются заводом-изготовителем в комплект таким образом, что трансформаторы одной и той же фазы поставляются с одинаковыми характеристиками холостого хода. Однако необходимо иметь в виду, что форма указанных характеристик в условиях эксплуатации будет зависеть также

и от появления в сердечниках трансформаторов остаточного магнетизма, который может очень сильно исказить эти характеристики.

Для иллюстрации к сказанному на фиг. 1 показан процесс намагничивания сердечника трансформатора тока при коротком замыкании в первичной цепи, когда сталь сердечника имела перед коротким остаточную индукцию  $+B_0 = \overline{oa}$ . Для большей наглядности примера взят частный случай, когда индукция  $B_0$ , имевшаяся в стали до наступления короткого замыкания, равна остаточной индукции, устанавливающейся при данном переходном процессе. В этом случае изменение индукции  $B$  в зависимости от намагничивающего тока  $i_0$  будет происходить по частной гистерезисной петле  $ab$  в направлении стрелок, а в зависимости от времени  $t$  — по кривой, указанной слева. При этом среднее насыщение стали остается постоянным, сопротивление намагничивания трансформатора  $Z_0 = f(t)$  также не меняется (см. на фиг. 1 слева), не меняется и амплитуда тока  $i_0$ .



Фиг. 1.



Фиг. 2.

На фиг. 2 представлен характер изменения индукции в сердечнике трансформатора тока  $B$  и сопротивления намагничивания  $Z_0$  при коротком замыкании в первичной цепи, когда сталь сердечника перед переходным процессом была полностью размагничена. Начальное намагничивание стали происходит в этом случае по кривой  $oa$  при изменении тока  $i_0$  за первый полупериод от 0 до  $2i_{m0}$ , а последующие изменения индукции  $B = \varphi_1(i_0)$  будут происходить по частным гистерезисным петлям  $ab, bc, cd, de$  и т. д. в направлении стрелок. В соответствии с этим индукция в стали  $B = \varphi_2(t)$  будет меняться по кривой  $o, a, b, c, \dots$  указанной слева. При этом насыщение стали сердечника с течением времени нарастает, нарастает и амплитуда намагничивающего тока  $i_{m0}$ , а сопротивление  $Z_0 = f_2(t)$  уменьшается, асимптотически приближаясь к  $Z_0''$ .

Наконец, на фиг. 3 показано изменение тех же величин для случая, когда до наступления переходного процесса сталь сердечника трансформатора имела отрицательную остаточную индукцию  $-B_0 = \overline{oa}$ . С наступлением переходного процесса индукция в стали сердечника  $B = \varphi_2(t)$  в течение нескольких первых полупериодов переходит из отрицательной области в положительную и быстро увеличивается, изменяясь в направлении  $a, b, c, d, \dots$ . Сопротивление намагничивания  $Z_0 = f_2(t)$  в начале процесса

имеет большую величину, так как намагничивание стали происходит в области, близкой к наибольшей магнитной проницаемости, а затем с ростом насыщения стали это сопротивление резко уменьшается, приближаясь к  $Z''_o$ . В связи с уменьшением  $Z_o$  амплитуда тока намагничивания увеличивается от одного полупериода к другому.

Кривые фигур 1, 2 и 3 построены приближенно и характеризуют лишь физическую сторону процесса изменения величин  $i_o$ ,  $B$  и  $Z_o$  трансформатора тока при коротком замыкании в первичной цепи и при различных значениях остаточного магнетизма. При составлении этих фигур принят ряд допущений, из которых укажем следующие:

1) считалось, что аperiodическая составляющая тока намагничивания в любой момент времени равна амплитуде периодической;

2) точка  $b$  на фиг. 1, точки  $a$ ,  $c$ ,  $e$  на фиг. 2 и точки  $g$ ,  $k$  и  $m$  фиг. 3 лежат на кривой начального намагничивания. В действительности эти точки лежат на кривых последующего намагничивания, начинающихся в точке  $a$  фиг. 1, в точках  $b$ ,  $d$  и  $f$  фиг. 2 и в точках  $h$ ,  $l$ ,  $n$  на фиг. 3, лежащих выше кривой начального намагничивания.

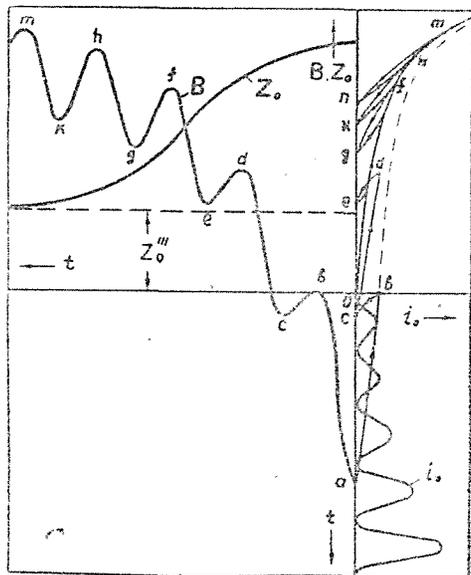
Минимальные сопротивления намагничивания  $Z'_o$ ,  $Z''_o$  и  $Z'''_o$ , к которым стремится сопротивление  $Z_o$  на фигурах 1—3, находятся в следующем соотношении:  $Z'_o \ll Z''_o \ll Z'''_o$ .

Знак равенства здесь будет иметь место при очень больших насыщениях стали и большой постоянной времени вторичной цепи трансформатора.

Начальные значения сопротивления  $Z_o$  на фигурах 2 и 3 будут разные, причем  $Z''_{on} \ll Z'''_{on}$ , так как на фиг. 3 перемагничивание стали происходит из отрицательной области в положительную, и изменение индукции в сердечнике трансформатора в первые полупериоды происходит в области, близкой к максимальной магнитной проницаемости. Этим же объясняется более быстрое снижение  $Z_o$  на фиг. 2, чем на фиг. 3. Начальное значение  $Z_o$  на фиг. 1 равно своему минимальному значению  $Z'_o$ .

Попытаемся еще найти хотя бы приближенное соотношение между начальными и минимальными значениями  $Z_o$  на фигурах 2 и 3. С этой целью необходимо учесть, что аperiodическая составляющая тока намагничивания производит подмагничивание стали сердечника и тем самым оказывает очень сильное влияние на величину сопротивления  $Z_o$ . Это видно из фиг. 4, на которой приведена зависимость  $Z_o \cong \omega L_c$  от максимальной индукции в сердечнике  $B$  при различных величинах относительной аperiodической составляющей намагничивающего тока  $\beta$ , найденных опытным путем.

Данные для построения кривых фиг. 4 получены при одновременном намагничивании стали сердечника синусоидальным и постоянным токами. Сопротивление  $\omega L_c$  определялось через отношение э.д.с. обмотки к намагничивающему периодическому току. Максимальная индукция  $B$ , откладываемая на оси абсцисс, находилась по суммарным ампервиткам, состоящим

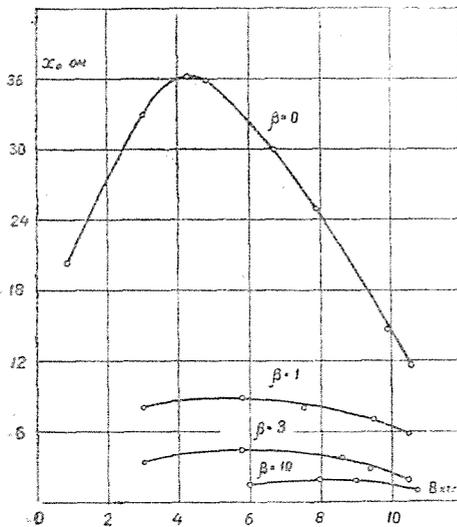


Фиг. 3.

из ампервитков синусоидального и постоянного токов. Отношение ампервитков постоянного тока к амплитудным ампервиткам переменного обозначено через  $\beta$ .

Для фигур 1—3 относительный аperiodический ток  $\beta = 1$ . Как показали исследования многих авторов при трансформации токов короткого замыкания, содержащих большую аperiodическую составляющую, величина  $\beta > 1$ . Рассмотрим теперь интересующий нас вопрос.

Минимальное значение  $Z_0$  на фиг. 1—3 наступает при  $\beta = 1$  и при достижении током намагничивания наибольшей величины. Величина сопротивления  $Z_0$  при этом режиме (или сопротивления  $Z'_0, Z''_0, Z'''_0$ ) характеризуется кривой  $\beta = 1$  (фиг. 4) (сопротивление  $Z_0 = \omega L_0$ ). В течение нескольких первых полупериодов ампервитки аperiodической составляющей на фигурах 2 и 3 затрачиваются на перемагничивание стали, поэтому начальное значение  $Z_0$  на этих фигурах, характеризующееся наклоном частных гистерезисных петель, определяется кривой  $\beta \cong 0$ , фиг. 4. Сравнение кривых при  $\beta = 0$  и  $\beta = 1$  фиг. 4 показывает, что начальное значение  $Z_0$  может быть больше минимального в несколько раз (на фиг. 4 в 4 раза). В действительности величины сопротивлений  $Z'_0, Z''_0$  и  $Z'''_0$  будут значительно меньше указанных, так как максимальный переходный намагничивающий ток часто имеет  $\beta > 1$ .



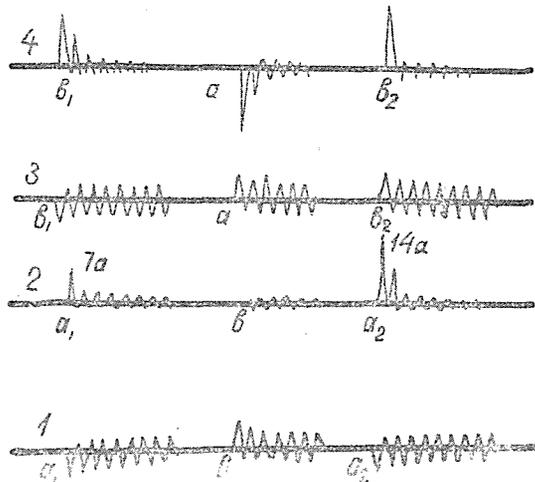
Фиг. 4.

быть разного знака, поэтому разница в сопротивлениях намагничивания трансформаторов этих защит будет еще больше.

Как видно из фигур 2 и 3, разница между начальным и минимальным значениями сопротивлений намагничивания через несколько полупериодов исчезает, поэтому можно ожидать больших толчков тока небаланса, обусловленных влиянием остаточного магнетизма трансформаторов, только в первые полупериоды. Это подтверждается фиг. 5, на которой приведены осциллограммы первичного тока короткого замыкания (кривые 1 и 3) и соответствующего ему тока небаланса (кривые 2 и 4) для дифференциальной защиты шин, изображенной на фиг. 6. Схема была собрана из трех трансформаторов тока 1, 2 и 3 в соответствии с одной питающей линией и двумя отходящими. Трансформаторы тока имели сплошной сердечник сечением  $10 \text{ см}^2$ , набранный из стали трансформаторов тока типа ТП. Обмотки имели по 100 витков каждая. Первичный ток записывался шлейфом  $i_1$ , а ток небаланса—шлейфом  $i_{нб}$ .

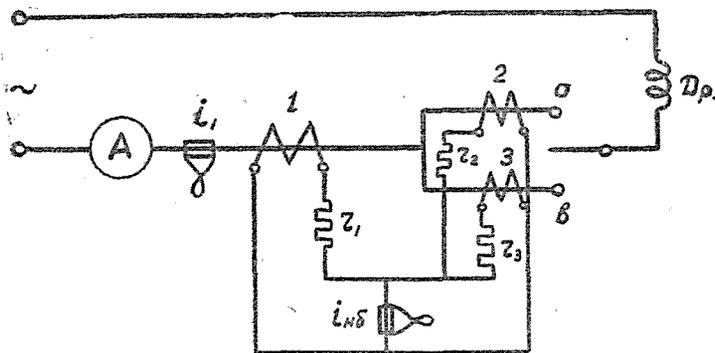
Величина первичного тока при установившемся процессе составляла  $15 a$ . Полные сопротивления плеч защиты были примерно одинаковы, а сопротивление реле было равно сопротивлению шлейфа и составляло  $0,3 \text{ ом}$ .

Для уяснения записанных на фиг. 5 процессов представим, что междуфазные короткие замыкания происходят вне зоны защиты поочередно



Фиг. 5.

на отходящих линиях  $a$  и  $b$  (фиг. 6). Эти короткие замыкания можно имитировать поочередным включением переключателя в точки  $a$  и  $b$ . Допустим, что при включении переключателя в точку  $a$  (см. кривые 1 и 2) трансформаторы тока 1 и 2 за время переходного процесса намагничиваются до некоторой отрицательной остаточной индукции в соответствии с отрицательной аperiодической составляющей первичного тока. Затем

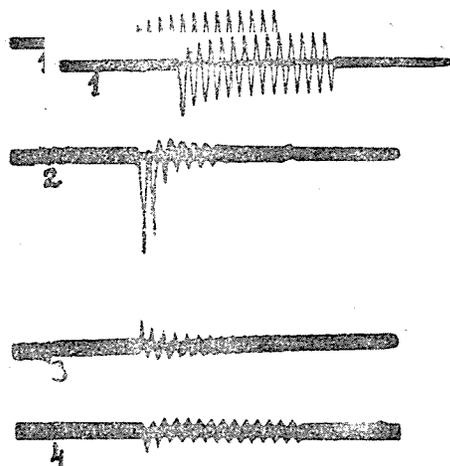


Фиг. 6.

(короткое происходит на линии  $b$ ) переключатель ставится в точку  $b$ , и трансформаторы 1 и 3 намагничиваются до некоторой положительной остаточной индукции, так как аperiодическая составляющая первичного тока положительна. Но затем короткое может произойти снова на линии  $a$ , например, с отрицательной аperiодической составляющей первичного тока (переключатель включается в точку  $a$ ). Перед этим коротким трансформатор 1 имел положительную остаточную индукцию и поэтому с наступлением короткого должен перемагничиваться так, как это показано на фиг. 3,

а трансформатор 2 имел отрицательную индукцию и будет намагничиваться в соответствии с фиг. 1. В связи с этим ток небаланса при коротком  $a_2$  в течение первых двух периодов (пока перемагничивается трансформатор 1) достигает  $14a$  при амплитуде первичного тока в  $21a$  и коэффициенте трансформации, равном 1.

Интересно отметить, что как при первом включении переключателя в точку  $a$ , так и при втором (см. кривую 1) первичный ток примерно одинаков по величине и по характеру изменения, а соответствующий ему ток небаланса (см. кривую 2) при втором включении получился в два раза больше, чем при первом. Такое же явление можно наблюдать и при изу-



Фиг. 7.

Очень интересной является фиг. 7, на которой приведена осциллограмма первичного переходного тока (кривая 1) и осциллограммы переходного тока небаланса (кривые 2—4), полученные по схеме фиг. 6.

Кривая 2 представляет осциллограмму переходного тока небаланса, снятого по схеме фиг. 6 при поочередном переключении переключателя в точки  $a$  и  $b$ . На этой осциллограмме наиболее резко отразилось влияние остаточного магнетизма трансформаторов, в связи с чем в течение нескольких первых периодов ток небаланса имеет большую величину. Кривая 3 представляет наибольший переходный ток небаланса для той же схемы (фиг. 6), но переключатель включался только в точку  $a$  (или в точку  $b$ ), поэтому трансформаторы тока, обтекаемые первичным переходным током, перед каждым переходным процессом имеют одинаковый остаточный магнетизм, ввиду этого наибольший ток небаланса оказался значительно меньше предыдущего. Наконец, кривая 4 показывает наибольший ток небаланса защиты, выполненной при помощи трансформаторов тока с воздушным зазором длиной 3 мм. Остальные данные трансформаторов и схемы защиты были такими же, как и на фиг. 6. При снятии осциллограммы 4 переключатель в схеме фиг. 6 включался поочередно в точки  $a$  и  $b$ .

Изложенное выше позволяет сделать следующие выводы:

1) начальные сопротивления намагничивания трансформаторов тока, сердечники которых имеют разный остаточный магнетизм, могут отличаться друг от друга в несколько раз, если в намагничивающем токе будет содержаться аperiodическая составляющая;

2) схемы дифференциальных защит, выполненных нормальными трансформаторами тока, подвержены влиянию остаточного магнетизма и могут иметь очень большие переходные токи небаланса;

3) схемы дифференциальных защит, выполненные трансформаторами тока с воздушным зазором, будут иметь значительно меньший ток небаланса, чем схемы, указанные в пункте 2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поташев Н. П. Работа трансформаторов тока при переходных процессах. Электрические станции, 10, 1935.

2. Поташев Н. П. Остаточная индукция в трансформаторах тока. Вестник электропромышленности, 3, 1937.

---