

## РАСЧЕТ БЫСТРОНАСЫЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА (БНТ) ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

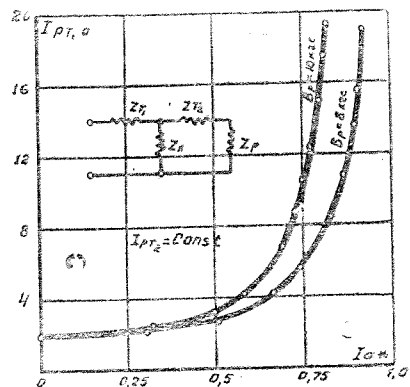
И. Д. КУТЯВИН

Как известно, идея применения БНТ основана на использовании резко выраженной зависимости коэффициента трансформации его от величины апериодической составляющей, содержащейся в трансформируемом токе. Эта зависимость коэффициента трансформации для периодической составляющей показана на фиг. 1, где по оси ординат откладывалось действующее значение периодической составляющей первичного тока трогания БНТ  $I_{PT}$  в амперах, а по оси абсцисс—апериодический ток  $I_{a*}$  в относительных единицах (отнесенный к амплитуде  $I_{PT}$ ). При снятии кривых фиг. 1 во вторичной цепи БНТ поддерживался ток, равный вторичному току трогания (току трогания реле), а действие апериодического тока имитировалось пропусканием постоянного тока по добавочной обмотке. Испытанию были подвергнуты БНТ с первичным расчётным током трогания  $2a$ , с расчётным током трогания реле  $0,5a$  и с расчётной индукцией 8 и  $10\text{ кгс}$ .

Кривые фиг. 1, выражая зависимость коэффициента трансформации периодической составляющей от апериодического тока, являются одновременно тормозными характеристиками защиты.

Интересно проследить теперь поведение БНТ с такой характеристикой при различных режимах работы защиты. При нормальном режиме работы по первичной цепи БНТ протекает ток небаланса, который много меньше тока трогания защиты, поэтому этот режим не представляет интереса. В случае возникновения междуфазного короткого замыкания в зоне дифференциальной защиты в первичной обмотке БНТ появится большой ток, содержащий апериодическую составляющую (если учесть её затухание)  $I_{a*} = 0—0,8$  от амплитуды периодической составляющей. Как видно из фиг. 1, при малых значениях апериодической составляющей защита будет работать в данном случае с током трогания от 2 до  $4a$ . В том случае, когда апериодическая составляющая будет иметь наибольшее значение, ток трогания защиты резко возрастает. Если при этом ток повреждения оказался недостаточным для приведения в действие реле, то по мере затухания апериодической составляющей ток трогания защиты будет снижаться, и она сработает с некоторой выдержкой времени, находящейся в пределах постоянной времени затухания апериодического тока.

При сквозном коротком замыкании первичная обмотка БНТ обтекается переходным током небаланса. При этом наибольшую опасность для за-



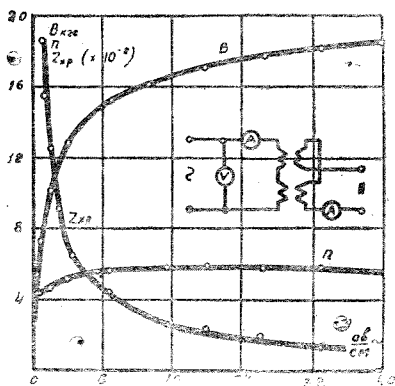
Фиг. 1

щиты без БНТ представляют максимальные токи небаланса, содержащие апериодическую составляющую  $I_{a*} \gg 1$ .

Для дифференциальной защиты, снабжённой БНТ, эти токи небаланса не представляют опасности, так как при апериодической составляющей  $I_{a*} \gg 1$  ток трогания защиты настолько возрастает, что она не будет работать.

Для получения БНТ с такими свойствами необходимо, чтобы при протекании в его первичной цепи синусоидального тока, равного току трогания реле  $I_{PT2}$ , расчётная индукция в сердечнике  $B_p$ , сопротивление ветви холостого хода  $Z_x$  (см. схему замещения на фиг. 1) и сопротивление вторичной цепи  $Z_2 = Z_{T2} + Z_p$  находились в определённом соотношении.

Установим сначала расчётную индукцию  $B_p$ . На фиг. 2 приведена кривая намагничивания  $B$  трансформаторной стали (сталь сердечника трансформаторов тока типа ТПО) и кривая сопротивления  $Z_x$ , снятые на переменном токе в зависимости от удельных намагничивающих эффективных ампервитков. Как видно из этой фигуры, сопротивление  $Z_x$  весьма резко снижается, начиная с индукции 8 кГс, и это снижение продолжается при всех индукциях, лежащих выше. Если в намагничивающем токе будет ещё содержаться апериодическая составляющая  $I_{a*} = 1$ , то сопротивление  $Z_x$  будет дополнительно снижаться в  $n$  раз. Кривая  $n$  кратности снижения  $Z_x$  показана на той же фигуре в функции намагничивающих переменных ампервитков при  $I_{a*} = 1$ . Как видно из фигуры, кривая  $n$  вначале поднимается от 3,5 до 5,5, а в конце, начиная с индукции в 18 кГс, понижается.



Фиг. 2

Изучение кривых фиг. 2 показывает, что наиболее резкая зависимость  $Z_x$  от намагничивающего тока имеет место при индукциях от 8 до 18 кГс, поэтому и расчётная индукция  $B_p$  при расчёте БНТ может быть взята в этих пределах. Однако при больших расчётных индукциях работа БНТ при повреждении в зоне защиты становится неустойчивой из-за сильного насыщения сердечника. Кроме того, всегда желательно иметь возможность

регулирования тока трогания защиты в процессе эксплуатации, поэтому расчётную индукцию желательно применять

$$B_p = 8 - 12 \text{ кГс.}$$

Между расчётным сопротивлением холостого хода БНТ  $Z_x$  и сопротивлением вторичной цепи  $Z_2$  должно соблюдаться следующее соотношение:  $Z_x \leq (0,5)Z_2$ . При больших сопротивлениях  $Z_x$  возможна неселективная работа защиты.

**Сердечник БНТ.** Сердечник изготавливается из трансформаторной стали. Сечение сердечника 0,8—1 см<sup>2</sup>. Размеры пластин сердечника не более 30 × 40 мм и размеры окна 10 × 20 мм. При изготовлении сердечника из круглых пластин внешний диаметр можно взять 40 мм, а внутренний—20 мм. Сердечники желательно изготавливать без стыков, вырубая целые пластины из листа стали. В процессе обработки магнитные свойства стали ухудшаются, поэтому изготовленные пластины нужно отжечь при температуре красного каления с последующим медленным охлаждением. После изготовления сердечника нужно снять для него кривую намагничивания на переменном токе. Для этого нужно намотать на сердечник две обмотки с одинаковым, но произвольным числом витков (по 10—20 вит-

ков). По одной обмотке пропускается измеряемый переменный ток, а во второй измеряется э.д.с., по которой и определяется индукция.

**Выбор реле.** Для совместной работы с БНТ применяются реле типа ЭТ с минимальным током трогания  $0,3-0,5$  а и (желательно) с демпферным устройством. Перед расчётом БНТ измеряется внутреннее сопротивление реле при разомкнутых оперативных контактах и устанавливается расчётное сопротивление  $Z_2$ . Если БНТ будет встроен в реле, то сопротивлением соединительных проводов можно пренебречь.

**Определение чисел витков обмоток.** Число витков вторичной обмотки БНТ можно определить из уравнения вторичной э.д.с:

$$E_2 = I_{PT2} Z_2 = 4kfw_2 q B_p \cdot 10^{-8}. \quad (1)$$

Тогда число витков вторичной обмотки, если пренебречь её сопротивлением, будет равно:

$$W_2 = \frac{I_{PT2} Z_2 \cdot 10^8}{4kfq B_p} \cong \frac{S_p \cdot 10^8}{4kfq B_p I_{PT2}}, \quad (2)$$

где  $I_{PT2}$  — минимальный ток трогания реле,

$k$  — коэффициент формы кривой э.д.с. По данным М. И. Царёва, этот коэффициент можно принять равным 1,15,  $B_p = 8-12$  кгс — расчётная индукция при минимальном токе трогания.

По кривой намагничивания для принятой  $B_p$  определяются удельные намагничивающие ампервитки  $aw_x$ , а по ним находятся полные ампервитки холостого хода:

$$AW_x = aw_x l, \quad (3)$$

где  $l$  — длина средней силовой линии в сантиметрах.

Отношение сопротивления  $Z_2$  к сопротивлению  $Z_x$ :

$$\frac{Z_2}{Z_x} = \frac{I_x}{I_{PT2}} = \frac{AW_x}{W_2 I_{PT2}} \gg 2. \quad (4)$$

Устанавливается минимально необходимый для защиты первичный (для БНТ) ток трогания  $I_{PT1}$ . Тогда число витков первичной обмотки можно определить из следующего приближенного выражения:

$$W_1 \cong \frac{AW_x + W_2 I_{PT2}}{I_{PT1}}. \quad (5)$$

Первичное число витков БНТ при испытании его в лаборатории совместно с реле можно изменить в желательную сторону.

Определение шкалы первичных токов трогания БНТ производится обычным методом. На реле устанавливается ток трогания по шкале и определяется первичный ток трогания. По данным испытания строится градуировочная кривая, которая используется в период эксплуатации. При этих испытаниях во вторичную цепь БНТ приборы включать нельзя, так как это изменит сопротивление  $Z_2$ . При пользовании градуировочной шкалой следует иметь в виду, что увеличивать ток трогания защиты  $I_{PT1}$  можно до тех пор, пока индукция в сердечнике БНТ не достигнет  $14-15$  кгс. Для грубого определения максимального тока  $I_{PT1M}$  нужно по кривой намагничивания найти максимальные удельные ампервитки  $aw_{xm}$  для максимальной расчётной индукции  $B_{pm} = 14-15$  кгс и воспользоваться выражением (5):

$$I_{PT1M} \cong \frac{aw_{xm} l + w_2 I_{PT2M}}{w_1}, \quad (6)$$

где  $I_{PT2M}$  — максимальный ток трогания реле, определяемый из следующего выражения:

$$I_{PT2M} = \frac{4kf\omega_2 q B_{PM} 10^{-8}}{Z_2}. \quad (7)$$

**Пример расчёта БНТ.** Требуется рассчитать БНТ для дифференциальной защиты трансформатора с минимальным током трогания  $I_{PT1} = 2$  а. В качестве реле предполагается использовать ЭТ-511/2 с минимальным током трогания  $I_{PT2} = 0,5$  и сопротивлением обмотки  $Z_2 = 0,4$  ом. Для сердечника БНТ используется трансформаторная сталь от трансформатора тока типа ТПО, кривая намагничивания которой приведена на фиг. 2. Размеры сердечника  $40 \times 35$  мм, окна  $20 \times 15$  мм; сечение сердечника  $q = 0,8$  кв. см. Расчёт произведён в двух вариантах: для  $B_P = 8$  кгс и 10 кгс.

Расчёт БНТ при  $B_P = 8$  кгс. Число витков вторичной обмотки из (2):

$$W_2 = \frac{0,1 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,15 \cdot 50 \cdot 0,8 \cdot 8000 \cdot 0,5} = 14.$$

Обмотка выполняется проводом с  $d = 0,7$  мм. Удельные ампервитки намагничивания по кривой фиг. 2 для

$$B_P = 8 \text{ кгс}; a\omega_x = 1,6 \frac{ав}{см}.$$

Полные ампервитки намагничивания:

$$AW_x = a\omega_x \cdot l = 1,6 \cdot 11 = 17,6 \text{ ав.}$$

Отношение сопротивлений  $Z_2$  к  $Z_x$  (или начальный коэффициент шунтировки):

$$\frac{Z_2}{Z_x} = \frac{17,6}{14 \cdot 0,5} = 2,5.$$

Число витков первичной обмотки из (5):

$$W_1 = \frac{17,6 + 0,5 \cdot 14}{2} = 12.$$

Обмотка выполняется проводом с  $d = 1,8$  мм.

Максимальный вторичный ток трогания при  $B_{PM} = 14$  кгс,

$$I_{PT2M} = \frac{4 \cdot 1,15 \cdot 50 \cdot 14 \cdot 0,8 \cdot 14000 \cdot 10^{-8}}{0,4} = 0,9 \text{ а.}$$

Удельные ампервитки, соответствующие  $B_{PM} = 14$  кгс,

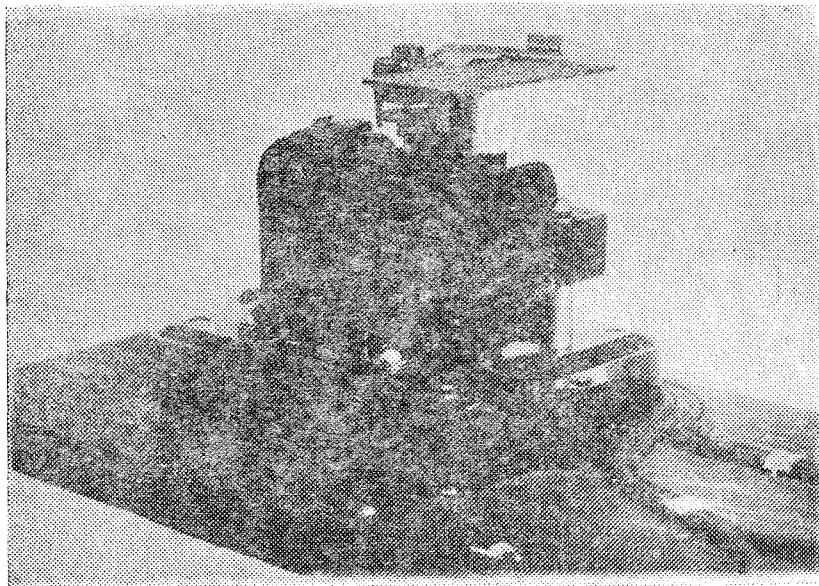
$$a\omega_{xM} = 6,6 \frac{ав}{см}.$$

Максимально допустимый первичный для БНТ ток трогания:

$$I_{PT1M} = \frac{6,6 \cdot 11 + 0,9 \cdot 14}{12} = 7,0 \text{ а.}$$

Допустимый предел регулирования тока трогания равен  $2-7$  а.

Расчёт БНТ при  $B_p = 10$  кгс произведён аналогично предыдущему. Результаты расчёта следующие:  $W_2 = 11$ ;  $W_1 = 18$ ;  $Z_2 : Z_x = 5,6$ ;  $I_{PT2M} = 0,71$  а;  $I_{PT1M} = 4,46$  а и предел регулирования тока трогания равен 2—4,46 а.



Фиг. 3

Тормозные характеристики рассчитанных БНТ приведены на фиг. 1, а на фиг. 3 показано реле со встроенным БНТ. Для крепления БНТ использованы левые контактные винты, а цепи реле перенесены на правую сторону.