

## О ВЛИЯНИИ ОСТАТОЧНЫХ ИНДУКЦИЙ СЕРДЕЧНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ПЛЕЧ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

В. С. КОЛЕСНИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

Известно, что в сердечниках трансформаторов тока дифференциальной защиты при определенных условиях могут появиться и длительное время сохраняться остаточные индукции. При этом сердечники трансформаторов тока, составляющих плечи дифференциальной защиты, могут иметь остаточные индукции, разные не только по величине, но и по знаку. Наличие остаточного намагничивания, особенно при его разных знаках, приводит к значительному увеличению переходного тока небаланса дифференциальной защиты при внешних коротких замыканиях, следствием являются ложные действия защиты.

Согласно данным ряда исследователей [1], [2], [3], стандартные высоковольтные трансформаторы тока могут получить в условиях эксплуатации остаточную индукцию до 7,0–10,0 килогаус, в зависимости от сорта стали сердечников.

Ранее уже указывалось [5], что эффективность уравновешивания плеч дифференциальной защиты с быстронасыщающимися элементами практически не зависит от величин и соотношения знаков остаточных индукций в сердечниках трансформаторов тока. В настоящей статье рассматриваются некоторые закономерности переходных процессов во вторичных цепях дифференциальной защиты, позволяющие в значительной степени объяснить сохранение эффекта равновесия плеч, несмотря на наличие остаточного намагничивания в трансформаторах тока.

Прежде всего оценим влияние остаточных потоков на величину и характер изменения во времени токов намагничивания трансформаторов тока, полагая, что эти трансформаторы соединены дифференциально по схеме циркуляции токов. На рис. 1 приведены кривые изменения магнитных индукций в сердечнике одного из трансформаторов тока (ТТ-1) во время переходного процесса при разных по величине и знаку остаточных индукциях. На рис. 2 изображены кривые изменения токов (намагничивания трансформаторов тока ТТ-1 (кривые 1 и 1') и ТТ-2 (кривая 2)). Зависимости  $B(t)$  и  $i_0(t)$  получены в результате графических расчетов, выполненных по методике Ю. М. Коршунова [4], с учетом перемагничивания по частным кривым намагничивания. Расчет произведен для случая, когда в момент включения первичного тока (тока внешнего к. з.) в нем содержалась наибольшая из возможных апериодическая слагающая (то есть предполагается, что включение

происходит в момент перехода напряжения через нуль, при практически чисто индуктивном сопротивлении первичной цепи). Основные параметры трансформаторов тока приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметров	ТТ-1	ТТ-2
	2	3
Площадь поперечного сечения сердечника, $см^2$	6,0	17,0
Длина средней линии сердечника, $см$	24,5	52,0
Число витков вторичной обмотки	150	50
Сопротивление вторичной цепи, $ом$	0,45	0,5
Кратность установившегося тока, соответствующая 10% погрешности при указанных значениях сопротивлений	42	38
Коэффициент трансформации	1,0	1,0
Номинальный первичный ток, $a$	2,0	2,0

Расчетное значение первичного тока 10 ампер, при постоянной времени первичной цепи, равной 0,07 сек. Удельные параметры трансформаторов ТТ-1 и ТТ-2 (то есть их действительные параметры, отнесенные к 1 см длины,

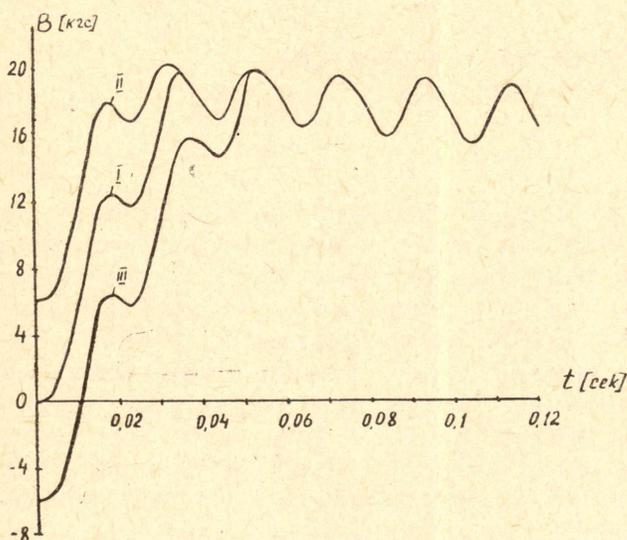


Рис. 1.

Анализируя кривые  $B(t)$  и  $i_0(t)$  (рис. 1, 2), нетрудно установить, что при совпадении знака остаточной индукции с направлением нарастания постоянной составляющей потока апериодическая составляющая тока намагничивания и соответствующий ей поток тем быстрее достигают максимума, чем больше абсолютная величина остаточной индукции.

Если же направление нарастания постоянной составляющей потока противоположно по знаку остаточной индукции, то чем больше величина этой индукции, тем позднее апериодическая слагающая тока намагничивания и соответствующего потока достигнут максимальных значений. Сопоставим кривые изменения токов намагничивания ТТ-1 (рис. 2) для следующих двух случаев:

1 см<sup>2</sup> поперечного сечения сердечника и к одному витку обмотки) [3] разнятся между собой примерно в шесть раз. Такая же разница между удельными параметрами стандартных высоковольтных трансформаторов тока ТПШФД-10 3000/5 и ТВД-110 750/5 или ТФНД-110 1500/5 и ТВД-220 600/5. Таким образом, рассматриваемая расчетная схема по своим параметрам в значительной степени приближается к реальным схемам дифференциальной защиты силовых трансформаторов.

- а) при максимальной величине остаточной индукции (6 кГс) в сердечнике трансформатора тока и совпадении знака этой индукции с направлением нарастания постоянной составляющей потока (кривая 1);
- б) при том же направлении нарастания постоянной составляющей потока и той же по величине, но противоположной по знаку остаточной индукции (кривая 1').

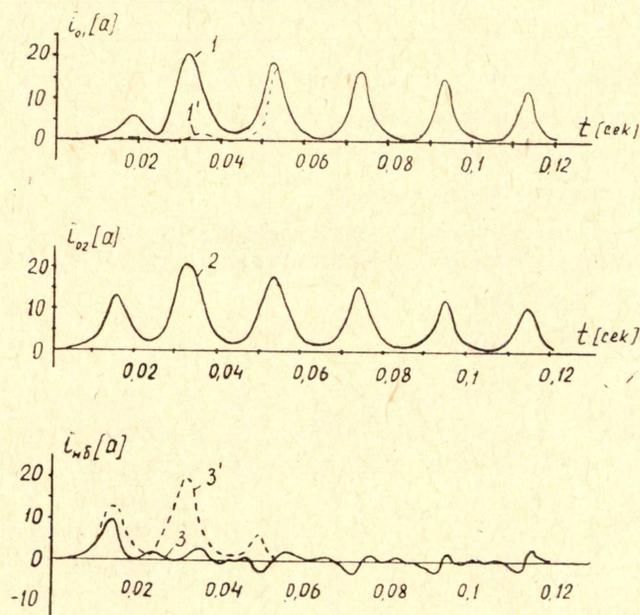


Рис. 2.

В первом случае уже на первом периоде после возникновения внешнего короткого замыкания ток намагничивания трансформатора тока достигает значительной величины (6 а или 42,5% от амплитуды первичного тока); максимум тока намагничивания наблюдается на втором периоде и достигает 21 а (149% от амплитуды первичного тока). Во втором случае в течение первых двух периодов после возникновения внешнего короткого замыкания ток намагничивания составляет не более 5—10% от амплитуды первичного тока; максимум имеет место на третьем периоде и равен 17 а (120% от амплитуды первичного тока). Вслед за этим максимумом характер изменения рассматриваемых токов намагничивания становится совершенно одинаковым (т. е. кривые 1 и 1' сливаются).

Рассмотрим теперь характер изменения тока небаланса при дифференциальном соединении ТТ-1 и ТТ-2 также для двух случаев:

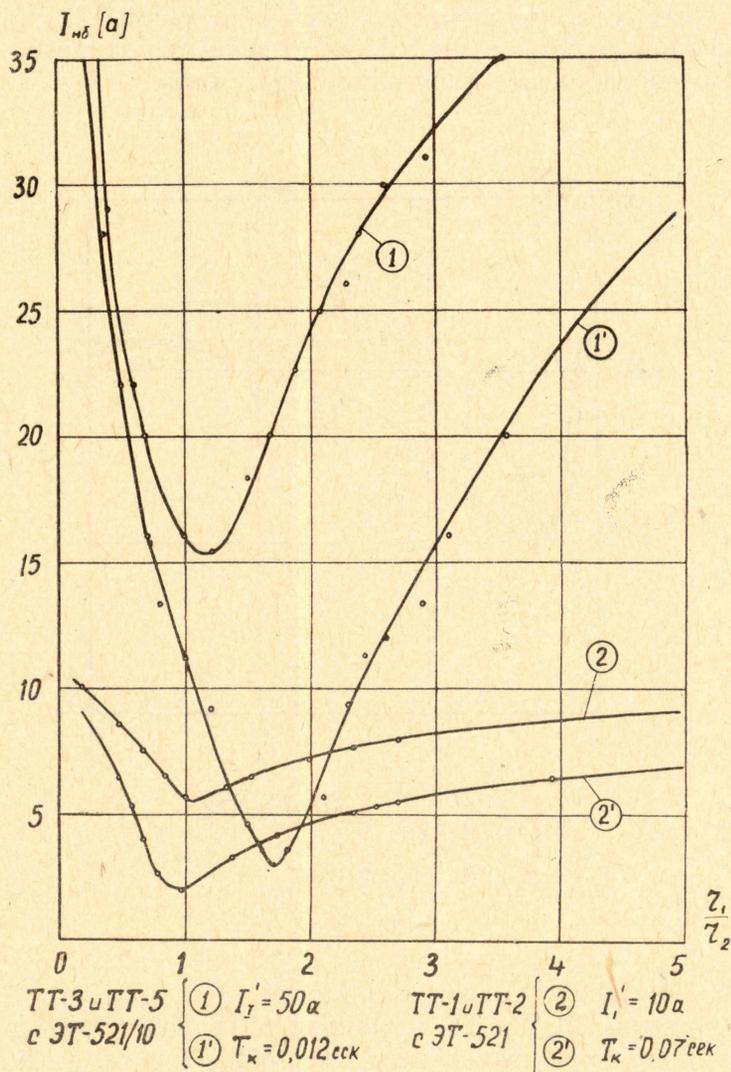
а) оба трансформатора имели перед внешним коротким замыканием максимальные (6 кГс) и одинаковые по знаку остаточные индукции;

б) оба трансформатора имели перед внешним коротким замыканием максимальные по величине, но противоположные по знаку остаточные индукции.

В первом случае (рис. 2, кривая 3) ток небаланса имеет максимум на первом периоде (10 а) и при дальнейшем развитии процесса не превышает 2,4 а (17,0% от амплитуды тока внешнего короткого замыкания). Во втором случае (рис. 2, кривая 3') весьма значительный ток небаланса наблюдается на протяжении трех периодов после возникновения внешнего короткого замыкания, причем его максимум достигает 20 а, т. е. 140% амплитуды тока внешнего короткого замыкания.

К концу третьего периода характер изменения тока небаланса становится точно таким же, как в первом случае. Необходимо особо отметить, что в течение первых трех периодов в токе небаланса преобладает аperiodическая слагающая.

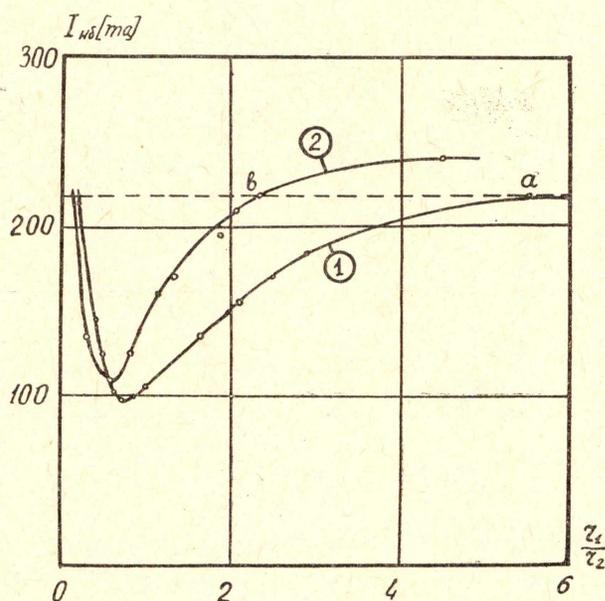
Расчетные и экспериментальные данные И. М. Сироты [3] и других авторов также доказывают резко выраженный аperiodический характер тока небаланса при наличии остаточных индукций в сердечниках дифференциально соединенных трансформаторов тока. Известно, что при наличии в схеме дифференциальной защиты быстронасыщающихся элементов и преобладании в токе небаланса аperiodической слагающей неселективные действия защиты исключены. Из вышесказанного следует, что наличие в сердечниках трансформаторов тока перед внешним коротким замыканием остаточных потоков не должно влиять на эффективность уравнивания плеч дифференциальной защиты.



Это предположение проверено экспериментально. На рис. 3 представлены кривые зависимости величин переходных токов небаланса от соотношения сопротивлений плеч дифференциальной защиты для двух случаев. В первом случае (кривые 2 и 2') соединены по схеме циркуляции токов ТТ-1 и ТТ-2 при следующих параметрах цепи: первичный ток

10 а, постоянная времени первичной цепи 0,07 сек, в дифференциальную цепь включено реле ЭТ-521/10 без быстронасыщающихся элементов.

При снятии кривых 1 и 2 перед каждым включением первичного тока (тока внешнего короткого замыкания) в сердечниках трансформаторов тока создавались остаточные индукции противоположных знаков. При снятии кривых 1' и 2' возникновение разных по знаку остаточных индукций исключалось. Рассмотрение этих кривых показывает, что разный по знаку остаточный магнетизм сильно снижает эффективность уравнивания плеч дифференциальной защиты, если последняя не оснащена быстронасыщающимися трансформаторами. Например, для пары ТТ-1 и ТТ-2 минимальное значение тока небаланса увеличивается с  $2,3a$  до  $5,6a$  (или с 23 до 56% от действующего значения первичного тока). Соответственно, для другой пары трансформаторов тока с  $2,9a$  до  $15,3a$  (или с 5,8 до 31% от действующего значения первичного тока). Вместе с тем, необходимо отметить, что и при наличии в сердечниках трансформаторов тока остаточных индукций разных знаков эффект уравнивания плеч в значительной степени сохраняется, а величина оптимального соотношения плеч изменяется мало.



ТТ-1,  $w_1=150$  с РНТ-562  
ТТ-2,  $w_2=60$

$I_{\Sigma} = 10a$   $T_K = 0,07$ сек

Рис. 4.

На рис. 4 представлены аналогичные кривые зависимости  $I_{нб} = f(\eta)$  для пары ТТ-1 и ТТ-2. Однако в данном случае в дифференциальную цепь было включено реле РНТ-562. При снятии кривой 1 появление в сердечниках трансформаторов тока разных по знаку остаточных потоков исключалось. Кривая 2 снята для случая, когда перед каждым включением первичного тока в сердечниках ТТ-1 и ТТ-2 искусственно создавались остаточные потоки разных знаков. Сопоставляя эти кривые, нетрудно установить, что в данном случае эффективность уравнивания плеч и величина оптимального соотношения их сопротивлений ( $\eta_{опт}$ ) практически не зависит от значений и знака

остаточных индукций в сердечниках трансформаторов тока. Во втором случае (кривая 2) минимальный ток небаланса во вторичной обмотке РНТ-562 увеличился на 12% (с 98 *ма* и 110 *ма*), а оптимальное соотношение сопротивлений плеч изменилось с 0,73 до 0,62.

Наряду с этим необходимо отметить, что при намагничивании сердечников трансформаторов тока в «разные стороны» уменьшается критическая кратность разбалансирования плеч (т. е. кратность, соответствующая началу неселективного срабатывания). В случае, когда перед внешним коротким замыканием появление в сердечниках трансформаторов тока разных по знаку остаточных индукций было исключено, критическая кратность разбалансирования плеч равнялась 6,5 (точка *a* кривой 1). При наличии в сердечниках трансформаторов тока разных по знаку остаточных потоков критическая кратность разбалансирования плеч снизилась до 3,8, т. е. в 1,7 раза (точка *b* кривой 2). В обоих случаях первичный ток был равен 10 *a*, коэффициенты трансформации трансформаторов тока составляли  $n_1 = 1,0$ ;  $n_2 = 1,2$ , первичный ток срабатывания РНТ-562 = 3 *a*, вторичный ток срабатывания  $I_p = 0,218$  *a*; постоянная времени первичной цепи  $T_k = 0,07$  сек.

Таким образом, анализ кривых зависимости  $i_{нб} = f(\eta)$  для обеих разновидностей схем дифференциальной защиты со всей очевидностью показывает, что при равновесии плеч отрицательное влияние остаточного магнетизма сердечников трансформаторов тока сказывается в наименьшей степени (для схем с применением быстронасыщающихся элементов, можно сказать, не сказывается совсем).

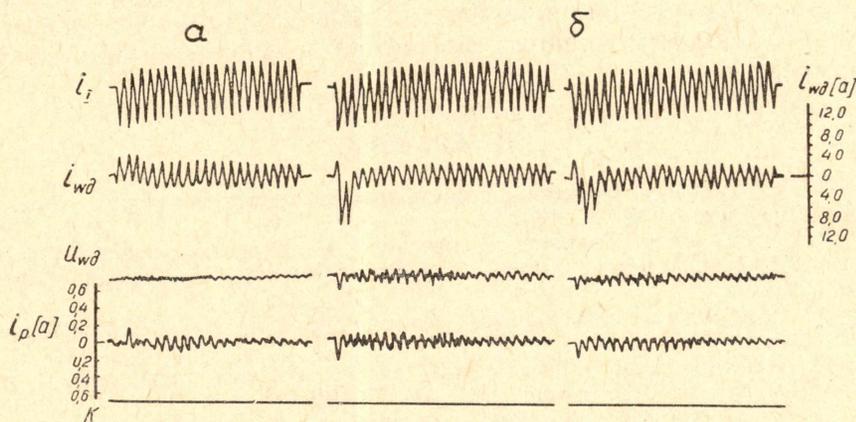


Рис. 5.

Весьма характерными являются осциллограммы, представленные на рис. 5. Осциллограмма рис. 5, *a* соответствует случаю, когда перед включением первичного тока в сердечнике ТТ-1 остаточной индукции не было, в сердечнике ТТ-2 имелась остаточная индукция порядка 5—7 *кгс*, причем направление нарастания постоянной составляющей потока совпадало со знаком этой индукции. При снятии осциллограмм рис. 5 *б* сердечники ТТ-1 и ТТ-2 перед внешним коротким замыканием имели остаточные индукции разных знаков величиной 6—7 *кгс*, причем знак индукции в сердечнике ТТ-1 совпадал с направлением нарастания постоянной составляющей потока. Соотношение сопротивлений плеч во всех трех случаях равнялось оптимальному, параметры цепи были те же, что и при снятии кривых рис. 4. Рассматриваемые осциллограммы очень наглядно иллюстрируют факт сохранения эффекта равновесия плеч дифференциальной защиты с быстронасыщающимися трансформаторами при наличии в сердечниках трансформаторов тока

разных по знаку остаточных потоков. Ввиду явно аperiodического характера тока в дифференциальной обмотке ( $i_{wd}$ ) в течение первых двух-трех периодов после возникновения короткого замыкания (рис. 5, б) ток во вторичной обмотке РНТ ( $i_p$ ) остается весьма малым.

Обобщение всего вышеизложенного позволяет сделать следующие выводы.

1. Наличие в сердечниках трансформаторов тока перед возникновением внешнего короткого замыкания неравных по величине остаточных индукций (особенно индукций разного знака) приводит к резкому нарушению равновесия плеч, если они были предварительно уравновешены путем соответствующего подбора отношения сопротивлений плеч [5], [6].

2. На втором-четвертом периоде после возникновения короткого замыкания равновесие плеч вновь восстанавливается. Это обстоятельство особенно важно для схем дифференциальной защиты с применением быстронасыщающихся трансформаторов, поскольку для таких защит особенно важно соблюдение равновесия плеч примерно с третьего по шестой период после возникновения внешнего короткого замыкания [6].

3. Переходный ток небаланса при нарушении равновесия плеч, вызываемого наличием разных по знаку остаточных потоков, содержит весьма значительную аperiodическую слагающую. Следовательно, нарушение равновесия плеч, возникающее в результате остаточного магнетизма сердечников трансформаторов тока, не должно влиять на эффективность уравновешивания плеч дифференциальной защиты, если в схеме этой защиты имеются промежуточные быстронасыщающиеся трансформаторы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Поташев. Остаточная индукция в трансформаторах тока. Вестник электропромышленности, № 3, 1937.
2. И. Д. Кутявин. Влияние остаточного магнетизма трансформаторов тока на работу дифференциальных защит. Известия Томского политехнического института, т. 82, 1956.
3. И. М. Сирота. Переходные режимы работы трансформаторов тока. АН УССР, Киев, 1961.
4. Ю. М. Коршунов. Графический метод расчета переходных процессов в трансформаторах тока. Электричество, № 10, 1953.
5. В. С. Колесников. Условие равновесия плеч дифференциальной защиты трансформатора при внешнем коротком замыкании. Изв. вузов СССР — Энергетика, № 7, 1960.
6. В. С. Колесников. О режиме работы трансформаторов тока в схемах дифференциальной защиты. Изв. вузов СССР — Энергетика, № 2, 1963.