



## ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ

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

Разработана оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, проходящими от стержня к стержню магнитопровода. Модель позволяет рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости трансформаторы как с подвижными, так и с неподвижными обмотками при обеспечении заданного значения индуктивности рассеяния.

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

Однофазные трансформаторы с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния, проходящими от стержня к стержню магнитопровода, являются наиболее распространенными в сварочных источниках питания для сварки штучными электродами. Теория их расчета разработана в Институте электросварки им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым и опубликована в работах [1–4]. Развитием этой теории явились исследования по распределению магнитных потоков в трансформаторе [5] и модернизация методики расчета индуктивностей рассеяния [6]. Вопросы оптимизации таких трансформаторов рассматривались в работе [7], однако в ней необходимо рассчитывать большое количество вариантов при отыскании оптимального трансформатора.

Полное разделение зависимых и независимых переменных в оптимизационной модели трансформатора с жесткой внешней характеристикой осуществил И. В. Пентегов при аналитическом расчете оптимального трансформатора [8–13], что позволило однозначно находить оптимальный вариант. Однако эти методики применительно к рассматриваемому трансформатору не гарантируют получения оптимального варианта с нужным уровнем индуктивности рассеяния. Аналитически эта задача так и не была решена из-за наличия жестко закрепленного параметра — заданного значения индуктивности рассеяния, учет которого явился существенной проблемой при дифференцировании оптимизационной функции. Задачу решили с помощью разработанной оптимизационной модели, предназначенной для численных методов оптимизации.

Целью работы является описание разработанной оптимизационной модели однофазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния с подвижными и неподвижными обмотками, жестким ограничением по заданному уровню индуктивности рассеяния и полным разделением зависимых и независимых переменных.

Развитые поперечные потоки рассеяния в рассматриваемом трансформаторе обеспечиваются раз-

несением первичной и вторичной обмотки по длине стержней магнитопровода (рисунок), благодаря чему потоки проходят от стержня к стержню. Индуктивность рассеяния плавно изменятся в результате раздвижения обмоток по высоте стержней. При сближении обмоток индуктивность рассеяния уменьшается, при разведении — увеличивается (соответственно увеличивается и уменьшается сварочный ток). На рисунке приведены следующие обозначения:  $a$ ,  $b$  — толщина и ширина стержня магнитопровода;  $h_{ок}$ ,  $l_{ок}$  — высота и ширина окна магнитопровода;  $h_{к1}$  и  $h_{к2}$ ,  $C_{к1}$  и  $C_{к2}$ ,  $C_{к01}$  и  $C_{к02}$  — соответственно высота, толщина и общая толщина катушек с первичной и вторичной обмотками;  $l_{к1}$ ,  $l_{к2}$  — задаваемые расстояния между боковыми поверхностями катушек с первичными и вторичными обмотками в окне магнитопровода;  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$  — задаваемые длины выступающих из катушек с пер-

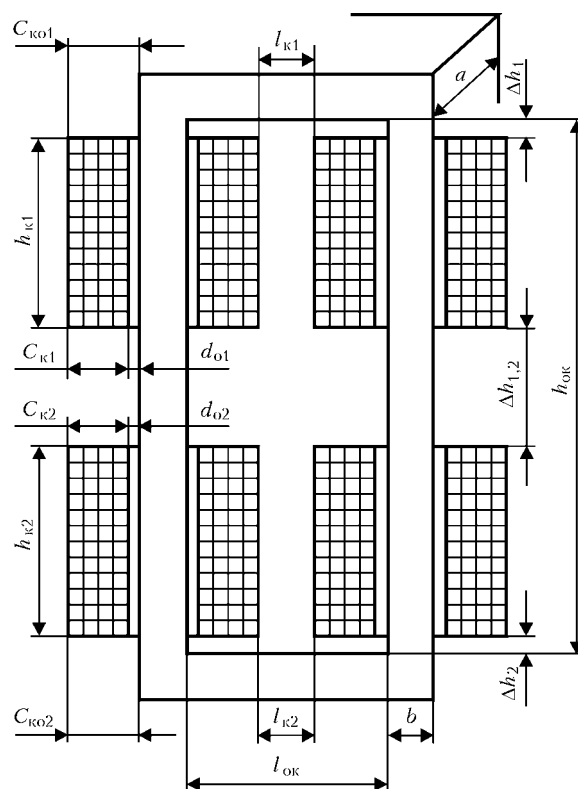


Схема однофазного трансформатора с поперечными магнитными потоками рассеяния (обозначения см. в тексте)



вичной и вторичной обмоткой частей стержня магнитопровода;  $\Delta h_{1,2}$  — расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками;  $d_{o1}$ ,  $d_{o2}$  — задаваемые расстояния между стержнями магнитопровода и первичной и вторичной обмотками.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор, питающийся от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрегаем. При оптимизации рассмотрим только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников его обмоток.

Оптимизационная модель трансформатора представляет собой процедуру глобального цикла, которая начинается с присвоения промежуточной переменной  $F'$  стартового значения оптимизационной функции  $F$ , а при последующих обращениях — присвоение значения оптимизационной функции, вычисленной на предыдущем шаге прохождения цикла:

$$F' = F. \quad (1)$$

Задается также начальное значение шага по виткам первичной обмотки трансформатора (при начальном значении количества витков первичной обмотки трансформатора  $w_1$ )  $\Delta w = 0,1w_1$ , после чего следуют выражения первого локального цикла, начинающегося с вычисления активного поперечного сечения стержня и ярма магнитопровода [14]:

$$S_c = \sqrt{2} U_1 / (\omega w_1 B_m), \quad (2)$$

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

Толщина стержня и ярма магнитопровода равна [14]

$$a = S_c / (k_c b), \quad (3)$$

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

Поперечные сечения активного материала первичной и вторичной обмотки в окне магнитопровода [13] определяются из соотношения

$$S_{o1} = w_1 I_{1дл} / J_{1дл}; S_{o2} = w_1 I_{2дл} / (k_{тр} J_{2дл}), \quad (4)$$

где  $I_{1дл}$ ,  $I_{2дл}$  и  $J_{1дл}$ ,  $J_{2дл}$  — длительные действующие значения соответственно токов и задаваемых плотностей токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора;  $k_{тр}$  — коэффициент трансформации, равный  $U_1 / U_2$ ;  $U_2$  — заданное действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода.

Длительные действующие значения фазных токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны

$$I_{1дл} = I_1 \sqrt{X/100 \%}; I_{2дл} = I_2 \sqrt{X/100 \%}, \quad (5)$$

где  $I_1$ ,  $I_2$  — действующие значения токов в первичной [15] и вторичной обмотках трансформатора (ток  $I_2$  для сварочных трансформаторов обычно задается);  $X$  — заданная продолжительность включения трансформатора, %.

Высота катушки с первичной обмоткой равна

$$h_{к1} = S_{o1} / (2k_{o1} C_{к1}), \quad (6)$$

где  $k_{o1}$  — коэффициент заполнения первичной обмотки проводниковым материалом ( $k_{o1} = 0,5 \dots 0,95$ ).

Общая толщина катушки с первичной обмоткой равна

$$C_{кo1} = d_{o1} + C_{к1}; \quad (7)$$

ширина окна магнитопровода определяется из выражения

$$l_{ок} = 2C_{кo1} + l_{к1}; \quad (8)$$

толщина катушки со вторичной обмоткой равна

$$C_{к2} = (l_{ок} - l_{к2}) / 2 - d_{o2}; \quad (9)$$

общая толщина катушки со вторичной обмоткой

$$C_{кo2} = d_{o2} + C_{к2}; \quad (10)$$

высота катушки со вторичной обмоткой

$$h_{к2} = S_{o2} / (2k_{o2} C_{к2}), \quad (11)$$

где  $k_{o2}$  — коэффициент заполнения вторичной обмотки проводниковым материалом.

Средние длины витков первичной и вторичной обмотки определяются из соотношений

$$\begin{aligned} l_{ср.в1} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{o1} + C_{к1}/2); \\ l_{ср.в2} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{o2} + C_{к2}/2). \end{aligned} \quad (12)$$

По формулам (1), (10) и (21) из работы [6] вычисляются наименьшие значения индуктивностей трансформатора ( $L_k^{\min}$  — индуктивность рассеяния (индуктивность короткого замыкания);  $L_s^{\min}$  — индуктивность рассеяния поперечных потоков, распространяющихся между стержнями магнитопровода,  $\Delta L_{л}^{\min}$  — составляющая индуктивности лобового потока рассеяния, проходящего от торца к торцу каждой катушки вне магнитопровода, при задаваемом минимальном расстоянии между обмотками  $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\min}$ ) и уточняется количество витков первичной обмотки трансформатора:

$$w_1 = \begin{cases} w_1 + \Delta w, & \text{если } L_k^{\min} < L_{к.з}^{\min}, \\ w_1 - \Delta w, & \text{если } L_k^{\min} > L_{к.з}^{\min}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $L_{к.з}^{\min}$  — наименьшее заданное значение индуктивности рассеяния.

Выражение (13) образует подцикл, при входе в который нужно использовать только одно из его текущих условий с неизменным значением  $\Delta w$ , с пересчетом значения  $L_k^{\min}$  на каждом шаге. Подцикл необходимо выполнять до тех пор, пока текущее условие истинно. После этого уменьшается значение шага по виткам первичной обмотки  $\Delta w =$



$= 0,5\Delta\omega$ . Условие по выходу из первого локального цикла имеет вид

$$|L_{к.3}^{\min} - L_{к.3}^{\min}|/L_{к.3}^{\min} < \varepsilon_1, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_1$  — задаваемая точность вычислений в первом локальном цикле.

Выражения (2)–(14) образуют первый локальный цикл, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (14).

Для обеспечения наибольшего заданного значения индуктивности рассеяния  $L_{к.3}^{\min}$  необходимо определить максимальное расстояние между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками  $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\max}$ .

Начальное значение индуктивности рассеяния между стержнями магнитопровода трансформатора вычисляется по формуле (1) из работы [6]

$$L_s^{\max'} = L_{к.3}^{\max} - \Delta L_{л}^{\min},$$

где вместо  $L_{л}^{\max}$  фигурирует  $\Delta L_{л}^{\min}$ , вычисленная ранее при  $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1,2}^{\min}$ , поскольку значение  $\Delta h_{1,2}^{\max}$  еще неизвестно. В рассматриваемом случае начальное значение  $\Delta h_{1,2}^{\max}$ , полученное по формуле (10) из работы [6], решенной относительно  $\Delta h_{1,2}$ , равно

$$\Delta h_{1,2}^{\max} = L_s^{\max'} / (\mu_0 \omega^2 g_y) - (h_{к1} + h_{к2})/3,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $g_y$  — удельная геометрическая проводимость между стержнями магнитопровода.

Начальное значение по определению расстояния между торцами катушек с первичной и вторичной обмотками  $\Delta h_{1,2}^{\max}$  равно  $\Delta_{1,2} = 0,1\Delta h_{1,2}^{\min}$ .

Для уточнения значения  $\Delta h_{1,2}^{\max}$  используется второй локальный цикл, начинающийся с вычисления значений индуктивностей рассеяния трансформатора  $L_s^{\max}$ ,  $\Delta L_{л}^{\max}$  и  $L_{к.3}^{\max}$  соответственно по формулам (1), (10), (21) из работы [6], при подстановке в них значения  $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}^{\max}$ :

$$\Delta h_{1,2}^{\max} = \begin{cases} \Delta h_{1,2}^{\max} + \Delta_{1,2}, & \text{если } L_{к.3}^{\max} < L_{к.3}^{\max}, \\ \Delta h_{1,2}^{\max} - \Delta_{1,2}, & \text{если } L_{к.3}^{\max} > L_{к.3}^{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

Выражение (15) образует подцикл, при входе в который нужно использовать только одно из его текущих условий при неизменном значении  $\Delta_{1,2}$  с пересчетом  $\Delta h_{1,2}^{\max}$  на каждом шаге. Подцикл выполняется до тех пор, пока истинно текущее условие подцикла. После этого уменьшается значение шага  $\Delta_{1,2} = 0,2\Delta_{1,2}$  и проверяется выполнение условия по выходу из второго локального цикла:

$$|L_{к.3}^{\max} - L_{к.3}^{\max}|/L_{к.3}^{\max} < \varepsilon_2, \quad (16)$$

где  $\varepsilon_2$  — задаваемая точность вычислений во втором локальном цикле.

Выражения (15) и (16) образуют второй цикл, который выполняется до тех пор, пока не будет удовлетворено условие (16).

После этого определяется высота окна магнитопровода

$$h_{ок} = \Delta h_1 + h_{к1} + \Delta h_{1,2}^{\max} + h_{к2} + \Delta h_2, \quad (17)$$

средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе

$$l_c = 2(h_{ок} + l_{ок}) + 4b, \quad (18)$$

объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток

$$V_c = l_c S_c; M_c = \gamma_c V_c; C_c = c_c M_c; \quad (19)$$

$$V_o = l_{ср.в1} S_{o1} + l_{ср.в2} S_{o2}; M_o = \gamma_o V_o; C_o = c_o M_o, \quad (20)$$

где  $\gamma_c, \gamma_o$  — плотность активных материалов магнитопровода и обмоток;  $c_c, c_o$  — удельная стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток, у.е./кг (у.е. — условная денежная ед.).

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора определяются соотношениями:

$$V = V_c + V_o; M = M_c + M_o; C = C_c + C_o. \quad (21)$$

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [13]

$$F = M_c + k_g M_o, \quad (22)$$

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

Условие по выходу из глобального цикла имеет вид

$$|F - F'|/F < \varepsilon, \quad (23)$$

где  $\varepsilon$  — задаваемая точность вычислений в глобальном цикле.

Из анализа оптимизационной модели трансформатора (1)–(23) можно заключить, что независимыми переменными в ней являются два значения:  $b$  и  $C_{к1}$ , все остальные являются заданными или зависимыми. Независимые переменные определяются в результате минимизации функции  $F$ . Минимальные значения оптимизационной функции могут быть найдены с помощью численных методов оптимизации, например, метода Гаусса – Зейделя (покоординатного спуска) [16] при заданных начальных значениях независимых переменных  $b$  и  $C_{к1}$ . В результате минимизации функции  $F$  определяются оптимальные значения переменных  $b, C_{к1}$  и остальные величины, входящие в оптимизационную модель.

При коэффициенте  $k_g = 1$  расчет трансформатора ведется на минимум массы активных материалов, при  $\gamma_c/\gamma_o$  — на минимум объема активных материалов, при  $c_o/c_c$  — на минимум стоимости активных материалов. В общем случае коэффициент  $k_g$  может принимать и любые другие значения [13].

При оптимизационном расчете трансформаторов с неподвижными обмотками можно использовать полученную оптимизационную модель, но исключить из нее выражения (15), (16), вычисляющие максимальное расстояние между торцами



катушек с первичной и вторичной обмотками  $\Delta h_{1,2}^{\max}$  для обеспечения наибольшего значения индуктивности рассеяния  $L_{\kappa}^{\max}$  и убрать индексы min и max в оставшихся выражениях (13), (14) и (17).

Разработанную оптимизационную модель применяли для расчета трансформаторов сварочных источников питания, созданных в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Приведем данные сварочного трансформатора с подвижными обмотками, рассчитанного с помощью разработанной оптимизационной модели на минимум массы активных материалов. Эти данные могут быть использованы при изготовлении трансформатора с плавным регулированием тока для сварки штучными электродами, предназначенного для ремонтных мастерских и бытовых целей.

Трансформатор имеет следующие параметры:  $U_1 = 220$  В;  $U_2 = 60$  В;  $f_c = 50$  Гц;  $X = 25$  %;  $k_{\text{тр}} = 3,667$ ;  $L_{\kappa}^{\min} = 13,91$  мГн,  $L_{\kappa}^{\max} = 31,22$  мГн (приведенные к первичной обмотке) с возможностью регулирования сварочного тока в пределах  $I_2 = 75 \dots 160$  А. Далее приведены значения параметров для номинального тока 160 А:  $I_1 = 45,58$  А;  $I_{\text{дл}} = 23,76$  А;  $J_{\text{дл}} = 2,27$ ;  $J_{2\text{дл}} = 2,58$  А/мм<sup>2</sup>; ток холостого хода — 1,943 А (4,26 %); мощность трансформатора 9,6 кВ·А; напряжение на дуге 26,4 В; КПД 94 %;  $B_m = 1,63$  Тл; электротехническая сталь 3414 толщиной 0,35 мм;  $c_s = 1,4$  у.е./кг; обмотки из меди;  $c_o = 3,3$  у.е./кг;  $M_c = 22,5$  кг;  $M_o = 11,7$  кг;  $M = 34,2$  кг;  $C_c = 27$  у.е.;  $C_o = 28$  у.е.;  $C = 55$  у.е.

Параметры обмоток: соединение катушек первичной обмотки — последовательное,  $w_1 = 198$  (количество витков в одной катушке 99, в слое 13, в последнем слое 8, слоев 8); соединение катушек вторичной обмотки — параллельное (катушки — подвижные),  $w_2 = w_1/k_{\text{тр}} = 54$  (количество витков в одной катушке 54, в слое 14, в последнем слое 12, слоев 4); проводник первичной обмотки размером 2,65×4 мм (толщина изоляции на две стороны 0,27 мм); проводник вторичной обмотки размером 3,15×6 мм (толщина изоляции на две стороны 0,5 мм); толщина межслойной изоляции 0,15 мм; длина провода первичной обмотки 66,5, вторичной 19,5 м.

Геометрические размеры трансформатора:  $a = 65$  мм;  $b = 50$  мм;  $h_{\text{ок}} = 310$  мм;  $l_{\text{ок}} = 75$  мм;  $h_{\kappa 1} = 63$  мм;  $C_{\kappa 1} = 26$  мм;  $C_{\kappa o 1} = 29$  мм;  $h_{\kappa 2} = 87$  мм;  $C_{\kappa 2} = 18$  мм;  $C_{\kappa o 2} = 28$  мм;  $l_{\kappa 1} = 16$  мм;  $l_{\kappa 2} = 18$  мм;  $d_{o 1} = 3$  мм;  $d_{o 2} = 10$  мм;  $\Delta h_1 = D h_2 = 6$  мм;  $\Delta h_{1,2}^{\min} = 8$  мм;  $\Delta h_{1,2}^{\max} = 148$  мм; габаритные размеры трансформатора 230×130×405 мм.

Тепловые характеристики: средняя температура первичной обмотки 140, вторичной 130, магни-

топровода 75 °С при температуре окружающей среды 40 °С, класс изоляции F [14].

**Закключение.** Предложена оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния с подвижными и неподвижными обмотками с полным разделением зависимых и независимых переменных.

Модель позволяет оптимизировать трансформатор на минимум массы, объема или стоимости его активных материалов при обеспечении заданных значений индуктивности рассеяния. Оптимизационная модель будет полезна разработчикам новых сварочных источников питания.

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., Корицкий В. А. К расчету сопротивления короткого замыкания сварочного трансформатора с подвижной обмоткой // Автомат. сварка. — 1961. — № 7. — С. 21–24.
4. Лебедев В. К., Корицкий В. А. Потери энергии в кожухах сварочных трансформаторов с развитым рассеянием // Там же. — 1965. — № 7. — С. 1–6.
5. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета трансформаторов с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния // Техн. электродинамика. — 1997. — № 2. — С. 41–48.
6. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника и электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 38–45.
7. Федер Е. С., Песенсон А. Е. К расчету трансформаторов с подвижными обмотками для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1965. — № 7. — С. 7–10.
8. Пентегов И. В. К расчету трансформаторов для контактной сварки // Там же. — 1962. — № 9. — С. 13–17.
9. Пентегов И. В. Определение оптимальных размеров трансформаторов // Изв. вузов. Электромеханика. — 1960. — № 8. — С. 69–76.
10. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Расчет сварочного трансформатора для контактной конденсаторной сварки // Там же. — 1980. — № 3. — С. 26–30.
11. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Определение оптимального числа вторичных витков трансформаторов для контактной сварки на переменном токе и для конденсаторной сварки // Там же. — 1981. — № 4. — С. 11–15.
12. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Определение оптимальных параметров сварочных трансформаторов контактных машин с заданным сопротивлением обмоток // Автомат. сварка. — 1983. — № 11. — С. 35–40.
13. 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.
14. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
15. Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния // Автомат. сварка. — 2005. — № 7. — С. 32–35.
16. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.

An optimization model of a single-phase transformer with intensive transverse leakage fluxes flowing from core to core in the magnet core has been developed. The model allows calculation of transformers optimum by weight, volume and cost, both with mobile and with stationary windings, while ensuring the specified value of leakage inductance.

Поступила в редакцию 26.10.2004