

## УГЛОВАЯ ПОГРЕШНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НТМИ

А. Х. МУСИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Разрабатываемое на кафедре электрических станций Томского политехнического института устройство сигнализации замыканий на землю в компенсированных сетях направленного действия использует, как и известные устройства направленного действия [1], в качестве одной из входных величин напряжение нулевой последовательности  $U_0$ , получаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжения типа НТМИ, соединенной в разомкнутый треугольник. Угловая погрешность напряжения  $U_0$  может ухудшать работоспособность устройства. Однако отрицательное влияние постоянной угловой погрешности может быть скомпенсировано просто, например, путем введения корректирующей фазосдвигающей цепочки на входе устройства. Особую заботу вызывают колебания угловой погрешности, являющиеся функцией внешних факторов, в частности, температуры окружающей среды.

В настоящей статье предпринимается попытка оценить влияние колебаний температуры окружающей среды на угловую погрешность напряжения нулевой последовательности  $U_0$  и наметить мероприятия по уменьшению такого влияния.

На рис. 1 изображена схема электрических соединений трансформатора напряжения НТМИ при замыкании на землю фазы А сети. Здесь напряжения  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{AC}$  сдвинуты относительно друг друга на угол  $60^\circ$ . Основная вторичная обмотка имеет нагрузку, соединенную в звезду с изолированной нейтралью (или в треугольник)  $z_4'$ , по которой протекает ток нагрузки  $I_4'$ , и нагрузку, соединенную в звезду с заземленной нейтралью  $R_5'$  (обычно это вольтметры контроля изоляции), по которой протекает ток нагрузки  $I_5'$ . По обмоткам протекает сумма токов нагрузки

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{2a} &= \dot{I}'_{4a} + \dot{I}'_{5a}, \\ \dot{I}'_{2b} &= \dot{I}'_{4b} + \dot{I}'_{5b}, \\ \dot{I}'_{2c} &= \dot{I}'_{4c} + \dot{I}'_{5c}. \end{aligned} \quad (1)$$

В нулевом проводе протекает ток  $3\dot{I}'_0$ , равный сумме токов обмоток всех фаз:

$$3\dot{I}'_0 = \dot{I}'_{2a} + \dot{I}'_{2b} + \dot{I}'_{2c}. \quad (2)$$

По дополнительной вторичной обмотке протекает ток  $I_3'$ .

Токи  $I_{2a}'$  и  $I_3'$ , протекая по вторичным обмоткам фазы  $a$ , трансформируются в первичную обмотку фазы  $A$  и замыкаются по контуру  $R_1, X_1$  и  $R_{\Pi}$ . Токи  $I_{1C}$  и  $I_{1B}$  не могут ответвляться в первичную обмотку фазы  $A$ , поскольку в нее оказывается включенным источник тока.

Запишем уравнение равновесия напряжений для дополнительной вторичной обмотки:

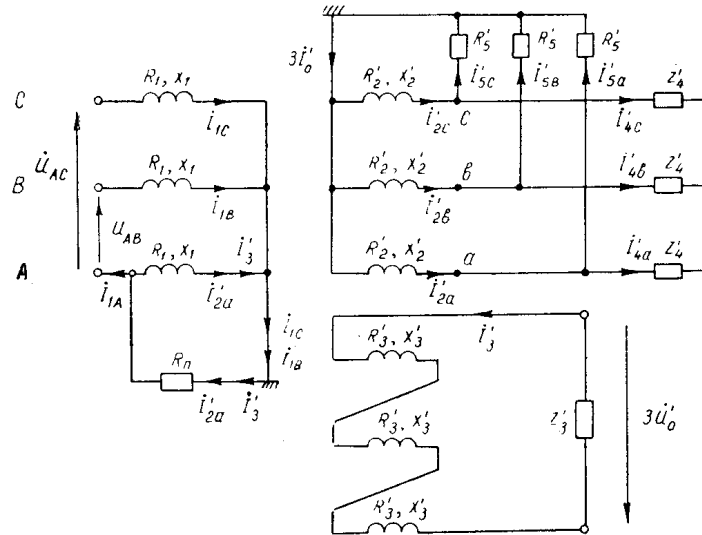


Рис. 1. Схема электрических соединений трансформатора напряжения НТМИ при замыкании на землю фазы А сети:  $R_1$  и  $X_1$  — активное сопротивление и сопротивление рассеяния первичной обмотки;  $R_2'$  и  $X_2'$  — то же основной вторичной обмотки, приведенное к первичной стороне;  $R_3'$  и  $X_3'$  — то же дополнительной вторичной обмотки, приведенное к первичной стороне;  $Z_3'$ ,  $Z_4'$  и  $R_5'$  — сопротивления нагрузок, приведенные к первичной стороне;  $R_{\Pi}$  — переходное сопротивление в месте замыкания

$$j\omega\omega_1\dot{\Phi}_C + j\omega\omega_1\dot{\Phi}_B - I_3'(3R_3' + 3jX_3') - (I_3' + I_{2a}')(R_1 + jX_1) - (I_{1C} + I_{1B} + I_{2a}' + I_3')R_{\Pi} - 3U_0' = 0, \quad (3)$$

где

$\omega$  — круговая частота,

$\omega_1$  — количество витков первичной обмотки,

$\dot{\Phi}_C$  и  $\dot{\Phi}_B$  — магнитные потоки намагничивания в стержнях фаз  $C$  и  $B$ .

Исключим из (3)  $\dot{\Phi}_C$  и  $\dot{\Phi}_B$ , выразив их через известные параметры первичной цепи. Для этого запишем уравнения равновесия напряжений для первичной цепи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AC} - I_{1C}(R_1 + jX_1) - j\omega\omega_1\dot{\Phi}_C - (I_{1C} + I_{1B} + I_{2a}' + I_3')R_{\Pi} &= 0, \\ \dot{U}_{AB} - I_{1B}(R_1 + jX_1) - j\omega\omega_1\dot{\Phi}_B - (I_{1C} + I_{1B} + I_{2a}' + I_3')R_{\Pi} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) определим сумму

$$\begin{aligned} j\omega\omega_1\dot{\Phi}_C + j\omega\omega_1\dot{\Phi}_B = \dot{U}_{AC} + \dot{U}_{AB} - (I_{1C} + I_{1B})(R_1 + jX_1) - \\ - 2(I_{1C} + I_{1B} + I_{2a}' + I_3')R_{\Pi} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

и подставим в (3):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AC} + \dot{U}_{AB} - (\dot{I}_{1C} + \dot{I}_{1B})(R_1 + jX_1) - 2(\dot{I}_{1C} + \dot{I}_{1B} + \dot{I}'_{2a} + \dot{I}'_3)R_{\Pi} - \\ - \dot{I}'_3(3R_3 + 3jX_3) - (\dot{I}'_3 + \dot{I}'_{2a})(R_1 + jX_1) - \\ - (\dot{I}_{1C} + \dot{I}_{1B} + \dot{I}'_{2a} + \dot{I}'_3)R_{\Pi} - 3\dot{U}'_0 = 0. \end{aligned} \quad (3^1)$$

В (3<sup>1</sup>) сумма напряжений  $\dot{U}_{AC}$  и  $\dot{U}_{AB}$  представляет собой утроенное значение напряжения нулевой последовательности:

$$\dot{U}_{AC} + \dot{U}_{AB} = 3\dot{U}'_0. \quad (6)$$

Токи  $\dot{I}_{1C}$  и  $\dot{I}_{1B}$  представляют собой сумму токов намагничивания и вторичной нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1C} &= \dot{I}_{\mu C} + \dot{I}'_{2C} + \dot{I}'_3, \\ \dot{I}_{1B} &= \dot{I}_{\mu B} + \dot{I}'_{2b} + \dot{I}'_3, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$\dot{I}_{\mu C}$  и  $\dot{I}_{\mu B}$  — токи намагничивания фаз *C* и *B*.

Сумма токов, протекающих по основным вторичным обмоткам, представляет собой утроенный вторичный ток нулевой последовательности  $3\dot{I}'_0$

$$\dot{I}'_{2a} + \dot{I}'_{2b} + \dot{I}'_{2c} = 3\dot{I}'_0. \quad (8)$$

Тогда, после несложных преобразований, уравнение (3<sup>1</sup>) примет вид:

$$\begin{aligned} 3\dot{U}'_0 - (\dot{I}_{\mu CB} + 3\dot{I}'_0 + 3\dot{I}'_3)(R_1 + 3R_{\Pi} + jX_1) - \\ - 3\dot{I}'_3(R_3 + jX_3) = 3\dot{U}'_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\dot{I}_{\mu CB} = \dot{I}_{\mu C} + \dot{I}_{\mu B}.$$

Уравнению (9) соответствует схема замещения (рис. 2) как для однофазного трансформатора. Токи  $3\dot{I}'_3$  и  $3\dot{I}'_0$  определяются соответствующими нагрузками. Определение намагничивающих токов  $\dot{I}_{\mu C}$  и  $\dot{I}_{\mu B}$  связано с расчетом разветвленной нелинейной магнитной цепи трансформатора напряжения (рис. 3). Схемы замещения магнитных цепей разные при замыкании на землю фазы, обмотка которой находится на среднем основном стержне, и фазы, обмотка которой находится на крайнем основном стержне (рис. 3, б и в). Поэтому и намагничивающие токи для разных случаев будут разными. В расчете заданными являются магнитные потоки незамкнутых фаз, в рассматриваемом нами случае это потоки  $\dot{\Phi}_C$  и  $\dot{\Phi}_B$ . Магнитный поток замкнувшейся фазы равен нулю. С достаточной степенью точности можно считать, что потоки  $\dot{\Phi}_C$  и  $\dot{\Phi}_B$  задаются напряжениями  $\dot{U}_{AC}$  и  $\dot{U}_{AB}$ :

$$\dot{U}_{AC} = j\omega \omega_1 \dot{\Phi}_C,$$

$$\dot{U}_{AB} = j\omega \omega_1 \dot{\Phi}_B.$$

Магнитное сопротивление  $R_i$  определяется динамической магнитной проницаемостью  $\mu_i$ , которая является нелинейной функцией магнитного потока на  $i$ -м участке. Поэтому точный расчет представляет определенную трудность. Необходимая точность может быть достигнута при проведении расчета методом последовательных приближений. В качестве нулевого приближения магнитная проницаемость может быть принята равной некоторой средней величине, одинаковой на всех участках.

В соответствии со схемой замещения рис. 2, угловая погрешность напряжения нулевой последовательности определяется [2] по формуле

$$\delta = \delta_{\mu} + \delta_0 + \delta_3, \quad (10)$$

где  $\delta_{\mu}$  — погрешность от тока намагничивания  $I_{\mu CB}$ , равная

$$\begin{aligned} \delta_{\mu} &= \frac{I_{\mu CB}(R_1 + 3R_{\Pi})}{3U_{01}} \cos \alpha - \frac{I_{\mu CB}X_1}{3U_{01}} \sin \alpha = \\ &= \delta_{\mu a} - \delta_{\mu p}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\alpha$  — угол потерь материала магнитопровода. Выражение (11) состоит из двух членов. Первый член представляет собой угловую по-

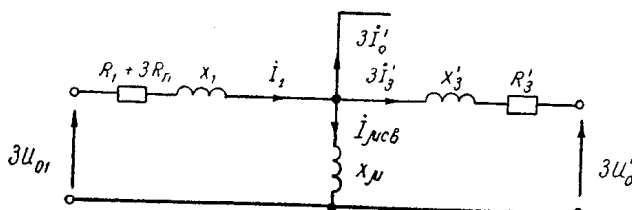


Рис. 2. Схема замещения трансформатора напряжения НТМИ для определения угловой погрешности напряжения нулевой последовательности

грешность  $\delta_{\mu a}$ , обусловленную активным сопротивлением от прохождения по нему полного тока намагничивания  $I_{\mu CB}$  — в дальнейшем погрешность  $\delta_{\mu a}$  называется активной погрешностью от тока намагничивания. Второй член представляет собой угловую погрешность  $\delta_{\mu p}$ , обусловленную реактивным сопротивлением от прохождения по нему полного тока намагничивания  $I_{\mu CB}$  — в дальнейшем погрешность  $\delta_{\mu p}$  называется реактивной погрешностью от тока намагничивания.

$\delta_0$  — погрешность от тока нулевой последовательности  $3I'_0$  протекающего по основной вторичной обмотке, равная

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \frac{3I'_0(R_1 + 3R_{\Pi})}{3U_{01}} \sin \varphi_0 - \frac{3I'_0X_1}{3U_{01}} \cos \varphi_0 = \\ &= \delta_{0a} - \delta_{0p}, \end{aligned} \quad (12)$$

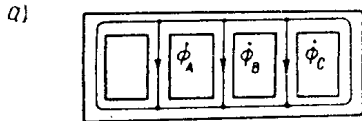
где  $\cos \varphi_0$  — косинус угла нагрузки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью;  $\delta_{0a}$  и  $\delta_{0p}$  — аналогично (11), активная и реактивная угловые погрешности от тока  $3I'_0$ ;  $\delta_3$  — погрешность от тока  $I'_3$ , протекающего по дополнительной обмотке, равная

$$\begin{aligned} \delta_3 &= \frac{3I'_3(R_1 + 3R_{\Pi} + R'_3)}{3U_{01}} \sin \varphi_3 - \frac{3I'_3(X_1 + X'_3)}{3U_{01}} \cos \varphi_3 = \\ &= \delta_{3a} - \delta_{3p}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\cos \varphi_3$  — косинус угла нагрузки, подключенной к дополнительной вторичной обмотке;

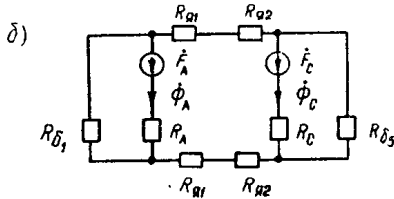
$\delta_{3a}$  и  $\delta_{3p}$  — аналогично (11), активная и реактивная угловые погрешности от тока  $I'_3$ .

Таким образом, общая угловая погрешность  $\delta$  по (10) может быть представлена в виде разности активной и реактивной угловых погрешностей:



$$\delta = \delta_a - \delta_p, \quad (10)$$

где



$$\delta_a = \delta_{\mu a} + \delta_{0a} + \delta_{3a}, \quad (14)$$

$$\delta_p = \delta_{\mu p} + \delta_{0p} + \delta_{3p}.$$

Добившись равенства активной и реактивной угловых погрешностей, общую угловую погрешность можно свести к нулю. Наиболее просто это может быть реализовано соответствующим выбором величины и характера нагрузки, подключенной к дополнительной вторичной обмотке.

Изменение температуры окружающей среды вызывает появление добавок в величинах активных сопротивлений схемы замещения рис. 2:

в)

Рис. 3. К определению намагничивающих токов: а) конфигурация магнитопровода НТМИ; б) схема замещения магнитной цепи НТМИ при замыкании на землю фазы, обмотка которой находится на среднем основном стержне; в) то же, но фазы, обмотка которой находится на крайнем основном стержне.  $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C$  и  $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$  — магнитные потоки и намагничивающие силы в фазах А, В и С трансформатора;  $R_i = \frac{l_i}{\mu_i S_i}$  — магнитное сопротивление  $i$ -го участка;  $l_i, S_i$  и  $\mu_i$  — длина средней силовой линии, площадь поперечного сечения и динамическая магнитная проницаемость  $i$ -го участка

$$\Delta R_i = R_i \gamma_i t, \quad (15)$$

где  $\gamma_i$  — температурный коэффициент сопротивления, равный для меди 0,004 1/град; величина  $\gamma$  для переходного сопротивления  $R_{\Pi}$  зависит от многих факторов.

$t$  — величина изменения температуры, град.

Изменение активных сопротивлений по (15) не вызовет изменения величин токов в схеме замещения, поскольку эти токи определяются нагрузками (активные сопротивления схемы замещения несоизмеримо меньше сопротивлений нагрузок). Однако изменение активных со-

противлений по (15) вызовет появление соответствующей добавки в угловых погрешностях:

$$\Delta \delta_p = \frac{I_3 \cos \varphi_3}{3 U_{01}} (R_1 \gamma_1 + 3 R_{\Pi} \gamma_{\Pi}) t \cos \alpha, \quad (16)$$

$$\Delta \delta_0 = \frac{3 I'_0}{3 U_{01}} (R_1 \gamma_1 + 3 R_{\Pi} \gamma_{\Pi}) t \sin \varphi_0, \quad (17)$$

$$\Delta \delta_3 = \frac{3 I'_3}{3 U_{01}} [(R_1 + R'_3) \gamma_1 + 3 R_{\Pi} \gamma_{\Pi}] t \sin \varphi_3, \quad (18)$$

где  $\gamma_1$  — температурный коэффициент сопротивления меди,  
 $\gamma_{п}$  — то же переходного сопротивления. Общая добавка угловой погрешности равна сумме:

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{\mu} + \Delta\delta_0 + \Delta\delta_3. \quad (19)$$

Реактивная угловая погрешность  $\delta$  добавки угловой погрешности не дает.

Из (17) и (18) видно, что добавки угловых погрешностей  $\Delta\delta_0$  и  $\Delta\delta_3$  могут быть сведены к нулю путем обеспечения активного характера токов  $3I_0'$  и  $3I_3'$ . При этом  $\sin \varphi_0 = 0$  и  $\sin \varphi_3 = 0$ , и  $\Delta\delta_0 = 0$ ,  $\Delta\delta_3 = 0$ . Следует отметить, что в действительности ток  $3I_0'$  является активным, поскольку нагрузкой нулевой последовательности являются вольтметры контроля изоляции, для которых  $\cos \varphi = 1$ .

При сведении  $\Delta\delta_0$  и  $\Delta\delta_3$  к нулю общая добавка угловой погрешности достигает минимума:

$$\Delta\delta_{\min} = \Delta\delta_{\mu} \quad (20)$$

и обуславливается только активной составляющей тока намагничивания.

Следует отметить, что обеспечение активного характера токов  $3I_0'$  и  $3I_3'$  сводит также к нулю активные угловые погрешности  $\delta_{0a}$  и  $\delta_{3a}$  и обеспечивает максимальное значение реактивных угловых погрешностей  $\delta_{op}$  и  $\delta_{3p}$  (см. (12) и (13)). Полная угловая погрешность при этом достигает своего максимума.

Приведенные в статье результаты получены для случая замыкания на землю фазы А. При замыкании на землю любой другой фазы схема замещения рис. 2 и ее параметры не изменяются. Намагничивающий ток в схеме  $\dot{I}_{\mu CB}$  представляет собой геометрическую сумму намагничивающих токов незамкнутых фаз, который зависит, как уже указывалось, от того, на каком стержне магнитопровода находится обмотка замкнувшейся фазы.

### Выводы

Колебания температуры окружающей среды вызывают колебания угловой погрешности напряжения нулевой последовательности трансформатора напряжения НТМИ. Колебания угловой погрешности могут быть сведены к минимуму путем обеспечения активного характера нагрузки, подключаемой ко вторичной дополнительной обмотке, и нагрузки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, подключенной к основной вторичной обмотке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Сб. статей под ред. В. И. Иоэльсона. ГЭИ, 1962.
2. Электротехнический справочник. Т. I, «Энергия», 1971.