

DIFFERENTIATED DETERMINATION OF SCATTERING RESISTANCE OF TRANSFORMER

I. P. Popov

Kurgan Regional Creative Union of Authors in the Field of Science and Technology,
Kurgan, Russian Federation

The total scattering reactance of the transformer with concentric cylindrical windings depends on the coils thickness and the gap between them. Existing methods do not allow measuring reactance of scattering for each winding of a transformer separately, therefore, for simplicity they are often considered equal to each other. The case when they are not substantially equal is considered in the paper. In fact, the calculation of the flux linkage of the external winding shows that its reactive resistance of scattering is greater than the total resistance of scattering of both windings. Two circumstances follow from this. Firstly, the internal winding of the transformer absorbs magnetic flux to a greater extent than it scatters (scatters its magnetic flux, absorbs from the external winding). Secondly, its (equivalent) reactance of scattering is capacitive. The purpose of the study is to justify the possibility of experimental determination of the scattering reactance for each transformer winding separately. The relevance of the work is due to the widespread distribution of transformers. The scattering reactance of each winding of the transformer individually can be determined by at least three experimental methods that give satisfactory agreement between the results. An almost paradoxical result is the capacitive nature of the scattering resistance of the inner winding of the transformer obtained only for concentric cylindrical windings. It should not be generalized with other types of windings. The presented experimental methods are not related to the nature of the reactivity of scattering resistances. They are universal and they can be used with any type of windings. The obtained results are recommended for use in the design and study of transformers.

Keywords: transformer, winding, scattering, inductive nature of the resistance, capacitive nature of the resistance, flux linkage, magnetic flux.

For citation:

Popov, Igor P. "Differentiated determination of scattering resistance of transformer." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-932-940.

УДК 621.314.21.042.52

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

И. П. Попов

Курганский областной творческий союз авторов в области науки и техники,
Курган, Российская Федерация

Изучено суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками, которое зависит от толщины катушек и величины зазора между ними. Поскольку существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, часто для простоты их полагают равными друг другу. В данной работе рассмотрен случай, когда они существенно не равны. Выполненный расчет потокоцепления внешней обмотки показывает, что ее реактивное сопротивление рассеяния больше суммарного сопротивления рассеяния обеих обмоток. Из этого вытекают два обстоятельства: первое — внутренняя обмотка трансформатора поглощает магнитный поток в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой магнитный поток, поглощает от внешней обмотки); второе — ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным. Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки в отдельности для любых видов трансформаторов. Трансформаторы находят широкое применение на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта. Отмечается, что реактивное

сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов. Парадоксальным является то, что для концентрических цилиндрических обмоток трансформатора установлен емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки. Обобщать его с другими типами обмоток не следует. Представленные экспериментальные методы не связаны с характером реактивности сопротивлений рассеяния, они являются универсальными — их можно использовать при любых типах обмоток. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный характер сопротивления, емкостный характер сопротивления, потокосцепление, магнитный поток.

Для цитирования:

Попов И. П. Дифференцированное определение сопротивлений рассеяния трансформатора / И. П. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-932-940.

Введение (Introduction)

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками [1]:

$$x = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{3} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right), \quad (1)$$

где ω — циклическая частота тока; μ_0 — постоянная магнитная; D — средний диаметр обмотки; w — число витков (приведенное); l — высота обмотки; a_0 — зазор между катушками; a_1, a_2 — толщины катушек.

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными половине от x . Применительно к рассматриваемому случаю они существенно не равны.

Потокасцепление внешней обмотки [2]:

$$\Psi_2 = \frac{\mu_0 \pi D}{l} \left(\int_0^{a_1} w_2 i \frac{w_1}{a_1} x dx + \int_0^{a_0} w_2 i w_2 dx + \int_0^{a_2} \frac{w_2}{a_2} x \frac{w_2}{a_2} x dx \right) = \frac{i \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right),$$

где i — приведенный ток; $w_1 = w_2 = w$ (индексы приведены для наглядности интегрирования).

Отсюда реактивное сопротивление рассеяния внешней обмотки

$$x_2 = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right). \quad (2)$$

Вычитание реактивного сопротивления рассеяния внешней обмотки из выражения (1) дает реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки:

$$x_1 = -\frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \frac{a_1}{6}. \quad (3)$$

Этот результат был получен Е. Г. Марквардтом [2], который, однако, не имел признания из-за отсутствия экспериментальной проверки. Знак «—» в выражении (3) указывает на два обстоятельства: первое — внутренняя обмотка поглощает магнитный поток [3] в большей степени, чем рассеивает; второе — ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным. Из выражений (2) и (3) следует:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right); \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{6l}{\omega^2 \mu_0 \pi D w^2 a_1}. \quad (5)$$

Целью исследования является обоснование возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности, в частности верификация выражений (2)–(5).

Трансформаторы находят широкое применение на судах, верфях, в портах, на судостроительных заводах и во многих хозяйствах водного транспорта [4]–[6]. С экспериментальным определением активных сопротивлений r_1 и r_2 обмоток проблем не существует.

Реактивное сопротивление рассеяния любой обмотки можно определить из формулы

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Полное сопротивление z , казалось бы, можно определить в соответствии с законом Ома для участка цепи. Однако при коротком замыкании, когда принято измерять реактивное сопротивление рассеяния, напряжение на вторичной обмотке равно нулю. Это и является причиной, которая не позволяет раздельно измерять рассеяния обмоток. Вместе с тем данную проблему можно решить, причем несколькими способами, что и является задачей настоящего исследования.

Методы и результаты исследования (Methods and Results of Research)

В данном исследовании используются общенаучные и математические методы, а также электротехнические расчеты. Существующие измерительные комплексы позволяют измерять действующие значения электрических величин и фазные сдвиги между ними практически с любой заданной точностью. Однако при поочередных измерениях величин высокая точность каждого измерения мало что дает, поскольку сами измеряемые величины нестабильны. Так как в целях определения реактивных сопротивлений важны не столько значения токов и напряжений, сколько соотношения между ними, проблема с их нестабильностью решена одномоментной регистрацией необходимых параметров, осуществляемой процессором. Это обеспечивает точность вычисляемых величин, сопоставимую с точностью единичного измерения.

Высокоточный метод холостого хода (XX)

Из схемы замещения трансформатора [7]–[9] (рис. 1) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0.$$

Отсюда

$$\dot{U}_{z1} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 z_1;$$

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1}. \quad (6)$$

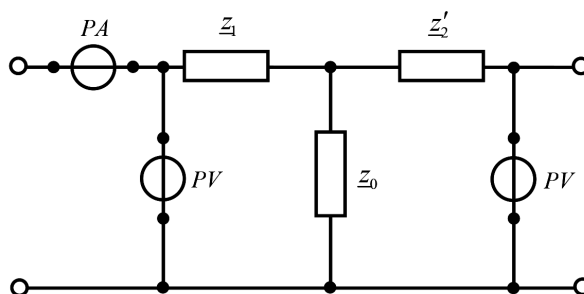


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Из обратимости трансформатора [10]–[12] следует

$$z'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}'_1}{\dot{I}'_2}.$$

Здесь и далее верхний левый индекс «2» указывает, что величина получена во втором (обратном) эксперименте.

Способ экспериментального определения параметров трансформатора XX

Порядок действий:

1. Измеряют и «приводят» величины: $\dot{U}_1, \dot{U}'_2, \dot{I}_1, {}^2\dot{U}'_2, {}^2\dot{U}_1, \dot{I}'_2, r_1, r'_2$.
2. В соответствии с выражением (6) определяют z_1 .
3. Определяют x_1, C_1 .
4. В соответствии с выражением (7) определяют z'_2 .
5. Определяют x'_2, L'_2 .

Пример 1. Определить сопротивления рассеяния для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 219,138 \text{ В}$; $\dot{U}'_2 = 219,054e^{j0,23^\circ} \text{ В}$; $\dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ} \text{ А}$; ${}^2\dot{U}'_2 = 218,825 \text{ В}$; ${}^2\dot{U}_1 = 218,343e^{j0,02^\circ} \text{ В}$; $\dot{I}'_2 = 0,817e^{-j80,32^\circ} \text{ А}$.

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1} = \frac{219,138 - 219,054e^{j0,23^\circ}}{0,819e^{-j80,12^\circ}} = 1,075e^{-j4,33^\circ} \text{ Ом};$$

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом};$$

$$x_1 = -0,081 \text{ Ом};$$

$$C_1 = -\frac{1}{2\pi f x_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,081} = 0,039 \text{ Ф};$$

$$z'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}'_2} = \frac{218,825 - 218,343e^{j0,02^\circ}}{0,817e^{-j80,32^\circ}} = 0,601e^{j69,39^\circ} \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0,211 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,562 \text{ Ом};$$

$$L'_2 = \frac{x'_2}{2\pi f} = \frac{0,562}{2\pi \cdot 50} = 1,790 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Таким образом, экспериментальное определение реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки трансформатора высокоточным методом холостого хода подтверждает достоверность выражений (2)–(5).

Высокоточный метод короткого замыкания (КЗ)

Из схемы замещения трансформатора следует:

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0 = \dot{I}'_2 z'_2;$$

$$z_0 = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_0} z'_2.$$

Полное сопротивление при КЗ:

$$z = z_1 + \frac{z_0 z'_2}{z_0 + z'_2} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z_0 z'_2}{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z'_2 + z'_2} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_0} z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}'_1 - \dot{I}'_2} z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_1} z'_2;$$

$$z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} z'_2.$$

Отсюда следует, что

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} z'_2.$$

Из обратимости трансформатора следует:

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1} \underline{z}_1;$$

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \left(\frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1} \underline{z}_1 \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2} + \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2} \underline{z}_1;$$

$$\underline{z}_1 \left(1 - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_2} \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{{}^2\dot{I}'_2};$$

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{U}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}{\dot{I}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{I}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}; \quad (8)$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \frac{\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{U}_1 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}{\dot{I}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{I}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}. \quad (9)$$

Способ экспериментального определения параметров трансформатора (КЗ)

Порядок действий:

1. Измеряют и «приводят» величины: $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{I}'_2, {}^2\dot{U}'_2, {}^2\dot{I}'_2, {}^2\dot{I}'_1, r_1, r'_2$.

2. В соответствии с выражением (8) определяют $\underline{z}_1$.

3. Определяют x_1 .

4. В соответствии с выражением (9) определяют $\underline{z}'_2$.

5. Определяют x'_2 .

Пример 2. Трансформатор ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 5,513 \text{ В}; \dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50^\circ} \text{ А}; \dot{I}'_2 = 4,016e^{-j20,48^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{U}'_2 = 5,572 \text{ В}; {}^2\dot{I}'_2 = 4,061e^{j20,71^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{I}_1 = 5,660e^{-j19,29^\circ} \text{ А};$

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{U}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}{\dot{I}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{I}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}} =$$

$$= \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 1,072e^{-j4,29^\circ} \text{ Ом};$$

$$r_1 = 1,069 \text{ Ом};$$

$$x_1 = -0,080 \text{ Ом};$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \frac{\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{U}_1 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}}{\dot{I}_1 \frac{{}^2\dot{I}'_2}{{}^2\dot{I}'_1} - \dot{I}'_2 \frac{{}^2\dot{I}_1}{{}^2\dot{I}'_1}} =$$

$$= \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50^\circ} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 0,597e^{j69,42^\circ} \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0,210 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = 0,559 \text{ Ом}.$$

Таким образом, экспериментальное определение реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки трансформатора высокоточным методом короткого замыкания практически равнозначно высокоточному методу холостого хода.

Приближенный метод короткого замыкания при последовательном соединении

У двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются как первичные, так и вторичные обмотки. В результате схема принимает вид, представленный на рис. 2.

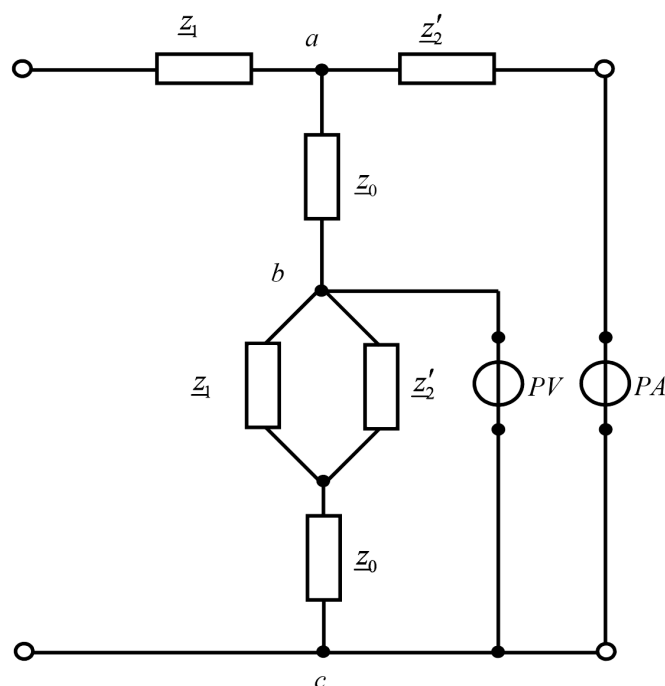


Рис. 2. Схема замещения
для последовательного соединения

Ввиду того, что величины z_1 и z_2 значительно меньше z_0 , справедливо соотношение

$$U_{bc} \approx 0,5 U_{ac}.$$

Однако $U_{ac} = U_{z2}$, следовательно,

$$z_2' = \frac{2U_{bc}}{I_2'}.$$
 (10)

Величины $r_1, r_2, x_k = x_1 + x_2$ определяются известными экспериментальными методами:

$$x_2 = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2};$$

$$x_1 = x_k - x_2.$$
 (11)

Кроме того, последний результат может быть получен с использованием обратимости трансформатора:

$$z_1 = \frac{2^2 U_{bc}}{I_1^2},$$

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}.$$

Способ экспериментального определения параметров трансформатора (КЗ)

Используют следующий алгоритм действий:

1. Два идентичных трансформатора соединяют по схеме в соответствии с рис. 2.
2. Измеряют и «приводят» величины: $U_{bc}, I_2', r_1, r_2', x_k$.
3. В соответствии с выражением (10) определяют z_2' .
3. Определяют x_2' .
4. В соответствии с выражением (11) определяют x_1 .

Пример 3. Два идентичных трансформатора ОСМ-1,00 соединены по схеме в соответствии с рис. 2. Измеренные величины: $U_{bc} = 1,2$ В; $I_2' = 3,9$ А; $r_1 = 1,1$ Ом; $r_2' = 0,2$ Ом; $x_k = 0,52$ Ом.

$$z'_2 = \frac{2U_{bc}}{I'_2} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = \sqrt{z'^2_2 - r'^2_2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ Ом};$$

$$x_1 = x_k - x'_2 = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ Ом}.$$

Недостатком приближенного метода короткого замыкания при последовательном соединении по сравнению с высокоточными методами является необходимость наличия двух идентичных трансформаторов, а его сравнительным достоинством — простота экспериментов.

Оценка точности полученных результатов

Соотношение реактивных сопротивлений обмоток, в соответствии с выражениями (2) и (3),

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a_1/2 + a_0 + a_2/3}{a_1/6}.$$

Пусть $a_1 = 3a_0 = a_2 = a$. Тогда $\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{a/2 + a/3 + a/3}{a/6} = 7$.

Это соотношение, в соответствии с результатами примера 1, можно представить в виде —

$$\frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,562 \text{ Ом}}{0,081 \text{ Ом}} = -6,938, \text{ в соответствии с результатами примера 2 — } \frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,559 \text{ Ом}}{0,080 \text{ Ом}} = -6,987, \text{ в со-}$$

$$\text{ответствии с результатами примера 3 — } \frac{x'_2}{x_1} = -\frac{0,59 \text{ Ом}}{0,07 \text{ Ом}} = -8,429. \text{ Разброс значений небольшой.}$$

Обсуждение (Discussion)

Парадоксальный результат — емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Этот результат не является беспрецедентным [2], [13], [14]. Индуктивная электрическая машина — синхронный компенсатор — в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер [1].

Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния, они являются универсальными — их можно использовать при любых типах обмоток.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов.
2. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов, в том числе для применения их на водном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 360 с.
2. Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии / Е. Г. Марквардт // Электричество. — 1935. — № 9. — С. 44–51.
3. Попов И. П. Комбинированные векторы и магнитный заряд / И.П. Попов // Прикладная физика и математика. — 2018. — № 6. — С. 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329.
4. Jahromi A. An approach to power transformer asset management using health index / A. N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, W. Fan // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2009. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 20–34. DOI: 10.1109/MEI.2009.4802595.

5. Chatterjee A. Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method / A. Chatterjee, P. Bhattacharjee, N. K. Roy, P. Kumbhakar // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2013. — Vol. 45. — Is. 1. — Pp. 137–141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.08.044.
6. Abu-Elanien A. E. B. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic / A.E.B. Abu-Elanien, M.M.A. Salama, M. Ibrahim // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2012. — Vol. 27. — Is. 4. — Pp. 2029–2036. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
7. Diwyacitta K. Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer / K. Diwyacitta, R. A. Prasojo // *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — Is. 3. — Pp. 585–602.
8. Husain Z. Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers / Z. Husain // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2018. — Vol. 10. — No. 2. — Pp. 300–317. DOI: 10.15676/ijeei.2018.10.2.8.
9. Ranga C. Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers / C. Ranga, A.K. Chandel // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — No. 4. — Pp. 850–865. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.4.16.
10. Ranga C. Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers / C. Ranga, A. K. Chandel, R. Chandel // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. — 2017. — Vol. 9. — No. 2. — Pp. 394–406. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.2.13.
11. Rahmati A. Protection of power transformer using multi criteria decision-making / A. Rahmati, M. Sanaye-Pasand // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2015. — Vol. 68. — Pp. 294–303. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.073.
12. Ghoneim S. S. M. A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis / S. S. M. Ghoneim, I. B. M. Taha // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. — 2016. — Vol. 81. — Pp. 265–274. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.02.018.
13. Попов И. П. Емкостно-инертное устройство / И. П. Попов // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. — 2015. — № 2. — С. 43–45.
14. Попов И. П. Вращательные инертно-емкостные устройства / И. П. Попов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. — 2011. — № 3 (31). — С. 187–192.

REFERENCES

1. Kopylov, I. P. *Elektricheskiye mashiny*. M.: Energoatomizdat, 1986.
2. Markvardt Ye. G. “Ob elektromagnitnom rasseyanii.” *Elektrichestvo* 9 (1935): 44–51.
3. Popov, Igor Pavlovich. “Combined vectors and magnetic charge.” *Prikladnaya fizika i matematika* 6 (2018): 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329.
4. Jahromi, A., R. Piercy, S. Cress, and W. Fan. “An approach to power transformer asset management using health index.” *IEEE Electrical Insulation Magazine* 25.2 (2009): 20–34. DOI: 10.1109/MEI.2009.4802595.
5. Chatterjee, Anjali, Partha Bhattacharjee, N.K. Roy, and P. Kumbhakar. “Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 45.1 (2013): 137–141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.08.044.
6. Abu-Elanien, Ahmed EB, M.M.A. Salama, and M. Ibrahim. “Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic.” *IEEE Transactions on Power Delivery* 27.4 (2012): 2029–2036. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
7. Diwyacitta, Karunika, and Rahman Azis Prasojo. “Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer.” *International Journal on Electrical Engineering & Informatics* 9.3 (2017): 585–602.
8. Husain, Zakir. “Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers.” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 10.2 (2018): 300–317. DOI: 10.15676/ijeei.2018.10.2.8.
9. Ranga, Chilaka, and Ashwani Kumar Chandel. “Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers.” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 9.4 (2017): 850–865. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.4.16.

10. Ranga, Chilaka, Ashwani Kumar Chandel, and Rajeevan Chandel. "Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers." *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 9.2 (2017): 394. DOI: 10.15676/ijeei.2017.9.2.13.

11. Rahmati, A., and M. Sanaye-Pasand. "Protection of power transformer using multi criteria decision-making." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 68 (2015): 294–303. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.073.

12. Ghoneim, Sherif SM, and Ibrahim BM Taha. "A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 81 (2016): 265–274. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.02.018.

13. Popov, Igor Pavlovich. "Capacitive-inert device." *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University* 2 (2015): 43–45.

14. Popov, Igor P. "Rotational inert-capacitive devices." *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series* 3(31) (2011): 187–192.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Попов Игорь Павлович —

главный специалист

Курганский областной творческий союз авторов
в области науки и техники

640015, Российская Федерация, Курган,

ул. Парижской Коммуны, 33

e-mail: ip.popow@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Popov, Igor P. —

Chief Specialist

Kurgan Regional Creative Union of Authors
in the Field of Science and Technology

33, Parizhskoy Kommuny Str., Kurgan, 640015,

Russian Federation

e-mail: ip.popow@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2019 г.

Received: August 20, 2019.