

О РАССЕЙАНИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ABOUT SCATTERING OF TRANSFORMER WINDINGS

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный, емкостной, потокосцепление, магнитный поток.

Key words: transformer, winding, dissipation, inductive, capacitive, flux-coupling, magnetic flux.

Аннотация

Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, которые могут быть установлены, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов.

Annotation

The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimentally determining the leakage reactance for each transformer winding separately, which can be established by at least three experimental methods that give a satisfactory agreement of the results.

Павлов Валентин Дмитриевич

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,

Россия, Владимир

старший преподаватель кафедры «Общая и прикладная физика»

pavlov.val.75@mail.ru

Pavlov Valentin Dmitrievich

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Russia, Vladimir

Введение

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 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 равно

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

где i – приведенный ток, а $w_1 = w_2 = w$ (индексы показаны для наглядности интегрирования).

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 из (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. 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] в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой, поглощает от внешней обмотки). Второе – ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным.

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 [2, 3].

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 раздельно измерять рассеяния обмоток.

Вместе с тем, проблему можно решить, причем, несколькими способами. Это является основной задачей работы.

1. Высокоточный метод холостого хода

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

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

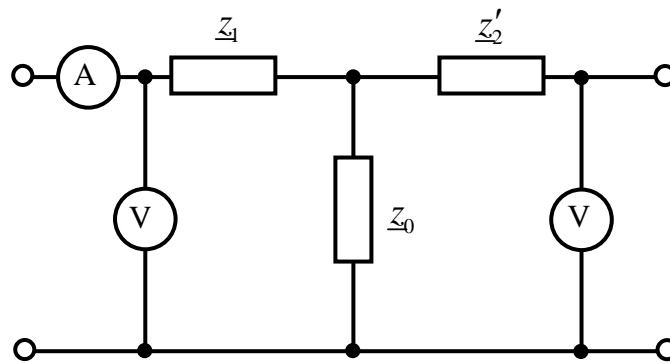


Рис. 1. Схема замещения трансформатора

Отсюда следует, что

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

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

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 для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 219,138 \text{ В}$; $\dot{U}'_2 = 219,054e^{j0,23^\circ} \text{ В}$;

$\dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ} \text{ А}$; ${}^2\dot{U}'_2 = 218,825 \text{ В}$; ${}^2\dot{U}_1 = 218,343e^{j0,02^\circ} \text{ В}$; $\dot{I}'_2 = 0,817e^{-j80,32^\circ} \text{ А}$.

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

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом},$$

$$x_1 = -0,081 \text{ Ом},$$

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

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

$$r'_2 = 0,211 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = 0,562 \text{ Ом},$$

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

2. Высокоточный метод короткого замыкания

Из схемы замещения трансформатора следует, что

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

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

Полное сопротивление при коротком замыкании равно

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

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

Отсюда следует, что

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

Из обратимости трансформатора следует

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

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

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

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

Из обратимости трансформатора следует

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

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

$$\dot{U}_1 = 5,513 \text{ В}; \quad \dot{I}_1 = 4,025 e^{-j20,50^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}'_2 = 4,016 e^{-j20,48^\circ} \text{ А}; \quad \dot{U}'_2 = 5,572 \text{ В}; \quad \dot{I}'_2 = 4,061 e^{j20,71^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}'_1 = 5,660 e^{-j19,29^\circ} \text{ А}.$$

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

$$r_1 = 1,069 \text{ Ом},$$

$$x_1 = -0,080 \text{ Ом},$$

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

$$r'_2 = 0,210 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = 0,559 \text{ Ом}.$$

3. 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

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

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.

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

$$x_1 = x_k - x_2.$$

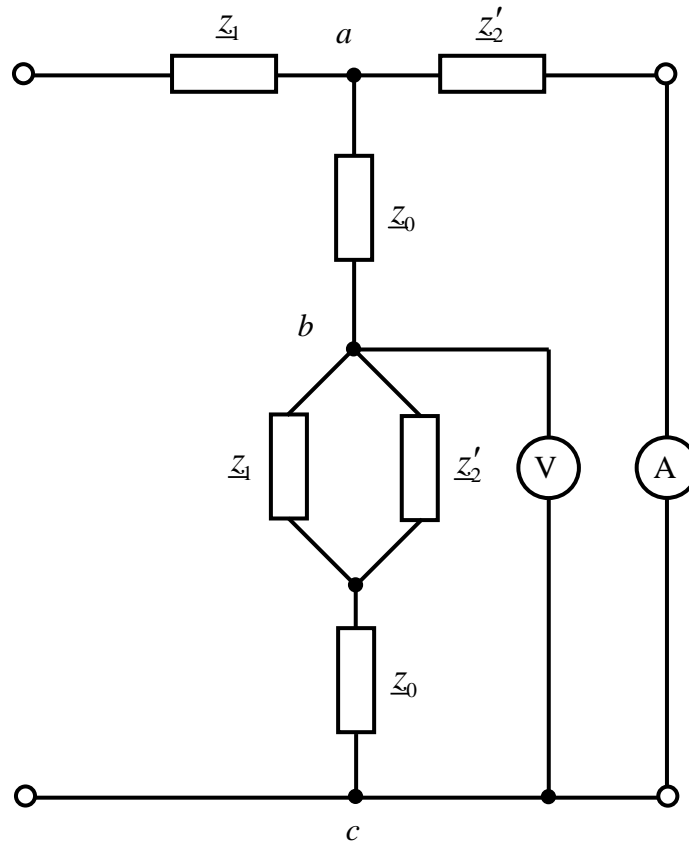


Рис. 2. Схема замещения для последовательного соединения

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

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

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

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.

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

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

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

Заключение

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.

Список используемых источников:

1. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 25–28. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28
2. Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р., Меднов А.А., Минияров А.Х. Исследование работы многофункциональных трансформаторов в качестве устройств обеспечения электромагнитной совместимости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 21. С. 36–48.
3. Сельменева Д.С., Лиске Е.Г., Шевцов Д.Е. Исследование переходных процессов при управляемом включении силового трансформатора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 24. С. 161–177.