



## ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ЯРМОВЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ

С. В. РЫМАР, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана разработанная методика оптимизации однофазного трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния, в которой используется модернизированная методика расчета индуктивности рассеяния.

*Ключевые слова:* трансформатор, ярмовые магнитные потоки рассеяния, оптимизация, индуктивность рассеяния, параметры, сварочная техника

Однофазные трансформаторы с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния (РЯМПР) находят широкое применение в сварочной технике, в частности в источниках питания для сварки штучными электродами.

Основы теории расчета трансформатора с РЯМПР и его индуктивностей рассеяния были заложены в Институте электросварки им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым [1–4] и широко используются проектировщиками сварочного оборудования [5]. В публикациях, однако, отсутствует информация о методике оптимизации рассматриваемого трансформатора.

Целью данной работы является описание созданной в Институте электросварки им. Е. О. Патона методики оптимизации однофазного трансформатора с РЯМПР, базирующейся на модернизированной методике расчета индуктивностей рассеяния и дающей большую точность вычислений.

Повышенное значение индуктивности рассеяния в трансформаторе с РЯМПР обеспечивается благодаря намотке витков первичной и вторичной обмотки на разных стержнях магнитопровода с образованием нескомпенсированных витков обмоток. За счет этого уменьшается электромагнитная связь витков обмоток и возрастают потоки рассеяния, проходящие от ярма к ярму магнитопровода [1–4]. На рис. 1 дано схематическое изображение такого трансформатора, где  $a$ ,  $b$  — толщина и ширина стержня и ярма магнитопровода;  $h_{ок}$ ,  $l_{ок}$  — высота и ширина окна магнитопровода;  $h_{к1л}$ ,  $C_{к1л}$  и  $h_{к2п}$ ,  $C_{к2п}$  — соответственно высота и толщина катушек с первичной и вторичной обмоткой на левом и правом стержне магнитопровода;  $d_{1л.п}$ ,  $d_{2п.л}$  — заданные расстояния между стержнями магнитопровода и первичной и вторичной обмотками с нескомпенсированными витками;  $l_k$  — заданное расстояние между боковыми поверхностями катушек в окне магнитопровода;  $\Delta h$  — заданная высота выступающих из катушек частей стержня магнитопровода.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор без дополнительных секций, обеспечивающих дискретное регулирование индуктивности рассеяния. Трансформатор питается от промышленной сети

с синусоидальным напряжением. Эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрегаем. При оптимизации будем рассматривать только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников его обмоток.

Запишем уравнения, связывающие электромагнитные и геометрические параметры трансформатора.

Вычислим активное поперечное сечение стержня и ярма магнитопровода [6]:

$$S_c = \sqrt{2} U_1 / (\omega \omega_1 B_m), \quad (1)$$

где  $U_1$  — заданное действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора;  $\omega$  — угловая частота напряжения питающей сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети  $f_c$ , равная  $2\pi f_c$ ;  $\omega_1$  — количество витков первичной обмотки;  $B_m$  — заданное амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе.

Толщина стержня и ярма магнитопровода равняется [6]

$$a = S_c / (k_c b), \quad (2)$$

где  $k_c$  — заданный коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали.

Поперечные сечения активного материала первичной и вторичной обмотки в окне магнитопровода находим по формуле из работы [7]:

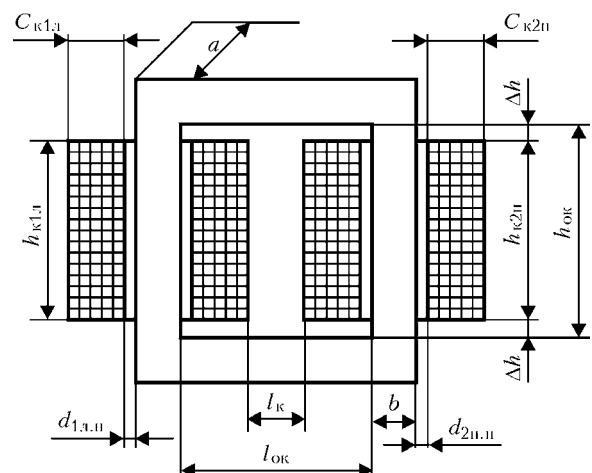


Рис. 1. Схема однофазного трансформатора с РЯМПР



$$S_{o1} = w_1 I_{1дл} / J_{1дл}; S_{o2} = w_1 I_{2дл} / (k_{тр} J_{2дл}), \quad (3)$$

где  $I_{1дл}$ ,  $I_{2дл}$  и  $J_{1дл}$ ,  $J_{2дл}$  — соответственно длительные действующие значения тока и заданной плотности тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора;  $k_{тр}$  — коэффициент трансформации ( $k_{тр} \approx U_1 / U_2$ );  $U_2$  — заданное действующее значение напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода. Длительные действующие значения токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны

$$I_{1дл} = I_1 \sqrt{X/100\%}; I_{2дл} = I_2 \sqrt{X/100\%}, \quad (4)$$

где  $I_1$ ,  $I_2$  — действующие значения тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора;  $X$  — заданная продолжительность включения трансформатора, %.

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора  $I_1$  определяется с некоторым избытком из выражения  $I_1 \approx I_2 / k_{тр} + I_{х.х}$ , где  $I_{х.х}$  — действующее значение тока холостого хода трансформатора, уточняющееся на этапе оптимизации. Значение тока  $I_{х.х}$  может быть рассчитано по методикам из работ [8, 9], а для приближенных расчетов им можно пренебречь. Для сварочных трансформаторов действующее значение тока во вторичной обмотке задается, а для других типов трансформаторов рассчитывается по формуле из работы [6]:  $I_2 = S_2 / U_{2н}$ , где  $S_2$  — заданная мощность трансформатора;  $U_{2н}$  — номинальное действующее значение напряжения на вторичной обмотке.

Примем, что высота катушек с первичной и вторичной обмоткой одинаковы:

$$h_{к1л} = h_{к2п} = (S_{o1} / k_{o1} + S_{o2} / k_{o2}) / C_{к\sigma}, \quad (5)$$

где  $k_{o1}$  и  $k_{o2}$  — коэффициенты заполнения обмоток проводниковым материалом (значения лежат в диапазоне 0,50...0,95);  $C_{к\sigma}$  — суммарная ширина катушек с обмотками  $C_{к\sigma} = C_{к1л} + C_{к1п}$ .

Толщина катушек с первичной и вторичной обмотками следующая:

$$C_{к1л} = S_{o1} / (k_{o1} h_{к1л}); C_{к2п} = S_{o2} / (k_{o2} h_{к2п}). \quad (6)$$

Ширина окна магнитопровода определяется из выражения

$$l_{ок} = d_{1л.н} + C_{к1л} + l_k + C_{к2п} + d_{2п.н}, \quad (7)$$

а высота окна магнитопровода — из уравнения

$$h_{ок} = 2\Delta h + h_{к1л}. \quad (8)$$

Средняя длина витков первичной и вторичной обмотки составляет

$$\begin{aligned} l_{ср.в1} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{1п.н} + C_{к1л}/2); \\ l_{ср.в2} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{2п.н} + C_{к2п}/2). \end{aligned} \quad (9)$$

Средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе следующая:

$$l_c = 2(h_{ок} + l_{ок}) + k_y b. \quad (10)$$

Здесь  $k_y$  — коэффициент, учитывающий тип магнитопровода, равный 4 и  $\pi$  при соответственно шихтованном и навитом магнитопроводах.

Объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток следующие:

$$V_c = l_c S_c; M_c = \gamma_c V_c; C_c = c_c M_c; \quad (11)$$

$$V_o = l_{ср.в1} S_{o1} + l_{ср.в2} S_{o2}; M_o = \gamma_o V_o; C_o = c_o M_o, \quad (12)$$

где  $\gamma_c$ ,  $\gamma_o$  — плотность активных материалов соответственно магнитопровода и обмоток;  $c_c$ ,  $c_o$  — стоимость 1 кг активных материалов соответственно магнитопровода и обмоток.

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора следующие:

$$V = V_c + V_o; M = M_c + M_o; C = C_c + C_o. \quad (13)$$

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [7]

$$F = M_c + k_g M_o, \quad (14)$$

где  $k_g$  — обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала соответственно магнитопровода и обмоток.

Из анализа оптимизационной модели трансформатора (1)–(14) можно заключить, что независимыми переменными в ней являются величины  $w_1$ ,  $b$  и  $C_{к\sigma}$ , все остальные — заданные или зависимые. Независимые переменные определяются в результате оптимизации функции  $F$ . Минимальные значения оптимизационной функции могут быть найдены с помощью численных методов оптимизации, например метода Гаусса–Зейделя (покоординатного спуска) [10], при заданных начальных значениях независимых переменных  $w_1$ ,  $b$  и  $C_{к\sigma}$ . В результате оптимизации функции  $F$  определяются оптимальные значения переменных  $w_1$ ,  $b$ ,  $C_{к\sigma}$  и остальных величин, входящих в оптимизационную модель.

При  $k_g = 1$  расчет трансформатора ведется на минимум массы активных материалов, в случае  $k_g = \gamma_c / \gamma_o$  — на минимум объема, а при  $k_g = c_o / c_c$  — на минимум стоимости активных материалов. В общем случае коэффициент  $k_g$  может принимать и любые другие значения [7].

После расчета оптимальных геометрических размеров трансформатор должен обеспечивать заданный уровень индуктивности рассеяния, достигаемого путем перераспределения витков обмоток. Если индуктивность рассеяния больше заданной, то для трансформатора нужно часть витков первичной обмотки намотать со вторичной обмоткой и такую же часть приведенных к первичной обмотке витков вторичной обмотки намотать с первичной обмоткой. Однако это не всегда технологично. Как правило, перебрасывают только часть витков первичной обмотки (это связано с удобством намотки проводов меньшего поперечного сечения), получая при этом квазиоптимальный трансформатор, лишь незначительно отличающийся от оптимального. При этом витки первичной обмотки и такое же количество приведенных витков вторичной обмот-

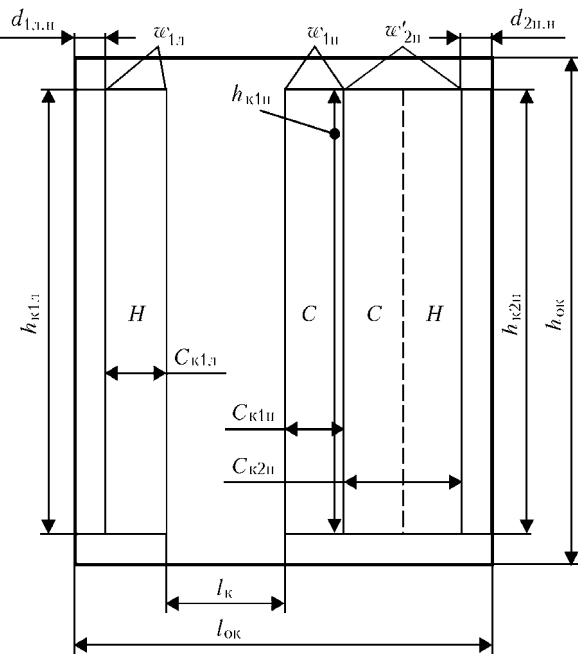


Рис. 2. Схема обмотки окна магнитопровода трансформатора

ки на разных стержнях будут нескомпенсированными, а на одном стержне — скомпенсированными из-за большей и меньшей электромагнитной связи между витками. Если индуктивность рассеяния меньше заданной, то вокруг яра радиально домотывается дополнительная обмотка дросселя, включаемая последовательно и согласно с одной из обмоток (обычно первичной).

Как видно из рис. 2, первичная обмотка  $w_1$  витков имеет на левом стержне  $w_{1л}$  витков. На правом стержне расположена вторичная обмотка с  $w'_{2п} = w_1$  витков, приведенных к первичной обмотке (реально  $w_{2п} = w_1/k_{тр}$ ). На вторичную обмотку намотана часть витков первичной обмотки с  $w_{1п}$  витками. Количество витков первичной обмотки  $w_{1п}$  на правом стержне компенсирует такое же количество приведенных витков вторичной обмотки. На рис. 2 области со скомпенсированными витками обозначены буквой С. Оставшиеся части витков обмоток на стержнях являются не скомпенсированными и обозначены буквой Н. Для трансформатора выполняются следующие соотношения:

$$w_1 = w_{1л} + w_{1п}; w'_2 = w'_{2п}$$

На рис. 2  $h_{к1п}$ ,  $C_{к1п}$  — высота и толщина катушек с частями первичной обмотки на правом стержне магнитопровода;  $d_{1л.н}$ ,  $d_{2п.н}$  — расстояния между стержнями и частями обмоток с нескомпенсированными витками. Остальные обозначения совпадают с рис. 1.

Индуктивность рассеяния  $L_k$  рассматриваемого трансформатора можно условно разделить на три составляющие [11]:  $L_{с.ок}$  — индуктивность рассеяния, обусловленная вертикальными потоками рассеяния в окне магнитопровода;  $L_{с.с.в}$  — индуктивность рассеяния, вызванная потоками рассеяния от скомпенсированных витков обмоток вне окна магнитопровода;  $L_{с.я-л}$  — индуктивность рас-

сеяния, обусловленная потоками рассеяния всех граней ярм и лобовых частей обмоток:

$$L_k = L_{с.ок} + L_{с.с.в} + L_{с.я-л}$$

Индуктивность рассеяния в окне магнитопровода [11, 12]:

$$L_{с.ок} = \mu_0 k_R \frac{a + 2d_{ср}}{h_k} \left( k_L l_k + \frac{C_{к1л} + C_{к1п} + C_{к2п}}{3} \right) w_1^2$$

где  $k_R$  — коэффициент Роговского [12], равный

$$k_R = 1 - \sigma [1 - \exp(-1/\sigma)], \quad (15)$$

коэффициент  $\sigma = (C_{к1л} + C_{к1п} + l_k + C_{к2п}) / (\pi h_k)$ ;  $d_{ср} = (d_{1л.н} + d_{2п.н}) / 2$  — усредненное расстояние между стержнями магнитопровода и обмотками с нескомпенсированными витками;  $h_k = (h_{к1л} + h_{к2п}) / 2$  — усредненная высота катушек с первичной и вторичной обмотками, при учете, что высоты катушек  $h_{к1п} \approx h_{к1л} \approx h_{к2п}$ ;  $k_L = (w_{1л} / w_1)^2$  является коэффициентом.

Индуктивность рассеяния части обмоток со скомпенсированными витками вне окна магнитопровода [12] следующая:

$$L_{с.с.в} = \mu_0 k_R \frac{a + 2[b - d_{2п.н} + \pi(C_{к2п} + d_{2п.н})]}{h_k} \frac{2C_{к1п}}{3} w_1^2$$

Здесь коэффициент Роговского  $k_R$  для частей обмоток со скомпенсированными витками вычисляется по формуле (15) при  $\sigma = 2C_{к1п} / (\pi h_k)$ .

Индуктивность рассеяния между ярами с учетом рассеяния между лобовыми частями обмоток трансформатора определяется из выражения [11]:

$$L_{с.я-л} = k_l \mu_0 g w_1^2$$

где  $k_l$  — коэффициент, учитывающий индуктивность лобовых частей обмоток, вычисляется по эмпирической формуле  $k_l = 1,1937[\exp(-k) - 0,05]$ ;  $k$  — коэффициент, равный  $(C_{к1л} + C_{к2п} - C_{к1п} + 2d_{ср}) / (5a + 0,2h_k)$ ;  $g$  — геометрическая проводимость между пятью парами симметрично расположенных граней ярм магнитопровода [11]

$$g = g_{гр}(a, l_y) + 2[g_{гр}(b, l_y) + g_{гр}(a, b)];$$

$g_{гр}(a, l_y)$  — геометрическая проводимость между верхней и нижней гранями ярм;  $l_y = l_{ок} + 2b$  — длина ярма;  $g_{гр}(b, l_y)$  — геометрическая проводимость между верхней и нижней фронтальными гранями ярм;  $g_{гр}(a, b)$  — геометрическая проводимость между верхней и нижней боковыми гранями ярм. Геометрическая проводимость  $g_{гр}$  в виде функции от размеров сторон прямоугольной пластины  $x$  и  $y$  определяется по аппроксимационной формуле [11]

$$g_{гр}(x, y) = \frac{\sqrt{xy}}{4} \left[ 2,4 + 1,14 \left( \frac{x+y}{\sqrt{xy}} \right)^{0,858} \right]$$

По сравнению с опытными данными, погрешность расчетов индуктивностей рассеяния  $L_k$  не превышает 10 % [11].



Если индуктивность рассеяния после оптимизационного расчета получилась больше заданной  $L_{к.з}$ , то начальное значение количества витков первичной обмотки на стержнях можно определить по формуле

$$w_{1л} \approx w_1 \sqrt{L_{к.з} / L_{к.}}; \quad w_{1п} = w_1 - w_{1л}$$

Если индуктивность рассеяния получилась меньше заданной, начальное значение количества витков дополнительного дросселя на ярме магнитопровода, включаемого последовательно и согласованно с первичной обмоткой, будет следующим:

$$w_{1др} \approx w_1 (\sqrt{L_{к.з} / (\mu_0 g w_{1л}^2)} - 1) / k_m$$

где  $k_m = 0,75 \dots 0,85$  — коэффициент магнитной связи обмотки дросселя с ярмовыми потоками рассеяния трансформатора.

После определения начальных значений витков, перераспределяя далее витки первичной обмотки, нужно добиться, чтобы значение индуктивности рассеяния трансформатора как можно ближе приблизилось к заданному уровню.

Разработанную методику расчета применяли для проектирования трансформаторов ряда сварочных источников питания, созданных в Институте электросварки им. Е. О. Патона и успешно работающих в Украине, Российской Федерации и Литве.

Таким образом, разработанная методика расчета однофазного трансформатора с РЯМПП дает возможность рассчитывать трансформаторы, оптимальные по объему, массе и стоимости, а также

A procedure is described for optimization of a single-phase transformer with developed yoke magnetic leakage fluxes, which uses an upgraded procedure of calculation of leakage inductance.

достичь погрешности расчета индуктивности рассеяния, не превышающей 10 %, по сравнению с опытными данными.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Элементы расчетов цепей и аппаратов переменного тока для дуговой сварки. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 146 с.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
3. Лебедев В. К. К расчету сопротивления короткого замыкания сварочного трансформатора с ярмовым рассеянием // Автомат. сварка. — 1958. — № 4. — С. 37–43.
4. Лебедев В. К., Троицкий В. А., Белый Н. Г. Трансформатор с ярмовым рассеянием, регулируемым сварочным кабелем // Там же. — 1968. — № 6. — С. 61–65.
5. Кобозев В. А., Коваленко В. В. Сварочные трансформаторы. — Ставрополь, 1998. — 227 с.
6. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
7. Пентегов И. В., Рымар С. В., Стежковский Е. П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Техн. электродинамика. — 2002. — № 1. — С. 22–28.
8. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техн. электродинамика. — 1995. — № 6. — С. 35–40.
9. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Там же. — 1996. — № 1. — С. 39–45.
10. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норецков И. П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.
11. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника и электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 38–45.
12. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.

Поступила в редакцию 08.10.2004

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Объявляет ежегодный набор в

### ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высококачественных металлов и специальных сплавов

### АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высококачественных металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www.paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)  
 Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю