

Н. В. РУДЕВИЧ (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)

## О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА НА ТОЧНОСТЬ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ ЕГО ПОГРЕШНОСТИ

В статті розглянуто вплив опору вторинної обмотки високовольтного вимірювального трансформатора струму на похибку пристрою його компенсації.

В статье рассмотрено влияние сопротивления вторичной обмотки высоковольтного измерительного трансформатора тока на погрешность устройства его компенсации.

In the article the influence of resistance of secondary winding of the high-voltage measuring current transformer on the error of device of its compensation is considered.

### Постановка проблемы

Точность учета электроэнергии зависит от точности всех звеньев измерительного комплекса, а именно: высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения, средств измерения. В частности, при измерении тока определяющей является погрешность высоковольтного измерительного трансформатора тока (ВИТТ).

### Анализ последних исследований и публикаций

Существует ряд способов повышения точности измерительных трансформаторов тока [1]. В последнее время широкое распространение получило применение аморфных сплавов в качестве ферромагнитного материала, это позволило получить относительную погрешность на уровне 0,2 % во всем диапазоне измерения первичного тока [2]. Однако, самым эффективным способом была и остается электронная компенсация погрешности, которую удалось использовать для компенсации тока намагничивания ВИТТ без снижения надежности устройства [3].

В работе [3] было рассмотрено устройство для измерения тока, которое позволяет компенсировать погрешность высоковольтного измерительного трансформатора тока (ВИТТ) (см. рис. 1).

Разница напряжений вторичной обмотки ВИТТ  $W_2$  и индикационной обмотки ИТТ  $W_3$  подключена к входу операционного усилителя (ОУ) таким образом, что выход ОУ создает такое значение тока в обмотке  $W_4$ , что напряжение на входе ОУ равняется нулю. При этом, если сердечники ВИТТ и ИТТ выполнены из

одинакового ферромагнитного материала и выполняются следующие условия [1]:

$$\frac{l_2 W_5}{W_4} = \frac{l_1 W_6}{W_2}, \quad (1)$$

$$W_2 S_1 = W_3 S_2 \quad (2)$$

где  $W_2$  – число витков вторичной обмотки ВИТТ;

$S_1, S_2$  – поперечное сечение сердечника ВИТТ и ИТТ соответственно;

$W_3, W_4$  – число витков вторичной и первичной обмотки ИТТ;

$W_5, W_6$  – число витков первичных обмоток трансформатора тока устройства ввода тока (ТТ УВТ);

$l_1, l_2$  – средняя длина линии магнитного поля в сердечнике ВИТТ и ИТТ соответственно, то имеет место компенсация тока намагничивания ВИТТ.

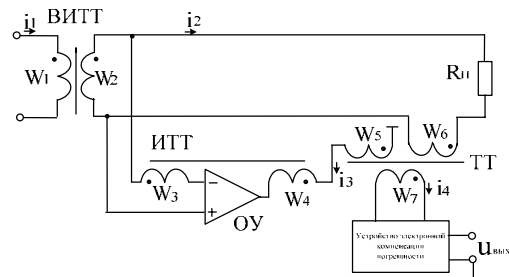


Рис. 1. Устройство для измерения тока

### Цель статьи

Установить влияние параметров ВИТТ на погрешность устройства компенсации его погрешности.

## Основные материалы исследований

Точность компенсации зависит не только от идентичности материалов и выполнении условий (1), (2), но и от параметров операционного усилителя и от величины сопротивления вторичной обмотки ВИТТ. Необходимо отметить, что выполнение условий (1), (2) не представляет трудностей, а современные ОУ имеют параметры близкие к идеальным. Поэтому на точность измерения тока может повлиять расхождение параметров характеристик сердечников ВИТТ и ИТТ, а также наличие сопротивления у вторичной обмотки ВИТТ.

В данной работе рассмотрено влияние сопротивления вторичной обмотки ВИТТ на точность компенсации погрешности ВИТТ.

Для оценки влияния сопротивления вторичной обмотки ВИТТ введем несколько допущений. Так как ТТ УВТ имеет электронную компенсацию погрешности и предполагая, что используется схема компенсации, где  $\frac{dB}{dt} \cong 0$ , будем считать, что работа ТТ УВТ на погрешность устройства не влияет. Также пренебрегаем индуктивностью рассеивания всех обмоток и предполагаем, что первичный ток ВИТТ синусоидальный, т.е.  $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ .

По второму закону Кирхгофа, для тока  $i_3$  запишем:

$$u_2 = W_2 S_1 \frac{dB_1}{dt} - i_2 r_2. \quad (3)$$

Также можно записать:

$$W_2 S_1 \frac{dB_1}{dt} = i_2 R_n + i_2 r_2, \quad (4)$$

где  $u_2$  – напряжение на вторичной обмотке ВИТТ;

$B_1$  – индукция в сердечнике ВИТТ;

$r_2$  – активное сопротивление обмотки  $W_2$ ;

$i_2$  – ток вторичной обмотки ВИТТ;

$R_n$  – сопротивление нагрузки ВИТТ.

По второму закону Кирхгофа  $u_2$  определяется выражением:

$$u_2 = W_3 S_2 \frac{dB_2}{dt} + \Delta u, \quad (5)$$

где  $B_2$  – индукция в сердечнике ИТТ;

$\Delta u$  – напряжение смещения на входе ОУ.

Допуская, что  $i_2 r_2 \gg \Delta u$ , подставим (5) в (3) и с учетом (4) запишем:

$$\begin{aligned} W_3 S_2 \frac{dB_2}{dt} &= W_2 S_1 \frac{dB_1}{dt} - \frac{W_2 S_1 r_2}{r_2 + R_n} \frac{dB_1}{dt} = \\ &= W_2 S_1 \frac{dB_1}{dt} \left(1 - \frac{r_2}{r_2 + R_n}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, при выполнении (2) с (6) имеем:

$$B_2 = B_1 \left(1 - \frac{r_2}{r_2 + R_n}\right) = AB_1, \quad (7)$$

где  $A = \left(1 - \frac{r_2}{r_2 + R_n}\right)$ .

Согласно закону Ома, ток  $i_3$  определяется соотношением:

$$i_3 = \frac{u_{\text{выхОУ}} - W_4 S_2 \frac{dB_2}{dt}}{r_4 + r_5}, \quad (8)$$

где  $r_4, r_5$  – активное сопротивление обмотки  $W_4$  и  $W_5$ , соответственно;

$u_{\text{выхОУ}} = \Delta u K_{\text{ус}}$  – выходное напряжение ОУ,

где  $K_{\text{ус}}$  – коэффициент усиления ОУ.

После подстановки (5) и (3) в (8) с учетом (4) получим:

$$i_3 = i_2 \frac{R_n K_{\text{пид}}}{r_4 + r_5} + \frac{dB_2}{dt} \frac{(-W_4 S_2 - W_3 S_2 K_{\text{пид}})}{r_4 + r_5}. \quad (9)$$

Воспользовавшись описанием ферромагнитного сердечника семейством петель гистерезиса [4], выразим токи  $i_3$  и  $i_2$  в соответствии с законом полного тока:

$$\begin{aligned} i_3 &= \frac{H_2(B_2) l_2}{W_4} = \frac{l_2}{W_4} \{f_{\text{нечетн}}(B_2) + \\ &+ \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{четн}}(B_2) \frac{dB_2}{dt}\}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} i_2 &= i_1 \frac{W_1}{W_2} - \frac{H_1 l_1}{W_2} = \frac{W_1}{W_2} I_{1m} \sin \omega t - \\ &- \frac{l_1}{W_2} \{f_{\text{нечетн}}(B_1) + \frac{1}{\omega} \varphi_{\text{четн}}(B_1) \frac{dB_1}{dt}\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varphi_{\text{четн}}$  – четная функция, характеризующая потери на гистерезис,

$f_{\text{нечетн}}$  – нечетная функция, характеризующая потери на намагничивания,

$\omega$  – угловая частота.

Подставляя (11) в (9) и приравнявая к (10), получаем нелинейное дифференциальное уравнение, которое решаем методом малого пара-

метра относительно  $\frac{dB_2}{dt}$ . Затем раскладываем четные и нечетные функции в ряд Тейлора, выражая четные и нечетные степени  $\cos \omega t$  и  $\sin \omega t$  через кратные углы. После подстановки производной индукции в (9) выразим ток  $i_3$  первой гармоники:

$$i_{31} = i_2 \frac{R_H K_{\text{ннд}}}{r_4 + r_5} + [B_{2m} \omega \sin \omega t - \frac{l_1}{B_{2m} W_2} \frac{B_{2m} R_H K_{\text{ннд}}}{(W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{\text{ннд}})} \times \{ \alpha_{11} \sin \omega t - \gamma_{11} \cos \omega t \} - \frac{B_{2m} l_2 (r_4 + r_5)}{B_{2m} W_4 (W_4 S_2 + W_3 S_2 K_{\text{ннд}})} \times \{ \alpha_{21} \sin \omega t - \gamma_{21} \cos \omega t \}] \times \frac{(-W_4 S_2 - W_3 S_2 K_{\text{ннд}})}{r_4 + r_5}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{11} = f(B_{1m})$ ,  $\alpha_{21} = f(B_{2m})$  и  $\gamma_{11} = f(B_{1m})$ ,  $\gamma_{21} = f(B_{2m})$ .

Из закона полного тока для ТТ УВТ выразим:

$$i_4 W_7 = i_3 W_5 + i_2 W_6. \quad (13)$$

Известно, что первая гармоника тока  $i_2$  определяется выражением [4]:

$$i_{21} = \frac{\omega W_2 S_1 B_{1m}}{R_H} \left[ \left( 1 - \frac{A_m}{\omega B_{1m}} \frac{\alpha_{11}}{\omega} \right) \sin \omega t + \frac{A_m}{\omega B_{1m}} \frac{\gamma_{11}}{\omega} \cos \omega t \right], \quad (14)$$

где  $A_m = \frac{R_H l_1}{W_2^2 S_1}$ ,  $B_{1m} = \frac{I_{1m} A_m W_1}{\omega l_1}$ .

Подставляя (12) и (14) в (13), после ряда преобразований получаем выражение для определения фазовой и относительной амплитудной погрешности (при условии выполнения (1) и (2)):

$$\Delta \varphi = \left[ \frac{R_{H\Sigma} l_1}{\omega W_2^2 S_1} \beta_{11}(B_{1m}) \right] - \frac{R_{H\Sigma} W_5 l_2 \beta_{12} \left( \left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{1m} \right)}{\omega W_6 W_4 \left( \frac{W_4 S_2}{K_{\text{ннд}}} + W_3 S_2 \right)}, \quad (15)$$

$$\delta_i = -1 + \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{R_{H\Sigma} l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{21}(B_{1m}) \right) + \frac{W_5 l_2 R_{H\Sigma} \beta_{22} \left( \left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{1m} \right)}{r_2 + R_H} \right]^2 + \frac{W_4 \omega W_6 \left( \frac{W_4 S_2}{K_{\text{ннд}}} + W_3 S_2 \right)}{\omega W_6 W_4 \left( \frac{W_4 S_2}{K_{\text{ннд}}} + W_3 S_2 \right)} \right\} + \left\{ \left[ \frac{R_{H\Sigma} l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{11}(B_{1m}) \right] - \frac{R_{H\Sigma} W_5 l_2 \beta_{12} \left( \left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{1m} \right)}{r_2 + R_H} \right\}^2. \quad (16)$$

где  $R_{H\Sigma} = r_2 + R_H$ ,  $\beta_{11}(B_{1m}) = \frac{\gamma_{11}}{B_{1m}}$ ,

$$\beta_{12}(B_{2m}) = \frac{\gamma_{21}}{B_{2m}} = \frac{\gamma_{21}}{\left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{1m}},$$

$$\beta_{21}(B_{1m}) = \frac{\alpha_{11}}{B_{1m}},$$

$$\beta_{22}(B_{2m}) = \frac{\alpha_{21}}{B_{2m}} = \frac{\alpha_{21}}{\left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{1m}}.$$

В случае, когда материалы сердечников ВИТТ и ИТТ одинаковые, вид функций  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{21}$ ,  $\beta_{22}$  также будет одинаковый.

Из (15), (16) видим, что на погрешность компенсации влияет наличие сопротивления у вторичной обмотки ВИТТ, а именно его соотношение с сопротивлением нагрузки ВИТТ.

Необходимо отметить, что конечное значение коэффициента усиления ОУ также влияет на погрешность компенсации. Однако, современные операционные усилители имеют такое значение этого параметра, что его влиянием можно пренебречь.

Если принять, что  $K_{yc} = \infty$ ,  $r_2 = 0$ , то  $\beta_{11} = \beta_{12}$ ,  $\beta_{21} = \beta_{22}$ , следовательно, выполняются равенства

$$\frac{R_{H\Sigma} l_1}{W_2^2 S_1 \omega} \beta_{21}(B_{1m}) = \frac{W_5 l_2 R_{H\Sigma} \beta_{22} \left( \left( 1 - \frac{r_2}{r_2 + R_H} \right) B_{2m} \right)}{W_4 \omega W_6 \left( \frac{W_4 S_2}{K_{\text{ннд}}} + W_3 S_2 \right)};$$

