

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН ПРИ ПОМОЩИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

И. Д. КУТЯВИН и А. С. ШАРЫГИНА

Применяемая в настоящее время дифференциальная защита сборных шин, как известно, обладает весьма малой чувствительностью и селективностью. Причиной этого является большой ток небаланса, появляющийся в цепи реле при сквозных токах короткого замыкания, содержащих значительную апериодическую составляющую. Кроме этого, на величину тока небаланса дифференциальной защиты шин оказывают большое влияние величина и знак остаточного магнетизма сердечников трансформаторов тока, участвующих в проведении сквозного тока короткого замыкания.

В связи с неудовлетворительностью применяемой дифференциальной защиты шин, за последнее время появилось много предложений по усовершенствованию этой защиты, из которых особое внимание заслуживает дифференциальная защита шин с трансформаторами тока без стальных сердечников, в которой полностью устраняется влияние остаточного магнетизма и насыщения железа на величину тока небаланса. Но трансформаторы тока с сердечниками из немагнитного материала обладают очень малой мощностью, вследствие чего возникает затруднение в выборе типа реле.

Однако этот же результат можно получить при использовании трансформаторов тока со стальными сердечниками, имеющими воздушные зазоры. При помощи воздушного зазора можно устранить влияние остаточного магнетизма и заставить трансформаторы тока работать на прямолинейной части кривой намагничивания. Для иллюстрации этого положения на рис. 1 приведены основные характеристики для трансформатора тока с коэффициентом трансформации равным единице и с сечением стального сердечника 10 см^2 . Сердечник этого трансформатора тока был набран из железа трансформатора типа ТПО и снабжен воздушным зазором в $2,5 \text{ мм}$. Первичная и вторичная обмотки имели по 100 витков каждая. Сопротивление ветви холостого хода при малых токах намагничивания составляло 3 ома ,

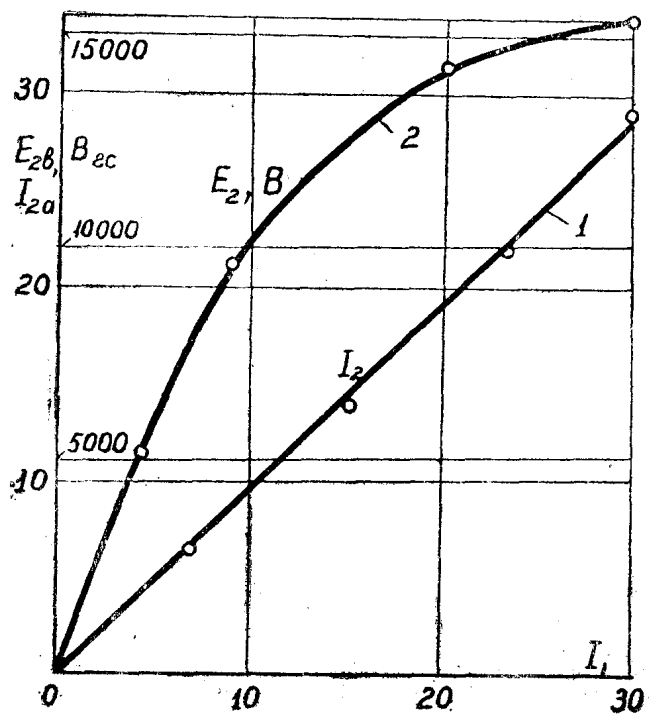


Рис. 1

Кривая 1 этого рисунка выражает зависимость вторичного тока от первичного (при сопротивлении нагрузки $0,35 \text{ ома}$) и позволяет судить о величине погрешности в токе, которая составляет для данного трансформатора примерно 5%. Интересно отметить, что погрешность в токе для трансформаторов тока с воздушным зазором будет постоянной при индукции в сердечнике до 8000—10000 гаусс и будет зависеть только от величины внешнего сопротивления.

Кривая 2 рис. 1 дает зависимость вторичной э.д.с. или индукции B от первичного намагничивающего тока I_1 , при холостом ходе трансформатора тока. Эта кривая показывает, что насыщение сердечника для данного трансформатора начинает проявляться при 1000 ампервитков, или при 22 ав/см , и что напряжение на концах разомкнутой вторичной обмотки трансформаторов тока с воздушным зазором не достигает опасной величины.

С использованием трансформаторов тока с воздушным зазором принципиально возможно применить две схемы защиты, а именно: 1) дифференциальную защиту с равновесием напряжений и 2) защиту с равновесием токов. Настоящая статья и посвящена рассмотрению этих схем защиты.

Дифференциальная защита шин с равновесием напряжений

Принципиальная схема защиты приведена на рис. 2. Трансформаторы тока в этой схеме соединяются пофазно, последовательно между собой и с реле. В отличие от защиты фирмы ASEA цепь циркуляции токов отсутствует совсем, так как при нормальном режиме работы и при сквозных коротких замыканиях напряжения на клеммах трансформаторов тока не велики.

Как известно, для селективной работы всякой дифференциальной защиты необходимо, чтобы ток трогания реле был больше максимального тока небаланса, протекающего в реле при сквозном коротком замыкании в

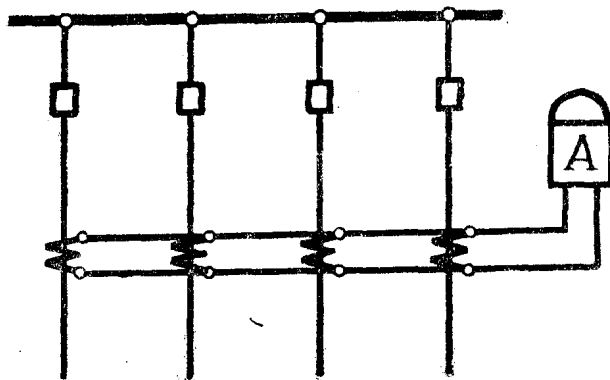


Рис. 2

первичной цепи. Поэтому необходимо установить зависимость тока небаланса от основных параметров защиты. Воспользуемся для этого схемой замещения защиты, приведенной на рис. 3, и предположим, что сквозной ток короткого замыкания протекает только в первых двух цепях в направлении стрелок. Остаточным током нагрузки остальных цепей пренебрегаем. Обозначения всех величин приведены на схеме и в дополнительных пояснениях не нуждаются. При всех выводах будем пользоваться сопротивлениями и токами, приведенными к числу витков первичной обмотки.

Сумма э.д.с. и падений напряжения во вторичной цепи защиты:

$$(I_k - I_{нб}) z_{01} + (-I_k - I_{нб}) z_{02} + I_{нб} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_{03} + z_{04} + z_p). \quad (1)$$

Ток небаланса на основании (1):

$$I_{нб} = \frac{I_{к}(z_{01} - z_{02})}{(z_{01} + z_1) + (z_{02} + z_2) + (z_{03} + z_3) + (z_{04} + z_4) + z_p} \quad (2)$$

Для упрощения задачи можно пренебречь разницей в сопротивлениях цепей намагничивания $z_{01}, z_{02} \dots$ и в сопротивлениях вторичных обмоток

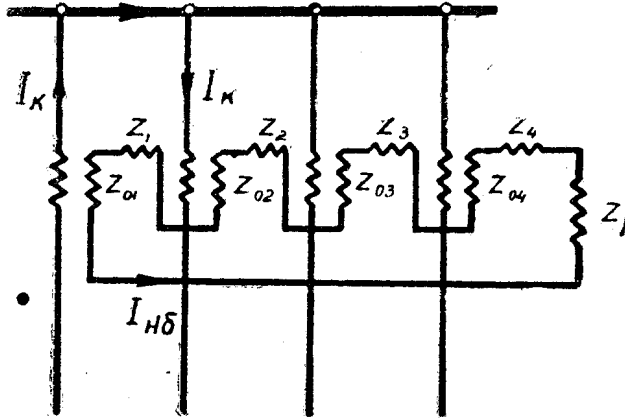


Рис. 3

трансформаторов $z_1, z_2 \dots$, входящих в знаменатель выражения (2), считая, что

$$z_{01} + z_1 = z_{02} + z_2 = z_{03} + z_3 = z_{04} + z_4 = z_x \quad (3)$$

Кроме того, число трансформаторов тока, включенных последовательно в схему, обозначим через m . Тогда выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$I_{нб} = \frac{I_{к}(z_{01} - z_{02})}{mz_x + z_p} \quad (4)$$

Как видно из (4), ток небаланса зависит не только от параметров трансформаторов тока, но и от числа их, включенных в схему.

Аналогичную выражению (4) зависимость можно получить и для любого числа трансформаторов, участвующих в работе. Пусть, например, в схеме рис. 3 короткое замыкание произошло на крайнем правом фидере с током I_4 , а левые фидеры подпитывают точку короткого замыкания, посылая на шины токи I_1, I_2 и I_3 так, что первичные токи имеют следующее соотношение:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 \quad (5)$$

Сумма э.д.с. и падений напряжения будет иметь следующее выражение:

$$\begin{aligned} (I_1 - I_{нб})z_{01} + (I_2 - I_{нб})z_{02} + (I_3 - I_{нб})z_{03} + (-I_4 - I_{нб})z_{04} = \\ = I_{нб}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_p). \end{aligned} \quad (6)$$

Ток небаланса из выражения (6)

$$I_{нб} = \frac{I_{01}z_{01} + I_2z_{02} + I_3z_{03} - I_4z_{04}}{mz_x + z_p} \quad (7)$$

Если положить $z_{01} = z_{02} = z_{03}$, то выражение (7) превращается в (4).

Зависимость $I_{нб}$ от тока короткого замыкания показана на рис. 4, из которого видно, что эта зависимость имеет форму кривой намагничивания. Сказанное объясняется тем, что ток небаланса пропорционален сумме э.д.с. цепи, которые имеют форму кривой намагничивания (кривая 2

рис. 1), так как, несмотря на наличие у сердечника воздушного зазора, при больших намагничивающих токах начинает проявляться насыщение железа.

На рис. 4 показана также зависимость тока небаланса от числа трансформаторов тока в схеме. При увеличении числа последовательно соединенных трансформаторов ток небаланса уменьшается, что вполне согласуется с выражениями (4) и (7). Уменьшение $I_{нб}$ на рисунке происходит несколько быстрее ввиду появления насыщения железа.

Кривые тока небаланса, подобные кривым рис. 4, легко могут быть сняты при наладочных испытаниях защиты путем подачи на шины нагрузочного тока или подъемом тока с нуля, приключенного непосредственно

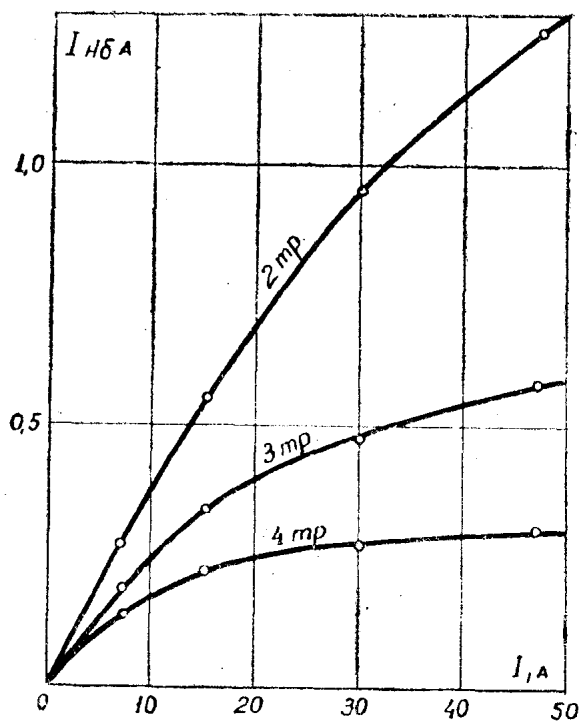


Рис. 4

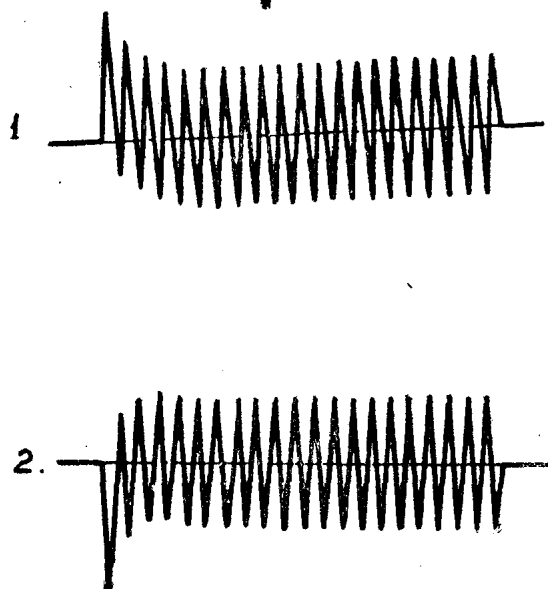


Рис. 5

к шинам специально выделенного генератора. Полученные кривые можно продолжить (если иметь в виду, что форма их аналогична кривой намагничивания) до абсциссы, равной наибольшему действующему значению сквозного тока короткого замыкания, и определить таким образом максимальный периодический ток небаланса $I_{нб.м}$. Но для настройки защиты необходимо знать максимальный ток небаланса, протекающий через реле при сквозных сверхтоках. Для выяснения величины тока небаланса при этом режиме было снято несколько десятков осциллограмм, одна из которых приведена на рис. 5. Кривая (1) этого рисунка выражает изменения первичного сверхтока, а кривая (2) — тока небаланса. Как и следовало ожидать, амплитуда периодического тока небаланса остается постоянной в течение всего времени переходного процесса и равна амплитуде установившегося тока, так как насыщение железа трансформатора отсутствует.

Апериодический ток небаланса и в этом случае будет состоять из двух составляющих: из части апериодической составляющей, генерируемой вторичной цепью трансформаторов тока, и из части апериодической составляющей первичного тока.

В первый момент переходного процесса превалирующее значение имеет первая составляющая апериодического тока, но затем эта составляющая быстро затухает, поэтому апериодический ток небаланса, прежде чем за-

тухнуть, меняет свой знак. Это объясняется тем, что постоянная времени T_2 вторичной цепи трансформаторов тока с воздушным зазором, применявшихся в наших опытах, была меньше постоянной времени первичной цепи T_1 . Надо ожидать, что и в реальных условиях эксплуатации в большинстве случаев мы будем иметь такое соотношение между постоянными времени.

Из изложенного выше вытекает, что ток небаланса будет иметь наибольшее значение в первом полупериоде после начала переходного процесса. Если при этом пренебречь затуханием полного апериодического тока, что увеличит коэффициент надежности, то действующее значение полного тока небаланса $I_{нбр}$ можно определить на основании следующего:

$$I_{нбр} = \sqrt{3} \cdot I_{нбм}, \quad (8)$$

где $I_{нбм}$ — максимальный периодический ток небаланса, определенный описанным выше способом для максимального сквозного сверхтока.

Ток трогания реле мгновенного действия должен быть больше тока $I_{нбр}$, определенного из (8):

$$I_{рт} = k_n I_{нбр} = \sqrt{3} k_n I_{нбм}, \quad (9)$$

где $k_n > 1$ — коэффициент надежности, величину которого можно установить только на основе опыта эксплуатации.

При опытном определении величины $I_{нбм}$ описанным выше способом необходимо иметь в виду, что величина этого тока будет зависеть также от числа и сочетания трансформаторов тока, участвующих в проведении сквозного сверхтока.

Однако, чувствительность защиты зависит не только от величины тока небаланса, но и от тока в реле при повреждениях в зоне защиты, а следовательно, и от точности работы трансформаторов тока.

Для выяснения зависимости тока в реле от тока повреждения воспользуемся схемой рис. 3. Предположим, что повреждение произошло на защищаемых шинах и ток повреждения подтекает к шинам только по крайнему левому фидеру.

Тогда на основании второго закона Кирхгофа:

$$(I_k - I_p) z_{01} = I_p (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_{02} + z_{03} + z_{04} + z_p). \quad (10)$$

Ток в реле из (10)

$$I_p = \frac{I_k z_{01}}{m z_x + z_p}. \quad (11)$$

В случае питания шин по трем левым фидерам (рис. 3) и при повреждении в зоне защиты в выражении (7) ток $I_4 = 0$. Тогда ток в реле будет иметь следующее выражение:

$$I_p = \frac{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03}}{m z_x + z_p}. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) вытекает, что ток в реле при повреждении на защищаемых шинах также обратно пропорционален числу трансформаторов тока, включенных последовательно в схему защиты. Сказанное хорошо иллюстрируется рис. 6, на котором построена зависимость I_p от тока короткого замыкания, полученная опытным путем.

Выражения (11) и (12) практически одинаковы и при $z_{01} = z_{02} = z_{03}$ выражение (12) превращается в (11).

Сравнение выражений (4) и (11), (7) и (12) показывает, что ток небаланса в реле при сквозных сверхтоках и ток в реле при повреждении на

защищаемых шинах имеют одинаковую закономерность зависимости от числа включенных в схему трансформаторов и сопротивления реле. Поэтому чувствительность данной защиты не будет зависеть от числа фидеров, присоединенных к защищаемым шинам.

Если чувствительность защиты определять как отношение тока небаланса из (4) или (7) к току в реле при повреждении на шинах из (11)

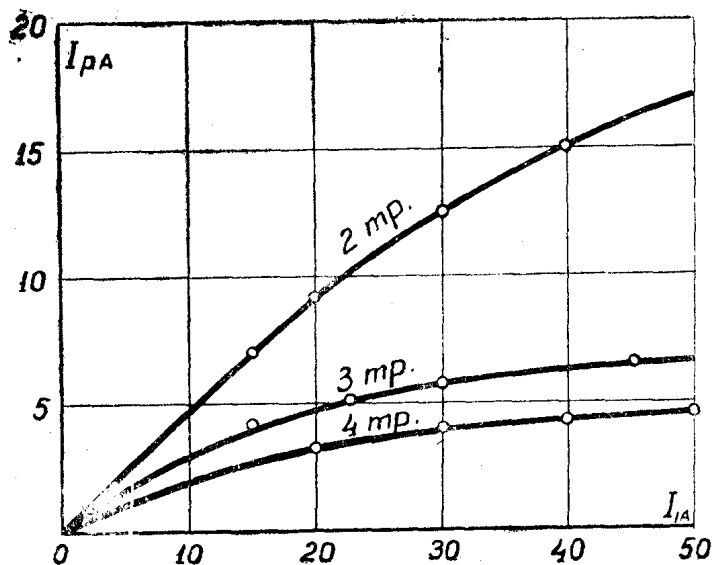


Рис. 6

или (12), то эта чувствительность на основании (4) и (11) будет иметь следующее выражение:

$$\alpha = \frac{I_{нб}}{I_p} = \frac{z_{01} - z_{02}}{z_{01}} \quad (13)$$

То же на основании (7) и (12):

$$\alpha = \frac{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03} - I_4 z_{04}}{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03}} \quad (14)$$

И здесь выражение (14) при $z_1 = z_{02} = z_{03}$ превращается в (13).

Кроме того, выражения (13) и (14) подтверждают сделанный выше вывод, что чувствительность данной защиты не будет зависеть от сопротивления реле z_p и числа трансформаторов тока в фазе m .

Далее можно доказать, что данная защита будет иметь оптимальную чувствительность при $z_p = mz_x$. Для доказательства этого определим значение суммы ΣIz , находящейся в числителе правой части выражения (12), как функции I_{pT} .

$$\Sigma Iz = I_{pT}(mz_x + z_p) = mz_x I_{pT} + \frac{s_p}{I_{pT}}, \quad (15)$$

где s_p — мощность, потребляемая катушкой реле при токе трогания.

Первая производная функции $\Sigma Iz = f(I_{pT})$:

$$\frac{d(\Sigma Iz)}{dI_{pT}} = mz_x - \frac{s_p}{I_{pT}^2} = mz_x - z_p = 0, \quad (16)$$

откуда получаем, что $z_p = mz_x$. (17)

Ток трогания, соответствующий оптимальным условиям работы защиты:

$$I_{pT} = \sqrt{\frac{s_p}{mz_x}} \quad (18)$$

Все опыты с данной схемой защиты произведены с использованием описанных вначале трансформаторов тока при $z_p = 0,35 \text{ ом}$ (в сопротивление z_p включается и сопротивление соединительных проводов).

Дифференциальная защита шин с равновесием токов

Принципиальная схема защиты для одной из фаз приведена на рис. 7. Вторичные обмотки трансформаторов тока в рассматриваемой схеме при нормальном режиме и при сквозных сверхтоках обтекаются вторичным током, создающим размагничивающее действие на первичную; поэтому индукция в сердечниках трансформаторов тока в данной схеме защи-

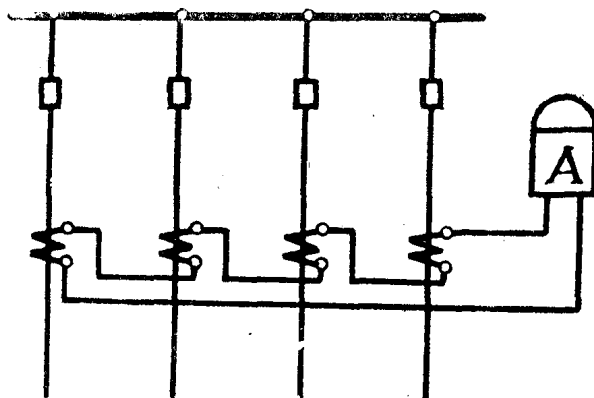


Рис. 7

ты, при прочих равных условиях, будет меньше, чем в защите с равновесием напряжений, рассмотренной выше. Вследствие этого данная защита будет иметь меньший ток небаланса по сравнению с предыдущей.

При определении величины тока небаланса для данной схемы рассмотрим вначале также наиболее простой случай, когда в проведении сквоз-

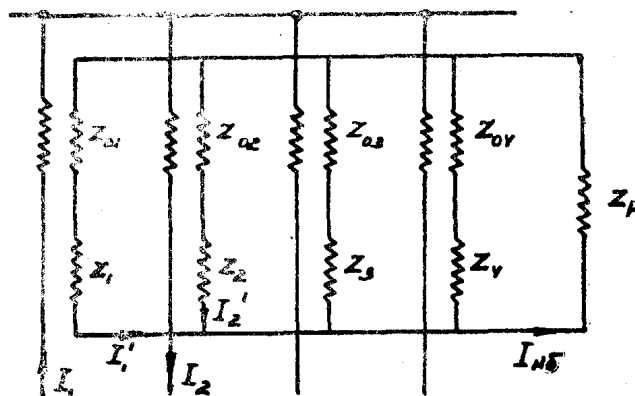


Рис. 8

ного сверхтока участвуют только два левых трансформатора. Схема замещения для этого режима показана на рис. 8.

Предположим, что в первичной цепи протекает ток I_1 только по крайнему левому фидеру. Тогда мы можем написать следующее соотношение, используя принятые ранее обозначения:

$$(I_1 - I_1') z_{01} = I_1' z_1 + I_1' \frac{z_x z_p}{z_x + (m - 1) z_p} \quad (19)$$

Из уравнения (19) можно определить ток I_1' :

$$I_1' = \frac{I_1 z_{01} [z_x + (m-1) z_p]}{z_x (z_x + m z_p)} \quad (20)$$

Определим теперь ту часть тока I_1' , которая попадает в реле:

$$I_{p1} = I_1' \frac{z_x}{z_x + (m-1) z_p} = \frac{I_1 z_{01}}{z_x + m z_p} \quad (21)$$

Аналогичные выражения можно получить и для токов в реле, посылаемых трансформаторами тока других фидеров.

Тогда ток небаланса в реле в рассматриваемом случае, при участии в проведении сквозного сверхтока только двух левых фидеров, будет иметь следующее выражение:

$$I_{нб} = I_{p1} - I_{p2} = \frac{I_1 z_{01} - I_1 z_{02}}{z_x + m z_p} = \frac{I_1 (z_{01} - z_{02})}{z_x + m z_p} \quad (22)$$

В случае, когда питание шин проводится по трем левым фидерам, а сквозное короткое произошло на правом фидере, ток небаланса будет иметь следующее выражение:

$$I_{нб} = \frac{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03} - I_4 z_{04}}{z_x + m z_p} \quad (23)$$

Как видно из (22) и (23), и для рассматриваемой защиты ток небаланса имеет обратную зависимость от числа трансформаторов в схеме и сопротивления реле. Это подтверждается также рис. 9, на котором показана

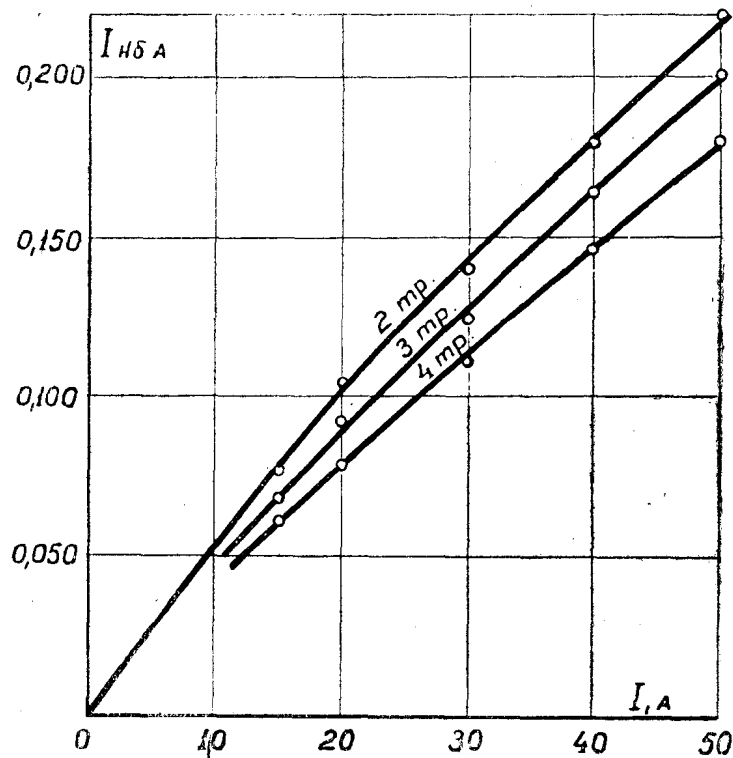


Рис. 9

зависимость $I_{нб}$ от первичного сквозного сверхтока и числа трансформаторов m , полученная опытным путем.

Кривые, аналогичные рис. 9, можно также легко получить при наладке защиты подъемом тока на шинах с нуля при закортке вне зоны защиты.

Эти кривые должны иметь форму прямой, если индукция в сердечнике не будет превышать 8000—10000 гаусс. При больших индукциях ток небаланса будет резко расти.

Предельный первичный ток, при котором индукция в сердечнике наиболее нагруженного трансформатора тока не будет превышать указанных величин, можно определить из следующего выражения:

$$I_{np} = \frac{222 q w_2 B_m n_T}{K_2 z_2 10^8}, \quad (24)$$

где q — сечение сердечника трансформатора,

w_2 — число витков вторичной обмотки,

n_T — коэффициент трансформации,

B_m — максимальная допустимая индукция,

z_2 — полное сопротивление вторичной цепи трансформатора тока вместе с соединительными проводами,

K_0 — коэффициент, учитывающий погрешность трансформатора тока и равный вторичному току, выраженному в относительных единицах от первичного. Этот коэффициент легко определить из опыта.

Для избежания появления в цепи реле больших токов небаланса необходимо, чтобы наибольший действующий ударный ток повреждения был меньше предельного тока, определенного из (24).

С целью выяснения характера изменения тока небаланса в этой схеме при сквозных сверхтоках нами также было снято несколько десятков осциллограмм, наиболее характерная из которых приведена на рис. 10. Из этого рисунка видно, что при первичном токе (кривая 1), содержащем полный аperiodический ток, аperiodическая составляющая в токе небаланса (кривая 2) почти отсутствует. Нам не удалось получить более смещенного тока небаланса, очевидно, потому, что постоянная времени вторичной цепи защиты была близка к нулю из-за весьма малой общей индуктивности параллельно включенных трансформаторов тока. Однако для увеличения надежности работы защиты, осуществленной по этой схеме, можно производить определение наибольшего расчетного тока небаланса по выражению (8), а тока трогания реле — по выражению (9).

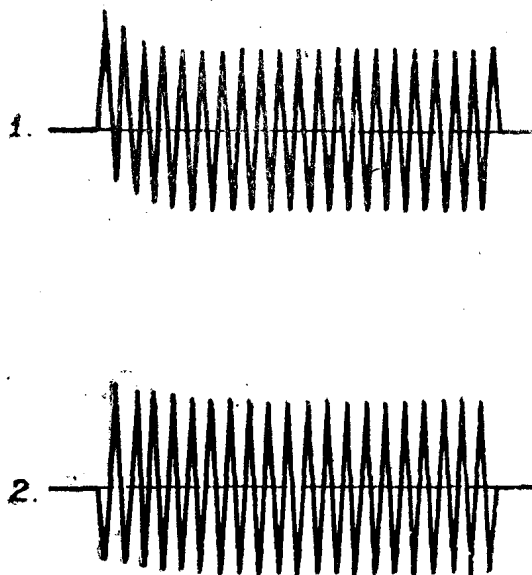


Рис. 10

Для определения величины тока

в реле при повреждении в зоне рассматриваемой защиты воспользуемся выражениями (22) и (23).

Ток в реле при питании шин только по левому фидеру определится из (22) при $I_2 = 0$:

$$I_p = \frac{I_1 z_{01}}{z_x + m z_p}. \quad (25)$$

Ток в реле при питании шин по трем левым фидерам можно определить из (23) при $I_4 = 0$:

$$I_p = \frac{I z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03}}{z_x + m z_p}. \quad (26)$$

Чувствительность защиты при питании шин одним фидером будет равна отношению тока небаланса из (22) к току в реле из (25):

$$\alpha = \frac{z_{01} - z_{02}}{z_{01}} \quad (27)$$

То же при питании шин по трем левым фидерам на основании (23) и (26):

$$\alpha = \frac{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03} - I_4 z_{04}}{I_1 z_{01} + I_2 z_{02} + I_3 z_{03}} \quad (28)$$

Из полученных выражений (27) и (28) видно, что чувствительность дифференциальной защиты шин с равновесием токов также не зависит от числа трансформаторов в схеме и сопротивления реле.

Кроме того, выражения (27) и (28) соответственно одинаковы с выражениями (13) и (14), полученными для защиты с равновесием напряжений, а это указывает на то, что чувствительность рассматриваемых двух схем одинакова при всех значениях сопротивления реле.

Структура выражений (13), (14), (27) и (28) показывает также, что чувствительность рассматриваемых схем защиты будет определяться, главным

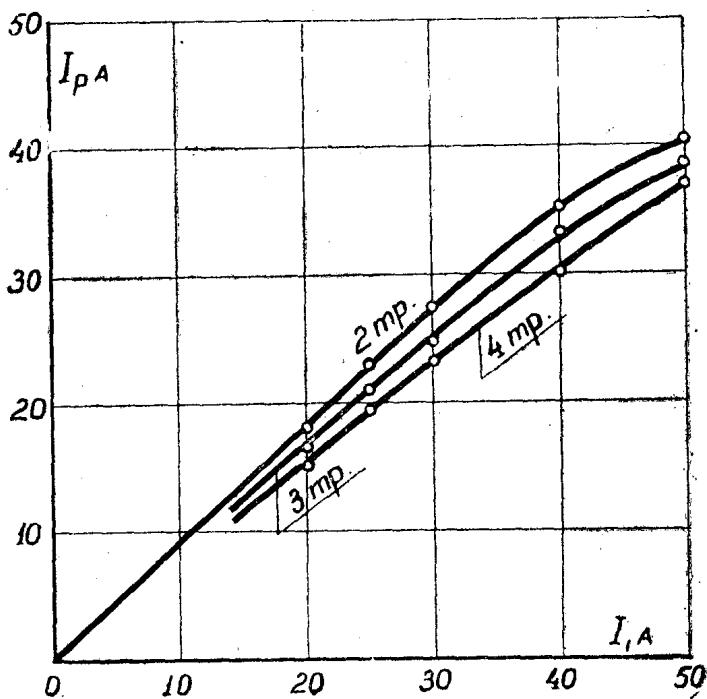


Рис. 11.

образом, точностью размеров воздушного зазора сердечников, так как сопротивления цепей намагничивания трансформаторов z_0 зависят почти исключительно от воздушного промежутка. Остальные факторы (качество железа, наличие остаточного намагничивания, разница в сопротивлениях вторичных цепей трансформаторов и т. д.) не будут оказывать заметного влияния на z_0 .

Пользуясь приведенной выше методикой определения условий оптимальной чувствительности защиты, можно установить, что эта оптимальная чувствительность для рассматриваемой защиты будет иметь место при сопротивлении реле

$$z_p = \frac{z_x}{m} \quad (29)$$

и токе трогания реле

$$I_{pT} = \sqrt{\frac{m S_p}{x}} \quad (30)$$

Полученные выражения (25) и (26) хорошо согласуются с данными рис. 11, на котором построена зависимость $I_1 = f(I_1, m)$, полученная опытным путем.

Все опыты для данной защиты произведены с использованием описанных вначале трансформаторов тока при $z_p = 0,35 \text{ ома}$ (сопротивление z_p включает также и сопротивление соединительных проводов).

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Использование трансформаторов тока с воздушным зазором для дифференциальной защиты шин представляет большой интерес, так как это может привести к увеличению чувствительности защиты. Сведения, приведенные на стр. 392 в книге Г. И. Атабекова „Релейная защита высоковольтных сетей“ о чувствительности данной защиты, нуждаются в значительной корректировке.

2. Для выяснения преимуществ трансформаторов тока с воздушным зазором в схемах дифференциальной защиты шин следовало бы организовать опытную эксплуатацию нескольких комплектов защиты с их применением.

3. Изготовление трансформаторов тока этого типа необходимо производить из железа из-под одного и того же штампа так, чтобы характеристики их были как можно более одинаковыми.

4. Стоимость трансформаторов тока с воздушным зазором будет мало отличаться от стоимости нормальных, поэтому экономический фактор не будет мешать их применению.

5. Несмотря на то, что теоретическая чувствительность рассматриваемых защит оказалась одинаковой, защита с равновесием токов, вероятно, получит большее распространение, так как трансформаторы тока этой защиты будут иметь меньшее намагничивание ввиду размагничивающего действия вторичного тока. Поэтому, при использовании одних и тех же трансформаторов тока, эта защита будет иметь меньшие токи небаланса.
