

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ

Китаев А.В., Сушич Е.Ф.

Различают измерительные трансформаторы напряжения (ТН) и тока (ТТ). Оценка их работоспособности прямо связана со значением погрешностей, которые они имеют при измерении напряжений и токов. Отсюда повышенный интерес специалистов к этому вопросу и его решению. Однако все известные предложения по определению погрешностей ТН и ТТ относятся к категории замысловатых и приближенных [1-3].

Задача настоящей статьи – разработка более удачного методического подхода по решению той же задачи, основанного на положениях теории многополюсников. С этой целью обратимся к схемам замещения ТН и ТТ и будем считать, что параметры элементов, входящих в состав этих схем известны. Более того примем, что по отношению к ним, а также применительно к токам и напряжениям выполнена операция приведения или пересчета вторичной цепи ТН на число витков первичной обмотки w_1 , а в случае ТТ такой пересчет сделан для первичной цепи на число витков вторичной обмотки w_2 . Разумеется, что после пересчета соответствующие параметры и показатели получают согласно нормативным требованиям дополнительный верхний индекс «штрих». Полученные в итоге Т-образные схемы замещения (см. рис. 1 а,б) дают основание отнести ТН и ТТ к категории типичных четырехполюсников.

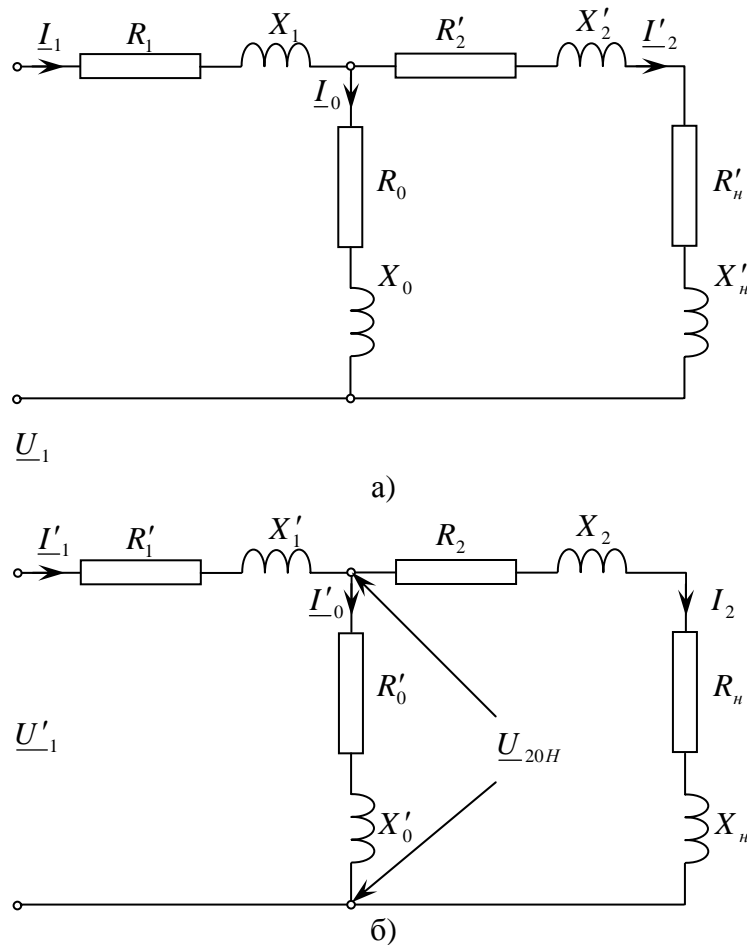


Рис. 1 Т-образные схемы замещения ТН и ТТ

Это означает, что для их описания пригодны основные уравнения четырехполюсника:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}'_2 + \underline{B}\underline{I}'_2, \quad (1)$$

$$\underline{I}'_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2, \quad (2)$$

где $\underline{U}_1, \underline{I}'_1$ – напряжение и ток со стороны входа;
 $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ – напряжение и ток со стороны выхода;
 $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ – коэффициенты четырехполюсника.

Подчеркнем, что далее уравнение (1) будет использовано для анализа погрешностей ТН, а (2) – для ТТ.

Поскольку параметры всех элементов схемы замещения заданы, то могут быть определены и коэффициенты $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$. Действительно,

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}'_1}{\underline{Z}_0}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}'_2}{\underline{Z}_0}; \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_0}; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}'_2}{\underline{Z}_0},$$

где $\underline{Z}_1, \underline{Z}_0, \underline{Z}'_2$ – полные комплексные сопротивления первичной обмотки, ветви намагничивания и вторичной обмотки. Их запись возможна в алгебраической и показательной форме согласно известных операций с комплексными числами, когда вычисляются модули и аргументы указанных комплексных сопротивлений:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = z_1 e^{j\alpha_1}, \quad z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad \alpha_1 = \arctg X_1/R_1;$$

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 = z_0 e^{j\alpha_0}, \quad z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}, \quad \alpha_0 = \arctg X_0/R_0;$$

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2 = z'_2 e^{j\alpha_2}, \quad z'_2 = \sqrt{R'^2_2 + X'^2_2}, \quad \alpha_2 = \arctg X'_2/R'_2;$$

С учетом перечисленных оговорок рассмотрим аналитическое выражение погрешности по напряжению для ТН:

$$\Delta U \% = -\frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100$$

Искомую разность модулей U_1 и U'_2 найдем, обращаясь к векторной диаграмме, приведенной на рис. 2а. Здесь изображены векторы \underline{U}_1 и \underline{U}'_2 , \underline{I}'_2 , а также вектор \underline{U}'_{20} приведенного выходного напряжения в режиме холостого хода с учетом следующих фазовых сдвигов: φ_a – между векторами \underline{U}_1 и \underline{U}'_{20} ; ψ_2 – между векторами \underline{U}'_{20} и \underline{I}'_2 ; φ_2 – между векторами \underline{U}'_2 и \underline{I}'_2 . Подчеркнем, что сдвиг фаз между \underline{U}_1 и \underline{U}'_2 определяет вторую погрешность ТН, которая называется угловой и обозначается через δ . Очевидно, что $\delta = \varphi_a + \psi_2 - \varphi_2$. Далее путем поворота векторов \underline{U}'_{20} и \underline{U}'_2 соответственно на углы φ_a и δ совместим их с вектором \underline{U}_1 . Тогда разность модулей U_1 и U'_2 будет представлять отрезок MN, состоящий из двух участков: МК и КН. Первый из них означает, что погрешность по напряжению имеет место даже в режиме холостого хода. Найдем ее величину

$$[\Delta U \%]_x = -\frac{U_1 - U'_{20}}{U_1} \cdot 100, \text{ обращаясь к уравнению (1), которое для режима х.х. запишется}$$

в виде: $\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}'_{20}$ или после перехода к модулям $U'_{20} = U_1/A$. Подстановка U'_{20} в формулу $[\Delta U \%]_x$ даст

$$[\Delta U \%] = -\frac{A-1}{A} \cdot 100$$

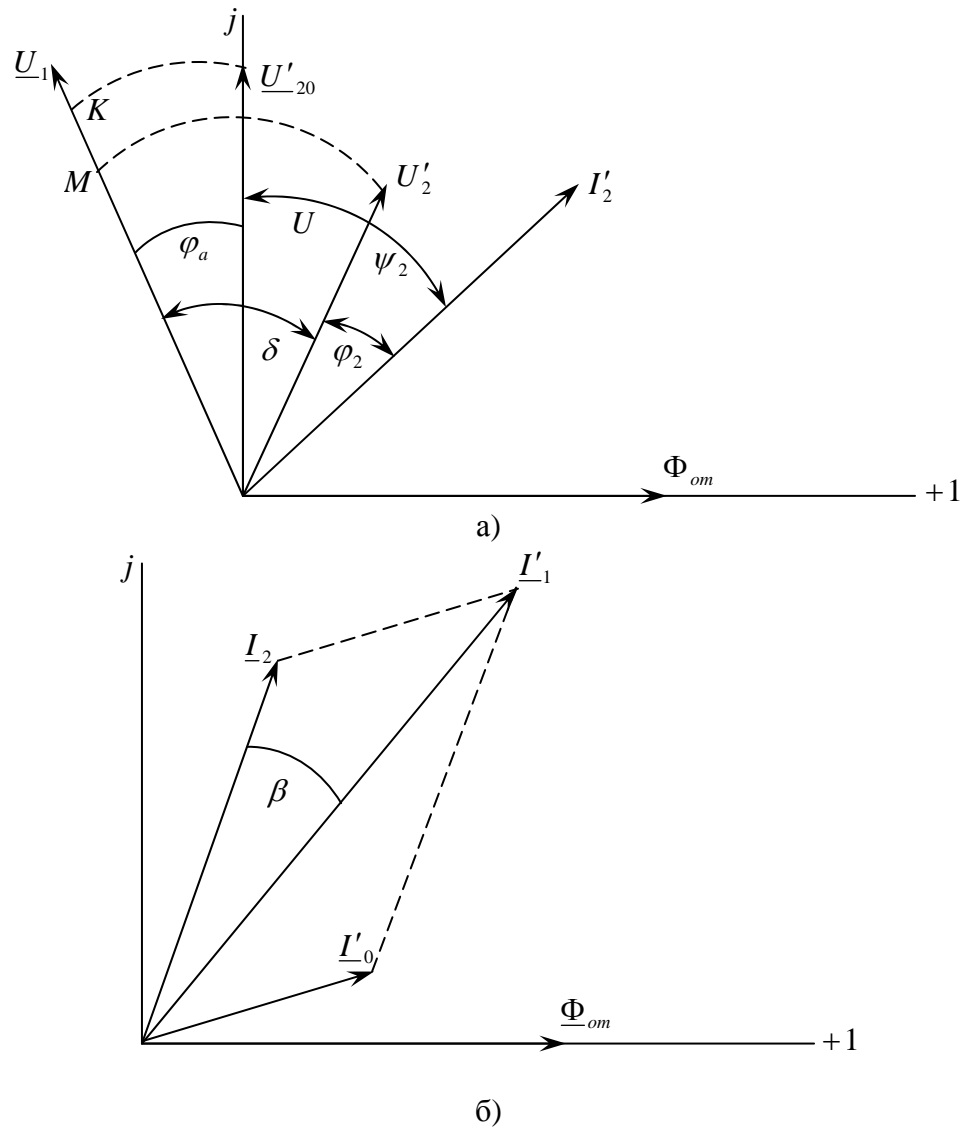


Рис. 2 Векторные диаграммы ТН и ТТ

Поскольку модуль A может быть выражен через параметры схемы замещения, т.е. в форме

$$A = \frac{z_{10}}{z_0}$$

где $z_{10} = \sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_0)^2}$ – модуль полного комплексного сопротивления в режиме х.х., которое представляет собой сумму полных комплексных сопротивлений первичной обмотки $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ и ветви намагничивания $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$; $z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ – модуль полного комплексного сопротивления \underline{Z}_0 , то $[\Delta U\%]_x$ переписывается в виде:

$$[\Delta U\%]_x = -\frac{z_{10} - z_0}{z_0} \cdot 100$$

В отношении угловой погрешности режима х.х., т.е. угла ϕ_a , вопрос практически решен при определении \underline{A} в комплексной форме, что дает расчетное соотношение вида:

$$\phi_a = \arctg \frac{X_0 + X_1}{R_0 + R_1} - \arctg \frac{X_0}{R_0}.$$

При включении нагрузки погрешность ТН по напряжению возрастает на величину $[\Delta U\%]_H = -\frac{U'_{20} - U'_2}{U_1} \cdot 100$.

Но значение U'_{20} уже найдено, а U'_2 найдем, обращаясь к уравнению (1), вначале как вектор:

$$\underline{U}'_2 = \frac{\underline{U}_1 \underline{Z}'_H}{\underline{Z}'_H \underline{A} + \underline{B}} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \underline{Z}'_H}{\underline{A}(\underline{Z}'_H + \underline{Z}_{ex2})},$$

где $\underline{Z}_{ex2} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}$ – полное комплексное входное сопротивление со стороны выходных режимов;

а затем и как модуль:

$$U'_2 = \frac{U_1 \cdot z'_H}{A \cdot z_\varepsilon}$$

где $z'_H = \sqrt{R'^2_H + X'^2_H}$ – модуль полного комплексного сопротивления нагрузки $\underline{Z}'_H = R'_H + jX'_H$; $z_\varepsilon = \sqrt{(R'_2 + R_{ex2})^2 + (X'_H + X_{ex2})^2}$ – модуль полного комплексного эквивалентного сопротивления $\underline{Z}'_\varepsilon = \underline{Z}'_H + \underline{Z}_{ex2}$.

Подстановка U'_{20} , U'_2 и A в формулу погрешности по напряжению даст:

$$[\Delta U\%]_H = -\frac{(z_\varepsilon - z'_H) \cdot z_0}{z_{10} \cdot z_\varepsilon} \cdot 100.$$

Угловая погрешность в режиме нагрузки найдется как разность углов ψ_2 и φ_2 , для определения которых пригодны формулы:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_{ex2} + x'_H}{R_{ex2} + R'_H}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{x'_H}{R'_H}$$

Итоговое значение погрешности по напряжению будет представлять собой сумму рассмотренных составляющих, т.е. $[\Delta U\%] = [\Delta U\%]_X + [\Delta U\%]_H$. Аналогичная операция в отношении углов фазовых сдвигов дает результирующую угловую погрешность $\delta = \varphi_a + \psi_2 - \varphi_2$.

Методика определения погрешностей ТТ в принципе повторяет рассмотренную, но строится она на использовании основного уравнения (2), согласно которому

$$I_2 = \frac{I'_1}{\underline{CZ}_H + \underline{D}}$$

или после перехода к модулям

$$I_2 = \frac{I'_1 z'_0}{z_{об}}, \quad (3)$$

где $z_{об} = \sqrt{(R_2 + R'_0 + R_n) + (X_2 + X'_0 + X_n)}$ – модуль полного общего сопротивления $\underline{Z}_{об}$, в состав которого входят: полное комплексное сопротивление вторичной обмотки $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$, полное комплексное сопротивление ветви намагничивания $\underline{Z}'_0 = R'_0 + jX'_0$ и полное комплексное сопротивление нагрузки $\underline{Z}'_n = R'_n + jX'_n$, $\underline{Z}_{об} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}'_0 + \underline{Z}_n$.

Подстановка I_2 в формулу токовой погрешности ТТ $[\Delta I\%] = -\frac{I'_1 - I_2}{I'_1}$ даст следующее соотношение

$$[\Delta I\%] = -\frac{z_{o\delta} - z'_0}{z_{o\delta}} \cdot 100$$

Что же касается угловой погрешности или угла сдвига β между векторами токов I'_1 и I_2 , то ее найдем, обращаясь к векторной диаграмме (см. рис. 2б) и к теореме косинусов, согласно которой

$$I_0'^2 = I_1'^2 + I_2^2 - 2I_1'I_2 \cos \beta, \quad (4)$$

где I'_0 – модуль тока, протекающего по ветви намагничивания.

Расчет тока I'_0 можно выполнить по формулам:

$$I'_0 = \frac{U_{20H}}{z'_0} = \frac{I_2 z_{\varepsilon 2}}{z'_0} = \frac{I_1 z_{\varepsilon 2}}{z_{o\delta}} \quad (5)$$

где U_{20H} – напряжение на зажимах ветви намагничивания при произвольной нагрузке;

$z_{\varepsilon 2} = \sqrt{(R_2 + R_H)^2 + (X_2 + X_H)^2}$ – модуль полного комплексного эквивалентного сопротивления $Z_{\varepsilon 2} = Z_2 + Z_H$.

Подстановка (3) и (5) в формулу (4) даст возможность найти $\cos \beta$ в виде:

$$\cos \beta = 0,5 \left(\frac{z_{o\delta}}{z'_0} + \frac{z'_0}{z_{o\delta}} - \frac{z_{\varepsilon 2}^2}{z'_0 \cdot z_{o\delta}} \right)$$

$$\text{Отсюда } \beta = \arccos 0,5 \left(\frac{z_{o\delta}}{z'_0} + \frac{z'_0}{z_{o\delta}} - \frac{z_{\varepsilon 2}^2}{z'_0 \cdot z_{o\delta}} \right).$$

Таким образом, использование предложенной методики анализа погрешностей ТН и ТТ определяет логичную последовательность изложения материала и ведет к простым, компактным и с физической точки зрения понятным соотношениям, которые к тому же корректны по своей точности.

In work the new technique of definition of errors of measuring transformers of a current and the voltage, based on use of the basic equations of the two-port network is offered. Such approach excludes intricacy in a statement of a material, gives to it severity, logicity and laconicalness. Settlement parities turning out at it are simple, compact, convenient in a settlement practice and absolutely correct.

1. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока. – М.: «Энергия», 1964.
2. Дымков А.М. Трансформаторы напряжения. – М.: ГЭИ, 1963.
3. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Атомиздат, 1988.