

УДК 621.314.21.042.52

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

**ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАССЕЙЯНИЯ
ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА**

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 для каждой обмотки трансформатора в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными друг другу. В действительности применительно к рассматриваемому случаю они существенно не равны. В самом деле, 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 для каждой обмотки трансформатора в отдельности. Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением трансформаторов. 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 трансформатора получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру 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, емкостной, потокоцепление, магнитный поток.

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

**CAPACITIVE RESISTANCE OF THE SCATTERING
OF THE TRANSFORMER WINDING**

The total reactance of dispersion of a transformer with concentric cylindrical windings depends on the thickness of the coils and the size of the gap between them. The existing methods do not allow measuring the scattering reactances for each winding of the transformer separately, therefore, for simplicity, they are often considered to be equal to each other. In fact, as applied to the case under consideration, they are not substantially equal. In fact, the calculation of the flux linkage of the external winding shows that its dissipation reactance is greater than the total dissipation resistance of both windings. Two

circumstances follow from this. The first is that the internal winding of the transformer absorbs the magnetic flux to a greater extent than it dissipates (dissipates its magnetic flux, absorbs from the external winding). The second is that its (equivalent) leakage reactance is capacitive. The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimentally determining the scattering reactance for each winding of the transformer separately. The relevance of the work due to the widespread distribution of transformers. The scattering reactance of each winding of the transformer separately can be determined by at least three experimental methods that give satisfactory agreement of the results. An almost paradoxical result – the capacitive nature of the resistance to dissipation of the internal winding of a transformer was 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 resistance. They are universal – they can be used in all types of round-hank. The obtained results are recommended to use when designing and researching transformers.

Keywords: transformer, winding, scattering, inductive, capacitive, flux linkage, magnetic flux.

Введение. Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками определяется как

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

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 (1).

В действительности применительно к рассматриваемому случаю они существенно не равны.

В самом деле, потокосцепление внешней обмотки определяется по формуле

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

где i – приведенный ток, а $w_1 = w_2 = w$ (индексы показаны 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 его из (1) дает реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки:

$$x_1 = -\frac{\omega\mu_0\pi D w^2 a_1}{l} \cdot \frac{1}{6}. \quad (3)$$

Этот результат получен Е.Г. Марквардтом. Однако он не получил признания из-за отсутствия экспериментальной проверки.

Знак «—» в выражении (3) указывает на два обстоятельства. Первое – внутренняя обмотка поглощает магнитный поток [1–4] в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой, поглощает от внешней обмотки). Второе – ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным [5–10].

Из (2) и (3) следует:

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

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

Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности и, в частности, верификации выражений (2)–(5). Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением трансформаторов [11–20].

С экспериментальным определением активных сопротивлений R_1 и R_2 обмоток нет никаких проблем. 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, при котором принято измерять реактивное сопротивление рассеяния, напряжение на вторичной обмотке равно нулю. Это как раз та причина, которая не позволяет разделять измерения обмоток. Вместе с тем проблему можно решить, причем несколькими способами. Это является основной задачей работы.

Высокоточный метод холостого хода. Из схемы замещения трансформатора (рис. 1) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке:

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

Отсюда следует, что

$$\dot{U}_{z_1} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 \underline{z}_1, \quad \underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1}.$$

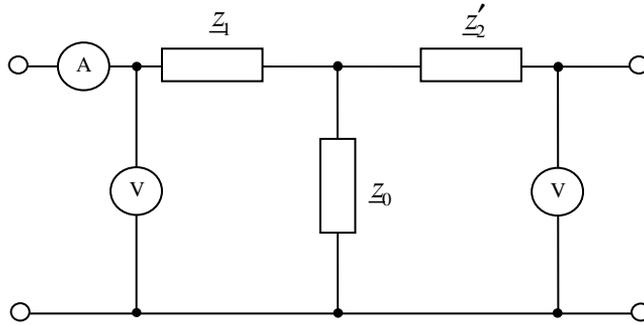


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Из обратимости трансформатора следует:

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

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

Пример 1. Определить сопротивления рассеяния для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины:

$$\dot{U}_1 = 219,138 \text{ В}; \quad \dot{U}'_2 = 219,054e^{j0,23^\circ} \text{ В}; \quad \dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ} \text{ А};$$

$${}^2\dot{U}'_2 = 218,825 \text{ В}; \quad {}^2\dot{U}_1 = 218,343e^{j0,02^\circ} \text{ В}; \quad \dot{I}'_2 = 0,817e^{-j80,32^\circ} \text{ А}.$$

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

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом}, \quad x_1 = -0,081 \text{ Ом},$$

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

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

$$r'_2 = 0,211 \text{ Ом}, \quad x'_2 = 0,562 \text{ Ом}, \quad L'_2 = \frac{x'_2}{2\pi f} = \frac{0,562}{2\pi \cdot 50} = 1,790 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}$$

Высокоточный метод короткого замыкания. Из схемы замещения трансформатора следует, что

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

Полное сопротивление при коротком замыкании

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

$$z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_1 - \dot{I}'_2} z'_2 = z_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1},$$

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

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:

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

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

Из обратимости трансформатора следует:

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

Пример 2. Трансформатор ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины:

$$\dot{U}_1 = 5,513 \text{ В}; \dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50^\circ} \text{ А}; \dot{I}'_2 = 4,016e^{-j20,48^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{U}'_2 = 5,572 \text{ В};$$

$${}^2\dot{I}'_2 = 4,061e^{j20,71^\circ} \text{ А}; {}^2\dot{I}_1 = 5,660e^{-j19,29^\circ} \text{ А}.$$

$$\begin{aligned} \underline{z}_1 &= \frac{\dot{U}_1 {}^2\dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 {}^2\dot{I}_1} = \\ &= \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 1,072e^{-j4,29^\circ} \text{ (Ом)}, \\ r_1 &= 1,069 \text{ Ом}, x_1 = -0,080 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{z}'_2 &= \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 {}^2\dot{I}_1}{\dot{I}_1 {}^2\dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 {}^2\dot{I}_1} = \\ &= \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50^\circ} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = 0,597e^{j69,42^\circ} \text{ (Ом)}. \\ r'_2 &= 0,210 \text{ Ом}, x'_2 = 0,559 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

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.

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,

$$z_2 = \frac{2U_{bc}}{I'_2}.$$

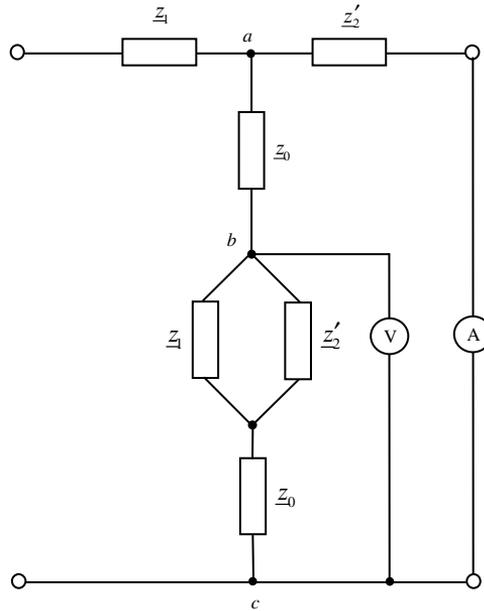


Рис. 2. Схема замещения для последовательного соединения

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

$$x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}, \quad x_1 = x_k - x_2.$$

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

$$z_1 = \frac{2^2 U_{bc}}{2 I_1}, \quad x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}.$$

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.

$$z_2' = \frac{2U_{bc}}{I_2'} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ (Ом)},$$

$$x_2' = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ (Ом)},$$

$$x_1 = x_k - x_2' = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ (Ом)}.$$

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 на другие типы обмоток не следует. Этот результат не является беспрецедентным. Индуктивная электрическая машина – синхронный компенсатор в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер.

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

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

Библиографический список

1. Попов И.П. Четыре теоремы для синхронных машин с реактивной нагрузкой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 169–178.

2. Попов И.П. Комбинированные векторы и магнитный заряд // Прикладная физика и математика. – 2018. – № 6. – С. 12–20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329

3. Попов И.П. Об одной теореме для синхронной электрической машины // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.С. Мхитаряна. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 118–121.

4. Линейная электрическая машина: пат. 2478252 RU, МПК⁶ Н 02 К 33/16, Н 02 К 41/02, Н 02 К 1/06. / И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.И. Мошкин (Россия). – № 2011126563/07; заявл. 28.06.2011; опубл. 27.03.2013. Бюл. № 9.

5. Попов И.П. Емкостно-инертное устройство // Известия Санкт-Петербург. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ». – 2015. – Т. 2. – С. 43–45.

6. Попов И.П. Вращательные инертно-емкостные устройства // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 191–196.

7. Электрическое емкостное устройство: пат. 2086065 (RU) / И.П. Попов. – 1997. – № 21.

8. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Упруго-емкостные колебания в электромеханических системах // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 217, 218.

9. Попов И.П. Спонтанные упруго-емкостные колебания в системах автоматики // Вестник Морского гос. ун-та им. адм. Г.И. Невельского. Сер. Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. – 2017. – Вып. 78. – С. 93–96.

10. Попов И.П. Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2019. – № 2. – С. 15–17.

11. An approach to power transformer asset management using health index / A.N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, W. Fan // IEEE Electr Insul Mag. – 2009. – Vol. 25. – P. 20–34.

12. Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method / C. Anjali, B. Partha, N.K. Roy, P. Kumbhakar // Int. Jour. Electr. Power and Energy Syst. – 2013. – Vol. 45. – P. 137–141.

13. Elanien A., Salama M. M. M. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69kV using fuzzy logic // IEEE Trans Dielectr Electr Insul. – 2012. – Vol. 27. – P. 2029–2036.

14. Diwyacitta K., Prasajo R.A., Suwarno. Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer // Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics. – 2017. – Vol. 9, No. 3. – P. 585–602.

15. Husain Z. Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers // Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – P. 300–317.

16. Ranga C., Chandel A.K. Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers // Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics. – 2017. – Vol. 9, No. 4. – P. 850–865.

17. Ranga C., Chandel A.K., Chandel R. Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers // Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics. – 2017. – Vol. 9, № 2. – P. 394–406.

18. Rahmati A., Sanaye P.M. Protection of power transformer using multi criteria decision-making // *Int. Jour. Electr Power and Energy Syst.* – 2015. – Vol. 68. – P. 294–303.

19. Ghoneim S.S.M., M. Tahab I.B. A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis // *Int. Jour. Electr Power and Energy Syst.* – 2016. – Vol. 81. – P. 265–274.

20. Ranga C., Chandel A.K. Condition assessment of power transformers based on multi attributes using fuzzy logic // *IET Sci. Measurement Tech.* – 2017. – Vol. 11. – P. 983–990.

References

1. Popov I.P. Chetyre teoremy dlia sinkhronnykh mashin s reaktivnoi nagruzkoj [Four theorems for synchronous machines with reactive load]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp. 169-178.

2. Popov I.P. Kombinirovannye vektory i magnitnyi zariad [Combined Vectors and Magnetic Charge]. *Prikladnaia fizika i matematika*, 2018, no. 6, pp. 12-20. DOI: 10.25791/pfim.06.2018.329

3. Popov I.P. Ob odnoi teoreme dlia sinkhronnoi elektricheskoi mashiny [On a theorem for a synchronous electric machine]. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniiah: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ed. V.S. Mkhitariana. Magnitogorsk: Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni G.I. Nosova, 2019, pp. 118-121.

4. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Moshkin V.I. Lineinaia elektricheskaiia mashina [Linear electric machine]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2478252 (2013).

5. Popov I.P. Emkostno-inertnoe ustroistvo [Capacitive-inert device] *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI"*, 2015, vol. 2, pp. 43-45.

6. Popov I.P. Vrashchatel'nye inertno-emkostnye ustroistva [Rotational inert-capacitive devices]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 3(31), pp. 191-196.

7. Popov I.P. Elektricheskoe emkostnoe ustroistvo [Electric capacitive device]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2086065 (1997).

8. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Uprugo-emkostnye kolebaniia v elektromekhanicheskikh sistemakh [Elastic-capacitive oscillations in electromechanical systems]. *Aktual'nye problemy energosberegaiushchikh elektrotekhnologii APEET-2014: sbornik nauchnykh trudov*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2014, pp. 217, 218.

9. Popov I.P. Spontannye uprugo-emkostnye kolebaniia v sistemakh avtomatiki [Spontaneous elastic capacitive oscillations in automation systems]. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta imeni admirala G.I. Nevel'skogo. Avtomaticheskoe upravlenie, matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii*, 2017, iss. 78, pp. 93-96.

10. Popov I.P. Elektromagnitnyi makhovik dlia orientirovaniia orbital'nykh ob"ektov [Electromagnetic flywheel for orbital objects orientation]. *Oboronnyi kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, 2019, no. 2, pp. 15-17.

11. Jahromi A.N., Piercy R., Cress S., Fan W. An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electr Insul Mag*, 2009, vol. 25, pp. 20–34.

12. C. Anjali, B. Partha, N.K. Roy, P. Kumbhakar Usage of nanotechnology based gas sensor for health assessment and maintenance of transformers by DGA method. *Int. Jour. Electr. Power and Energy Syst*, 2013, vol. 45, pp. 137-141.

13. Elanien A., Salama M. M. M. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69kV using fuzzy logic. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2012, vol. 27, pp. 2029-2036.

14. Diwyacitta K., Prasajo R.A., Suwarno. Study on Correlation Among Oil Dielectric Characteristics, Dissolved Gases, and Operating Life of 150 kV Power Transformer. *Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 585-602.

15. Husain Z. Fuzzy Logic Expert System for Incipient Fault Diagnosis of Power Transformers. *Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 300-317.

16. Ranga C., Chandel A.K. Expert System for Health Index Assessment of Power Transformers. *Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 850-865.

17. Ranga C., Chandel A.K., Chandel R. Performance Analysis of Cellulose and Nomex-910 Impregnated Oil Filled Power Transformers.

Int. Jour. on Electrical Engineering and Informatics, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 394-406.

18. Rahmati A., Sanaye P.M. Protection of power transformer using multi criteria decision-making. *Int. Jour. Electr. Power and Energy Syst*, 2015, vol. 68, pp. 294-303.

19. Ghoneim S.S.M., M. Tahab I.B. A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis. *Int. Jour. Electr. Power and Energy Syst*, 2016, vol. 81, pp. 265-274.

20. Ranga C., Chandel A.K. Condition assessment of power transformers based on multi attributes using fuzzy logic. *IET Sci. Measurement Tech*, 2017, vol. 11, p. 983-990.

Сведения об авторе

Попов Игорь Павлович (Курган, Россия) – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Курганского государственного университета (640020, Курган, ул. Советская, 63/4, e-mail: ip.popow@yandex.ru).

About the author

Popov Igor Pavlovich (Kurgan, Russian Federation) is a Senior Lecturer of the Department "Technology of mechanical engineering, machine tools and instruments" Kurgan State University (640020, Kurgan, 63/4, Sovetskaya str., e-mail: ip.popow@yandex.ru).

Получено 30.10.2019