



ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ И МАГНИТНЫМ ШУНТОМ

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

Предложена оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния и подвижным магнитным шунтом для обеспечения плавного регулирования сварочного тока. Модель позволяет рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости трансформаторы при обеспечении заданных минимальных и максимальных значений индуктивности рассеяния.

Ключевые слова: трансформаторы, оптимизационная модель, потоки рассеяния, магнитный шунт, индуктивность рассеяния, параметры сварки, сварочная техника

Однофазные трансформаторы с развитыми поперечными магнитными потоками (далее потоками рассеяния), проходящими от стержня к стержню магнитопровода, и магнитным шунтом широко применяются в источниках питания для сварки штучными электродами. Достоинством трансформатора является его компактность и возможность плавного регулирования индуктивности рассеяния самой конструкцией. Теория расчета трансформатора разработана в ИЭС им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым [1]. Развитием теории индуктивности рассеяния стала работа [2]. Оптимизация трансформаторов с поперечным рассеянием с возможным учетом магнитного шунта рассмотрена в [3], однако для этого требуется рассчитать большое количество промежуточных вариантов.

Известно, что при полном разделении зависимых и независимых переменных в оптимизационной модели оптимальный вариант трансформатора определяется однозначно. При аналитическом подходе оптимизации трансформатора с жесткой внешней характеристикой такая задача решена в работах [4–7], но применительно к рассматриваемому трансформатору оптимизационная модель не гарантирует получения оптимального варианта трансформатора с необходимым уровнем индуктивности рассеяния. Введение в указанную модель жесткозакрепленного параметра — заданного значения индуктивности рассеяния — приводит к возникновению проблемы при дифференцировании оптимизационной функции. Поэтому аналитическим методом эта задача не решалась. Ее удалось решить с помощью разработанной оптимизационной модели, предназначенной для численных методов оптимизации.

Целью настоящей работы является описание разработанной оптимизационной модели однофаз-

ного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния и магнитным шунтом, с жестким ограничением заданных минимального и максимального значений индуктивности рассеяния и полным разделением зависимых и независимых переменных. Модель позволяет однозначно рассчитать оптимальный трансформатор с минимумом массы, объема или стоимости его активных материалов. Эта статья является завершающей в ряде публикаций [8, 9] по оптимизации основных типов однофазных сварочных трансформаторов.

Развитые поперечные потоки рассеяния в рассматриваемом трансформаторе образуются путем разнесения первичной и вторичной обмоток по длине стержней магнитопровода, а плавное регулирование индуктивности рассеяния происходит за счет того, что магнитный шунт вдвигается и выдвигается между обмотками (рисунок). При этом потоки рассеяния проходят от стержня к стержню магнитопровода и через магнитный шунт. Если шунт вдвигается, то индуктивность рассеяния увеличивается (сварочный ток уменьшается), а при выдвигении — уменьшается (сварочный ток увеличивается).

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор, питающийся от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Примем, что вытеснение тока к поверхности проводников обмоток отсутствует и магнитный шунт не насыщен. При оптимизации учтем только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников обмоток.

Оптимизационная модель трансформатора с поперечным рассеянием и магнитным шунтом во многом повторяет аналогичную с поперечным рассеянием [9]. Поэтому приведенные здесь формулы и блоки оптимизационной модели читатель может найти в работе [9].



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

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

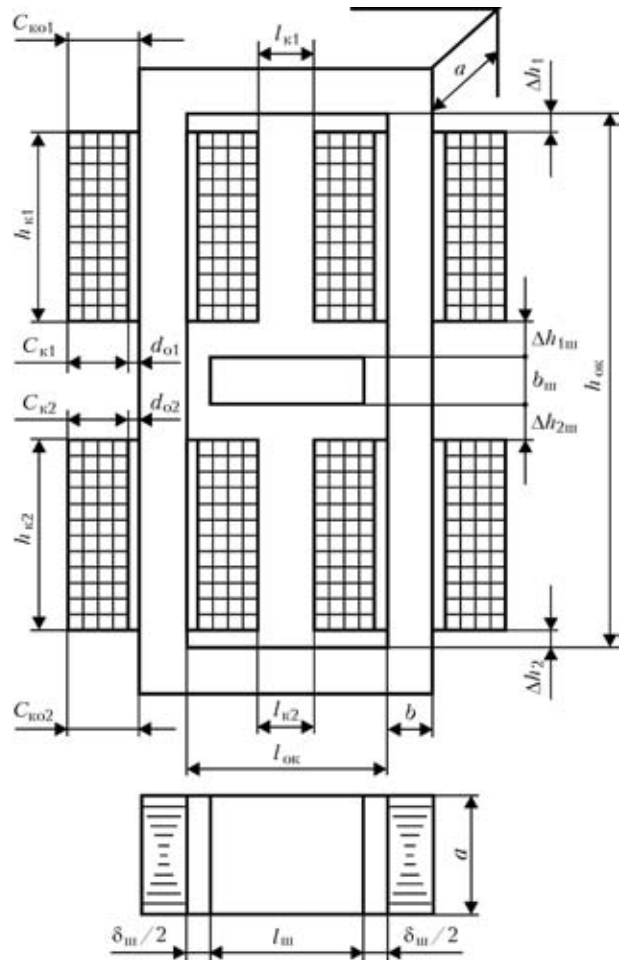
Далее без изменений следует блок формул (2)–(14) первого локального цикла из работы [9]; причем значения индуктивности рассеяния трансформатора при полностью выдвинутом шунте L_k^{\min} , L_s^{\min} и $\Delta L_{\text{л}}$ вычисляются так же, как и в [9] при заданном расстоянии между обмотками $\Delta h_{1,2} = \Delta h_{1\text{ш}} + b_{\text{ш}} + \Delta h_{2\text{ш}}$.

Для обеспечения наибольшего заданного значения индуктивности рассеяния $L_{\text{к.з}}^{\max}$ необходимо определить немагнитный зазор $\delta_{\text{ш}}$ между стержнями магнитопровода и полностью вдвинутом магнитном шунте. Для этого используется второй локальный цикл.

Стартовое значение $\delta_{\text{ш}}$ принимается равным 2 мм, а задаваемое начальное значение шага этой величины по зазору составляет $\Delta\delta_{\text{ш}} = 0,3\delta_{\text{ш}}$.

По формулам (1), (23)–(26) из работы [9] (без учета индуктивности цепи тока намагничивания магнитного шунта $L_{\text{шш}}$) и (21) из работы [2] при полностью вдвинутом шунте вычисляются максимальные значения индуктивности рассеяния трансформатора L_k^{\max} , а также индуктивность рассеяния L_s^{\max} , обусловленная потоками рассеяния, проходящими между стержнями магнитопровода в зоне первичной и вторичной обмоток $L_{s1,2}$, индуктивности рассеяния, обусловленной потоками рассеяния, проходящими в зоне магнитного шунта $L_{s\text{ш}}$, индуктивность рассеяния между стержнями магнитопровода и магнитным шунтом $L_{\delta,\text{ш}}$ и индуктивность $\Delta L_{\text{л}}$.

Если значение L_k^{\max} оказывается меньше заданного, то наибольшее значение индуктивности L_k^{\max} в рассчитываемом трансформаторе получить не представляется возможным, и тогда значение $\delta_{\text{ш}}$ принимается равным 2 мм, а значение L_k^{\max} получается меньше заданного. Данная рекомендация основана на том, что на практике при немагнитном зазоре $\delta_{\text{ш}}/2 < 1$ мм возникают значительные усилия между магнитным шунтом и стержнем магнитопровода, приводящие к вибрациям магнитного шунта и повышению уровня шума. К тому же, выполнить зазор меньше 1 мм для подвижного шунта очень сложно.



Однофазный трансформатор с поперечными магнитными потоками рассеяния и магнитным шунтом: $\Delta h_{1\text{ш}}$, $\Delta h_{2\text{ш}}$ — заданное расстояние между торцами катушек соответственно с первичной и вторичной обмотками и магнитным шунтом; $l_{\text{ш}}$, $b_{\text{ш}}$ — соответственно длина и ширина шунта; $\delta_{\text{ш}}$ — немагнитный зазор между стержнями магнитопровода и магнитным шунтом; остальные обозначения — см. рисунок из работы [9]

Немагнитный зазор между стержнями магнитопровода и магнитным шунтом будет составлять

$$\delta_{\text{ш}} = \begin{cases} \delta_{\text{ш}} + \Delta\delta_{\text{ш}}, & \text{если } L_k^{\max} > L_{\text{к.з}}^{\max}; \\ \delta_{\text{ш}} - \Delta\delta_{\text{ш}}, & \text{если } L_k^{\max} < L_{\text{к.з}}^{\max} \text{ и } \delta_{\text{ш}} \geq 2 \text{ мм.} \end{cases} \quad (2)$$

Выражение (2) образует подцикл, при входе в который программа работает только с одним из его текущих условий и неизменным значением $\Delta\delta_{\text{ш}}$ с пересчетом значений L_k^{\max} на каждом шаге. Подцикл выполняется до тех пор, пока истинно текущее условие подцикла. После этого уменьшается шаг $\Delta\delta_{\text{ш}} = 0,2\Delta\delta_{\text{ш}}$ и проверяется выполнение условия по выходу из второго локального цикла:

$$|L_{\text{к.з}}^{\max} - L_k^{\max}| / L_{\text{к.з}}^{\max} < \varepsilon_2 \text{ или } \delta_{\text{ш}} < 2 \text{ мм,} \quad (3)$$

где ε_2 — задаваемая точность вычислений во втором локальном цикле, состоящем из (2) и (3).

Затем вычисляется длина магнитного шунта



$$l_{ш} = l_{ок} - \delta_{ш} \quad (4)$$

и высота окна магнитопровода

$$h_{ок} = \Delta h_1 + h_{к1} + \Delta h_{1ш} + b_{ш} + \Delta h_{2ш} + h_{к2} + \Delta h_2. \quad (5)$$

Средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе l_c определяется по (18) из [9].

Объем активного материала магнитопровода составляет

$$V_c = l_c S_c + l_{ш} S_{ш}, \quad (6)$$

где $S_{ш} = k_c ab_{ш}$ — активное поперечное сечение магнитного шунта; $b_{ш} = k_{ш} b$ — ширина шунта; $k_{ш} \leq 1$ — коэффициент ширины шунта.

Объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода, обмоток и всего трансформатора рассчитываются по (19)–(21) из [9].

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [4]

$$F = M_c + k_g M_o, \quad (7)$$

где k_g — обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала магнитопровода и обмоток. Значение k_g выбирают в зависимости от того, для какого критерия оптимизации ведется расчет [4, 8, 9].

Условие по выходу из глобального цикла имеет следующий вид:

$$|F - F'| / F < \varepsilon, \quad (8)$$

где ε — задаваемая точность вычислений в глобальном цикле.

В оптимизационной модели трансформатора (1)–(8) (и входящих в нее формул из [2, 9]) независимыми переменными являются две величины — b и $C_{к1}$, все остальные являются заданными или зависимыми. Независимые переменные определяются при оптимизации функции F . Минимальные значения оптимизационной функции могут быть найдены любыми численными методами оптимизации, например методом покоординатного спуска, при заданных начальных значениях независимых переменных b и $C_{к1}$. В результате оптимизации функции F определяются оптимальные значения переменных b , $C_{к1}$ и остальных величин, входящих в оптимизационную модель. Причем оптимальный вариант для какого-либо из значений коэффициента k_g может быть только один для одних и тех же заданных параметров трансформатора.

Разработанная оптимизационная модель применялась для расчета трансформаторов сварочных источников питания, созданных в ИЭС им. Е. О. Патона. Приведем данные о сварочном трансформаторе с магнитным шунтом, рассчитанном с помощью разработанной оптимизационной модели на минимум массы активных материалов. Эти данные

могут быть использованы при изготовлении предназначенного для ремонтных мастерских и бытовых целей трансформатора для сварки штучными электродами с плавным регулированием тока.

Трансформатор имеет следующие параметры (обозначения величин см. выше и в [9]): $U_1 = 220$ В; $U_2 = 60$ В; $f_c = 50$ Гц; $X = 30$ %; $k_{тр} = 3,674$; $L_k^{min} = 9,925$ мГн; $L_k^{max} = 31,28$ мГн (приведены к первичной обмотке). Трансформатор дает возможность регулировать сварочный ток в диапазоне $I_2 = 75 \dots 160$ А. Значения параметров для номинального тока 160 А следующие: $I_1 = 45,7$ А; $I_{1дл} = 25$ А; $J_{1дл} = 2,847$ А/мм²; $J_{2дл} = 2,883$ А/мм²; ток холостого хода — 2,154 А (4,71 %); мощность трансформатора — 9,6 кВ·А; напряжение на дуге — 26,4 В; КПД — 94,2 %; $B_m = 1,63$ Тл; $k_{ш} = 0,5$; электротехническая сталь 3414 толщиной 0,35 мм; $c_c = 1,4$ у.е./кг; обмотки из меди; $c_o = 3,3$ у.е./кг; $M_c = 17,5$ кг; $M_o = 8,7$ кг; $M = 26,2$ кг; $C_c = 24,5$ у.е.; $C_o = 28,7$ у.е.; $C = 53,2$ у.е.

Обмотки имеют следующие параметры: соединение катушек первичной обмотки — параллельное, $w_1 = 169$ (число витков в одной катушке — 169, в слое — 19, в последнем слое — 17, слоев — 9); соединение катушек вторичной обмотки параллельное, $w_2 = w_1/k_{тр} = 46$ (число витков в одной катушке — 46, в слое — 10, в последнем слое — 6, слоев — 5); проводник первичной обмотки размером 1,7×2,8 мм (толщина изоляции на две стороны — 0,27 мм); проводник вторичной обмотки размером 3,1×5,0 мм (толщина изоляции на две стороны — 0,50 мм); толщина межслойной изоляции — 0,15 мм; длина провода первичной обмотки — 115 м, вторичной — 32 м.

Геометрические размеры трансформатора: $a = 85$ мм; $b = 45$ мм; $h_{ок} = 155$ мм; $l_{ок} = 60$ мм; $h_{к1} = 61$ мм; $C_{к1} = 18$ мм; $C_{кo1} = 21$ мм; $h_{к2} = 61$ мм; $C_{к2} = 19$ мм; $C_{кo2} = 22$ мм; $l_{к1} = 16$ мм; $l_{к2} = 15$ мм; $d_{o1} = d_{o2} = 3$ мм; $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 3$ мм; $\Delta h_{1ш} = \Delta h_{2ш} = 3$ мм; $b_{ш} = 23$ мм; $l_{ш} = 56,8$ мм; $\delta_{ш} = 3,2$ мм; размеры трансформатора 195×130×245 мм.

Тепловые характеристики: средняя температура первичной обмотки — 140 °С; вторичной — 130 °С; магнитопровода — 75 °С при температуре окружающей среды 40 °С, класс изоляции «F» [10].

Отметим, что для простоты изложения в настоящей работе и в [8, 9] рассмотрены простейшие оптимизационные модели однофазных сварочных трансформаторов. При необходимости модели можно модифицировать, вводя в них блоки расчета других параметров.

Таким образом, разработана оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния и подвижным



магнитным шунтом, с полным разделением зависимых и независимых переменных. Она позволяет однозначно 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.

Приведенные данные сварочного трансформатора с магнитным шунтом, рассчитанного на минимум массы по разработанной оптимизационной модели, могут быть использованы при изготовлении трансформатора с плавным регулированием тока для сварки штучными электродами, предназначенного для ремонтных мастерских и бытовых целей.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
2. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника і електромеханіка. — 2004. — № 2. — С. 38–45.

An optimization model is proposed for a single-phase transformer with developed transverse leakage flows and mobile magnetic shunt to ensure a smooth adjustment of welding current. The model enables designing transformers of optimum weight, volume and cost, while providing the specified minimum and maximum values of leakage inductance.

3. Федер Е. С., Песенсон А. Е. К расчету трансформаторов с подвижными обмотками для дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1965. — № 7. — С. 7–10.
4. Пентегов И. В., Рымар С. В., Стемковский Е. П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Техн. электродинамика. — 2002. — № 1. — С. 22–28.
5. Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А. Определение оптимальных параметров сварочных трансформаторов контактных машин с заданным сопротивлением обмоток // Автомат. сварка. — 1983. — № 11. — С. 35–40.
6. Пентегов И. В., Стемковский 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.
7. Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А. Расчет сварочного трансформатора для контактной конденсаторной сварки // Там же. — 1980. — № 3. — С. 26–30.
8. Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния // Там же. — 2005. — № 7. — С. 32–35.
9. Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния // Там же. — 2005. — № 9. — С. 21–24.
10. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.

Поступила в редакцию 02.05.2005

ARCWELDSYS ДУГОВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ. СИСТЕМА ВЫБОРА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЯ

Разработанная компьютерная система предназначена для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе альтернативных сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования и соответствующего информационного обеспечения.

В качестве исходной информации в системе используются следующие паспортные данные фирмы-изготовителя сварочных материалов: варианты сварочных материалов, рекомендуемые для дуговой сварки данного типа конструкционной стали; режимы дуговой сварки; коэффициенты наплавки; химический состав наплавляемого металла.

Эти данные вводятся в систему пользователем одновременно с указанием типа свариваемой конструкционной стали (основного материала) и ее химического состава. В обмен система выдает пользователю для каждого альтернативного варианта следующую информацию:

- размер и форма зоны проплавления для корневого шва и последующих проходов (размер непровара, риск прожога);
- химический состав металла зоны проплавления;
- микроструктурный состав металла зоны проплавления и зоны термического влияния;
- механические свойства зоны проплавления и зоны термического влияния (твердость, временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость (KCV) при температурах –30...70 °С;
- степень риска образования горячих и холодных трещин.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 34
Тел./факс: (38044) 287 65 57; e-mail: d34@paton.kiev.ua