

## Методы определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности

И. П. Попов

*Курганский государственный университет, г. Курган, Россия;*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>, e-mail: [ip.popow@yandex.ru](mailto:ip.popow@yandex.ru)

### Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию  
09.08.2019;  
получена  
после доработки  
07.11.2019

*Ключевые слова:*  
трансформатор,  
обмотка,  
рассеяние,  
индуктивный,  
емкостный,  
потокосцепление,  
магнитный поток

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками зависит от толщин катушек и величины зазора между ними. Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности, поэтому полагают их равными друг другу. В действительности, применительно к рассматриваемому случаю, они существенно не равны. Расчет потокосцепления внешней обмотки показывает, что ее реактивное сопротивление рассеяния больше суммарного сопротивления рассеяния обеих обмоток. Из этого вытекают два обстоятельства: 1) внутренняя обмотка трансформатора поглощает магнитный поток в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой магнитный поток, поглощает от внешней обмотки); 2) ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным. В процессе исследования обоснована возможность определения реактивных сопротивлений рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности с помощью трех экспериментальных методов, дающих удовлетворительное совпадение результатов. Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки трансформатора – получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток (обобщать его с другими типами обмоток не следует). Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Они универсальны и применимы для любых типов обмоток. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

### Для цитирования

Попов И. П. Методы определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 513–520. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-513-520.

## Methods for determining the scattering of transformer windings individually

Igor P. Popov

*Kurgan State University, Kurgan, Russia;*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>, e-mail: [ip.popow@yandex.ru](mailto:ip.popow@yandex.ru)

### Article info

Received  
09.08.2019;  
received  
in revised  
07.11.2019

*Key words:*  
transformer,  
winding,  
scattering,  
inductive,  
capacitive,  
flux linkage,  
magnetic flux

### Abstract

The total leakage reactance of the transformer with concentric cylindrical windings depends on the thickness of the coils 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. In fact, in relation to the case under consideration, they are essentially not equal. In fact, the calculation of the flux linkage of the external winding shows that its reactive scattering resistance is greater than the total scattering resistance of both windings. Two circumstances follow from this. First, 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). The second is that its (equivalent) scattering reactance 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 dissipation 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 to other types of windings. The presented experimental methods are not tied to the nature of the reactivity of scattering resistances. They are universal and can be used with any type of windings. The results obtained are recommended for use in the design and study of transformers.

### For citation

Popov, I. P. 2019. Methods for determining the scattering of transformer windings individually. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 513–520. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-513-520.

### Введение

Актуальность проблемы определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности обусловлена той важной ролью, которую играют сопротивления рассеяния в силовых трансформаторах. В аварийных режимах индуктивность рассеяния ограничивает уровни токов коротких замыканий и интенсивность нагрева обмоток, способствует уменьшению электродинамических усилий, благодаря чему снижается вероятность повреждения силового трансформатора при коротких замыканиях (внутренних и сквозных). С другой стороны, с индуктивностью рассеяния связаны добавочные потери в элементах конструкции трансформатора, что уменьшает его полезную мощность, КПД, напряжение на вторичных обмотках и обуславливает потребление реактивной мощности (*Sima et al., 2019; Селиванов и др., 2018*).

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками равно

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

где  $\omega$  – циклическая частота тока;  $\mu_0$  – постоянная магнитная;  $D$  – средний диаметр обмотки;  $w$  – число витков (приведенное);  $l$  – высота обмотки;  $a_0$  – зазор между катушками;  $a_1, a_2$  – толщины катушек (*Копылов, 1986*).

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки в отдельности, поэтому полагают их равными половине величины, полученной при расчете по формуле (1) (*Бердников, 2006; 2005*).

В действительности, применительно к рассматриваемому случаю, они существенно не равны.

Потокосцепление внешней обмотки определяется по формуле

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

где  $i$  – приведенный ток, а  $w_1 = w_2 = w$  (индексы показаны для наглядности интегрирования) (*Марквардт, 1935*). Отсюда реактивное сопротивление рассеяния внешней обмотки равно

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

Вычитание его значения из величины, полученной при расчете по формуле (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 получен Е. Г. Марквардтом (*Марквардт, 1938*), но он не имел признания из-за отсутствия экспериментальной проверки.

Знак "-" в выражении (3) указывает на два обстоятельства: 1) внутренняя обмотка поглощает магнитный поток (*Zhao et al., 2019; Попов, 2009*) в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой, поглощает от внешней обмотки); 2) ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным.

Другими словами, рассеяние магнитного потока порождает индуктивное сопротивление, следовательно, противоположный процесс – поглощение магнитного потока – порождает противоположное по характеру емкостное реактивное сопротивление.

Потокосцепление внутренней обмотки с собственным потоком (в области  $a_1$ ) имеет вид

$$\Psi_{1-1} = \frac{i \mu_0 \pi D w^2}{l} \frac{a_1}{3},$$

т. е. рассеивает поток. Ее же потокосцепление с потоком внешней обмотки (в области  $a_1$ ) равно

$$\Psi_{1-2} = - \frac{i \mu_0 \pi D w^2}{l} \frac{a_1}{2}.$$

Данный поток противоположен, следовательно, внутренняя обмотка его не рассеивает, а поглощает, и этот поток по абсолютной величине больше первого. Таким образом, суммарное потокосцепление отрицательное и реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки является емкостным.

Из выражений (2) и (3) следует

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

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

При экспериментальном определении активных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  обмоток не возникает никаких проблем (Данилин и др., 2016).

Реактивное сопротивление рассеяния любой обмотки определяется 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, что является причиной, не позволяющей отдельно измерять рассеяния обмоток. Данную проблему можно решить, используя несколько способов.

Целью настоящего исследования являлось обоснование возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности и, в частности, верификации выражений (2)–(5).

### Методы исследования

В процессе исследования применялись электротехнические расчеты. Существующие измерительные комплексы позволяют определять действующие значения электрических величин и фазные сдвиги между ними практически с любой заданной точностью. Однако при поочередных измерениях величин высокая точность каждого измерения не имеет большого значения, поскольку сами измеряемые величины нестабильны. При определении реактивных сопротивлений важны не столько величины токов и напряжений, сколько соотношения между ними. Проблема с их нестабильностью решена одномоментной регистрацией необходимых параметров, осуществляемой процессором, что обеспечивает точность вычисляемых величин, сопоставимую с точностью единичного измерения.

### Результаты и обсуждение

#### Высокоточный метод холостого хода

Из схемы замещения трансформатора (рис. 1) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке равно

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

Отсюда

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

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

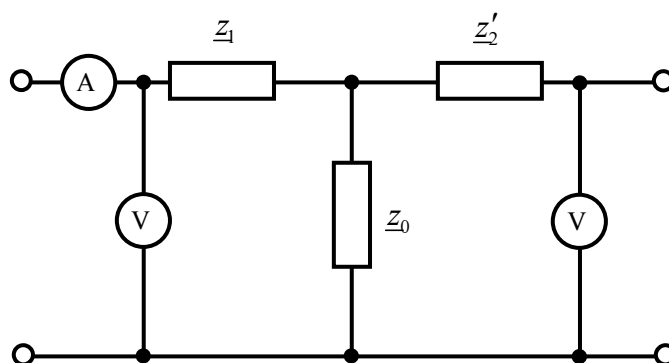


Рис. 1. Схема замещения трансформатора  
Fig. 1. Transformer equivalent circuit

Из обратимости трансформатора 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 (обратимом) эксперименте.

*Пример 1.* Определить сопротивления рассеяния обмоток трансформатора ОСМ-1.00, используя измеренные с высокой точностью величины ( $\dot{U}_1 = 219,138$  В;  $\dot{U}_2' = 219,054e^{j0,23^\circ}$  В;  $\dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ}$  А;  ${}^2\dot{U}_2' = 218,825$  В;  ${}^2\dot{U}_1' = 218,343e^{j0,02^\circ}$  В;  $\dot{I}_2' = 0,817e^{-j80,32^\circ}$  А):

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

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом,}$$

$$x_1 = -0,081 \text{ Ом,}$$

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

$$z_2' = \frac{{}^2\dot{U}_2' - {}^2\dot{U}_1'}{\dot{I}_2'} = \frac{218,825 - 218,343e^{j0,02^\circ}}{0,817e^{-j80,32^\circ}} = 0,601e^{j69,39^\circ} \text{ Ом,}$$

$$r_2' = 0,211 \text{ Ом,}$$

$$x_2' = 0,562 \text{ Ом,}$$

$$L_2' = \frac{x_2'}{2\pi f} = \frac{0,562}{2\pi \cdot 50} = 1,790 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

*Пример 2.* Определить сопротивления рассеяния обмоток трансформатора ОСМ-1.00, используя величины, измеренные с точностью, уменьшенной на порядок ( $\dot{U}_1 = 219,14$  В;  $\dot{U}_2' = 219,05e^{j0,2^\circ}$  В;  $\dot{I}_1 = 0,82e^{-j80,1^\circ}$  А):

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2'}{\dot{I}_1} = \frac{219,14 - 219,05e^{j0,2^\circ}}{0,82e^{-j80,1^\circ}} = 1,44e^{j39,9^\circ} \text{ Ом,}$$

$$r_1 = 1,1 \text{ Ом,}$$

$$x_1 = +0,92 \text{ Ом.}$$

Как показывают расчеты, понижение точности на порядок мало сказалось на определении активного сопротивления внутренней обмотки, однако привело к совершенно недостоверному значению реактивного сопротивления, включая смену его знака.

Таким образом, точность измерений в примере 1 (а также 3 и 4) является минимально необходимой.

*Высокоточный метод короткого замыкания*

Из схемы замещения трансформатора следует, что

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0 = \dot{I}_2' z_2',$$

$$z_0 = \frac{\dot{I}_2'}{\dot{I}_0} z_2'.$$

Полное сопротивление при коротком замыкании равно

$$\underline{z} = z_1 + \frac{z_0 z_2'}{z_0 + z_2'} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z_2'^2}{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 z_2' + z_2'} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_0} z_2' = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_1 - \dot{I}'_2} z_2' = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} z_2',$$

$$\underline{z} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} z_2'.$$

Отсюда

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} z_2'.$$

Из обратимости трансформатора следует

$$z_2' = \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} z_1,$$

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \left( \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} z_1 \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} z_1,$$

$$z_1 \left( 1 - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2},$$

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 \dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1},$$

$$z_2' = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1}.$$

*Пример 3.* Определить сопротивления рассеяния обмоток трансформатора ОСМ-1.00, используя измеренные с высокой точностью величины ( $\dot{U}_1 = 5,513$  В;  $\dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50^\circ}$  А;  $\dot{I}'_2 = 4,016e^{-j20,48^\circ}$  А;  ${}^2\dot{U}'_2 = 5,572$  В;  ${}^2\dot{I}'_2 = 4,061e^{j20,71^\circ}$  А;  ${}^2\dot{I}_1 = 5,660e^{-j19,29^\circ}$  А ):

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1 \dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1} = \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 1,072e^{-j4,29^\circ} \text{ Ом},$$

$$r_1 = 1,069 \text{ Ом},$$

$$x_1 = -0,080 \text{ Ом},$$

$$z_2' = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1} = \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50^\circ} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 0,597e^{j69,42^\circ} \text{ Ом},$$

$$r_2' = 0,210 \text{ Ом},$$

$$x_2' = 0,559 \text{ Ом}.$$

*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.

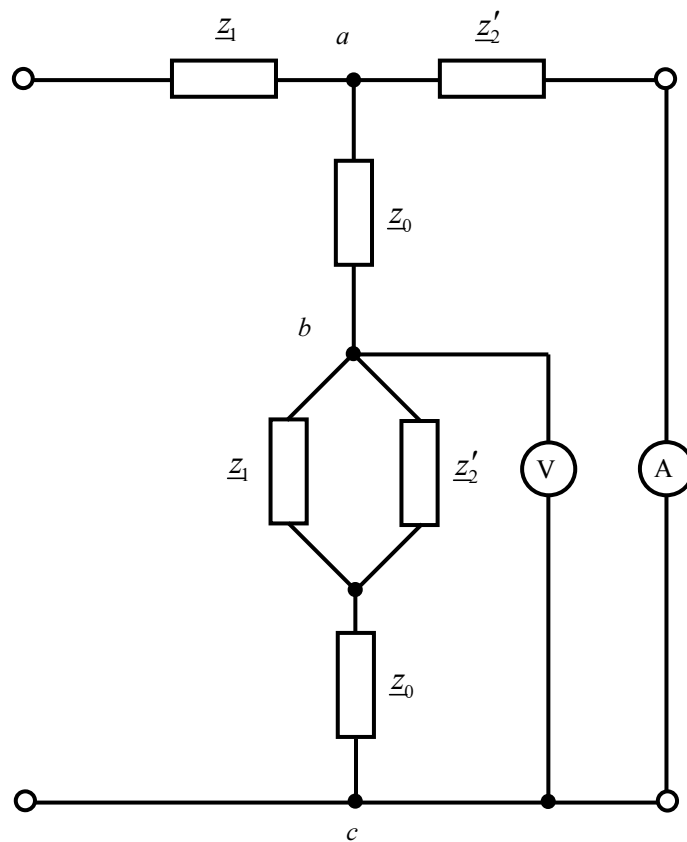


Рис. 2. Схема замещения для последовательного соединения  
Fig. 2. Series equivalent circuit

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

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

Но  $U_{ac} = U_{z_2}$ , следовательно,

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

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

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

$$x_1 = x_k - x_2.$$

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

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

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

*Пример 4.* Два идентичных трансформатора ОСМ-1.00 соединены по схеме в соответствии с рис. 2. Определить сопротивления рассеяния, используя 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):

$$z'_2 = \frac{2U_{bc}}{I'_2} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ Ом},$$
$$x'_2 = \sqrt{z'^2_2 - r'^2_2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ Ом},$$
$$x_1 = x_k - x'_2 = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ Ом}.$$

## Выводы

Реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено по крайней мере тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов.

Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки – получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его с другими типами обмоток не следует. Например, в однофазном трансформаторе, обмотки которого расположены на разных стержнях, оба сопротивления рассеяния являются индуктивными.

Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Их можно использовать для трансформаторов с Т-образной схемой замещения. Полученные результаты рекомендуется использовать при исследовании трансформаторов.

## Библиографический список

- Бердников Д. В. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра // Современная электроника. 2006. № 8. С. 58–61.
- Бердников Д. В. Связь индуктивности рассеяния трансформатора и потерь в снаббере обратного преобразователя // Современная электроника. 2005. № 3. С. 62–64.
- Данилин А. Н., Климов А. А. Экспериментальные исследования характеристик импульсных трансформаторов с различными типами магнитопроводов, выполненных по каскадной схеме // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 4. С. 704–714. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-4-704-714>.
- Копылов И. П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
- Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии // Электричество. 1935. № 9. С. 44–51.
- Марквардт Е. Г. Электромагнитные расчеты трансформаторов. Москва; Ленинград: ГОНТИ. Ред. энергетич. лит.-ры, 1938. 136 с.
- Попов И. П. О некоторых аспектах магнитоэлектрического взаимодействия // Вестник Челябинского государственного университета. 2009. № 24 (162). С. 34–39. (Физика; вып. 5).
- Селиванов В. Н., Баранник М. Б., Билин В. А., Ефимов Б. В. [и др.]. Анализ результатов многолетнего мониторинга токов в нейтральных автотрансформаторов // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 4. С. 607–615. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-607-615>.
- Sima W., Peng D., Yang M., Liu Y. [et al.]. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 110. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.050>.
- Zhao X., Yao C., Abu-Siada A., Liao R. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 111. P. 351–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.010>.

## References

- Berdnikov, D. V. 2006. Measurement of scattering inductance in transformers of pulse converters using an LRC meter. *Sovremennaya elektronika*, 8, pp. 58–61. (In Russ.)
- Berdnikov, D.V. 2005. Relationship between transformer dissipation inductance and losses in the snubber of a flyback converter. *Sovremennaya elektronika*, 3, pp. 62–64. (In Russ.)
- Danilin, A. N., Klimov, A. A. 2016. Experimental studies of the characteristics of pulse transformers with various types of magnetic cores made in cascade. *Vestnik of MSTU*, 19(4), pp. 704–714. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-704-714. (In Russ.)
- Kopylov, I. P. 1986. Electric machines. Moscow. (In Russ.)
- Markvardt, Ye. G. 1935. On electromagnetic scattering. *Elektrichestvo*, 9, pp. 44–51. (In Russ.)
- Markvardt, Ye. G. 1938. Electromagnetic calculations of transformers. Moscow. (In Russ.)

- Popov, I. P. 2009. On some aspects of magnetoelectric interaction. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 24(162), pp. 34–39. (In Russ.)
- Selivanov, V. N., Barannik, M. B., Bilin, V. A., Yefimov, B. V. et al. 2018. Analysis of the results of long-term monitoring of currents in neutrals of autotransformers. *Vestnik of MSTU*, 21(4), pp. 607–615. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-4-607-615. (In Russ.)
- Sima, W., Peng, D., Yang, M., Liu, Y. et al. 2019. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 110, pp. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.050>.
- Zhao, X., Yao, C., Abu-Siada, A., Liao, R. 2019. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111, pp. 351–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.010>.

#### Сведения об авторе

**Попов Игорь Павлович** – ул. Советская, 63, г. Курган, Россия, 640020; Курганский государственный университет, ст. преподаватель; e-mail: [ip.popow@yandex.ru](mailto:ip.popow@yandex.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>

**Igor P. Popov** – 63 Sovetskaya Str., Kurgan, Russia, 640020; Kurgan State University, Senior Lecturer;  
e-mail: [ip.popow@yandex.ru](mailto:ip.popow@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8683-0387>