

## НОВЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Алпатов А.И., зам. нач. конструкторско-технологического отдела  
 ОАО "Электростанция"  
 Россия, 107023, Москва, ул. Электростанционная, 21, ОАО ПКХК "Электростанция"  
 тел (095) 777-8211

*Описуються постановки деяких задач, що виникли перед конструктором-розраховувачем трансформаторів останнім часом, даються підходи до їхнього вирішення.*

*Описываются постановки некоторых задач, возникших перед конструктором-расчетчиком трансформаторов в последнее время, даются подходы к их решению.*

Развитие теории и практики трансформаторостроения породило ряд новых проблем и задач, которые непосредственно затрагивают этап проектирования трансформаторов. К таким задачам относятся:

- экспресс-проектирование трансформаторов;
- моделирование и расчет трансформаторов в рабочих режимах;
- снижение потерь от магнито-контурных токов, и другие.

**Экспресс-проектирование трансформаторов.** Представляет собой подзадачу нового класса задач – идентификации трансформаторов [1], цель которых заключается в определении основных геометрических и конструктивных параметров  $Q = \{q_i\}$  по данным измерений (собственно идентификация) или данным технического задания (проектирование). Математически задача идентификации формулируется как последовательность задач:

1) поиска операторов  $G_i(Q)$  из уравнений  $R_i = G_i(Q)V_i$ , (1)

2) получения искомого значения параметров  $Q = \{q_i\}$  с помощью найденных операторов  $G_i(Q)$ .

В наиболее простой и эффективной электротехнической постановке задачи реакция  $R_i$  на  $i$ -ое внешнее воздействие и само воздействие  $V_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) суть токи и напряжения обмоток, а связь (1) представляет собой известное уравнение состояния трансформатора [2, 3]. При этом в общем виде, например, задача для однофазного двухобмоточного трансформатора формулируется так: по известным номинальным напряжениям обмоток  $U_{1н}$ ,  $U_{2н}$  и номинальным токам  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$ , параметрам х.х.  $P_0$ ,  $i_0$  и к.з.,  $P_k$ ,  $u_k$  необходимо определить высоты  $h_i$ , радиальные размеры  $a_i$ , числа витков  $w_i$  обмоток  $i=1, 2$ , а также диаметр стержня магнитопровода  $d$ . В иной постановке искомыми параметрами могут выступать, например, эквивалентная длина магнитной системы  $l_m$ , магнитная проницаемость магнитной системы  $\mu$  и др.

Рассмотрим последовательность действий на каждом из двух этапов. На первом этапе решается задача диагностики параметров электрической и магнитной цепных моделей трансформатора. Имеем

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1^1 & U_1^2 \\ U_2^1 & U_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{10} & 0 \\ 0 & I_{20} \end{bmatrix}^{-1};$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_1^2 \\ I_2^1 & I_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1k} & 0 \\ 0 & U_{2k} \end{bmatrix}^{-1};$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^1 W_1 & I_1^2 W_1 \\ I_2^1 W_2 & I_2^2 W_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{1k} & 0 \\ 0 & \Phi_{2k} \end{bmatrix}^{-1};$$

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{O}_1^1 & \Phi_1^1 \\ \hat{O}_2^1 & \Phi_2^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{10} W_1 & 0 \\ 0 & I_{20} W_2 \end{bmatrix}.$$

Здесь  $U_i^j$  – напряжение  $i$ -ой обмотки в опыте х.х. со стороны  $j$ -ой обмотки,  $I_{i0}$  – ток х.х. со стороны  $i$ -ой обмотки;  $I_i^j$  – ток  $i$ -ой обмотки в опыте к.з. со стороны  $j$ -ой обмотки,  $U_{ik}$  – напряжение к.з.  $i$ -ой обмотки;  $\hat{O}_i^j$  – поток  $i$ -ой обмотки в опыте х.х. со стороны  $j$ -ой обмотки,  $\Phi_{ik}$  – поток  $i$ -ой обмотки в опыте к.з. со стороны этой же обмотки;  $\{Z_{ij}\}_{22}$ ,  $\{Y_{ij}\}_{22}$  – матрицы электрических сопротивлений и проводимостей эквивалентного 4-полюсника;  $\{Q_{ij}\}_{22}$ ,  $\{A_{ij}\}_{22}$  – матрицы магнитных сопротивлений и проводимостей схемы замещения магнитной цепи.

Второй этап заключается собственно в определении искомого значения на основе известных в теории трансформаторов [4, 5] соотношений, связывающих геометрико-конструктивные параметры трансформаторов с параметрами электрических и магнитных схем замещения. Некоторые из этих соотношений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Выражение через режимные параметры	Выражение через геометрические параметры
$R_i$	$R_e Z_{i11} - k_{12} R_e Z_{i12} \approx \approx 0.5 R_e (Y_{i1}^{-1})$	$\frac{\rho_1 w_1 \pi (d + 2\Delta_{01} + a_1) \delta_1}{I_{i1}}$
$R_2$	$R_e Z_{222} - k_{21} R_e Z_{221} \approx \approx 0.5 R_e (Y_{22}^{-1})$	$\frac{w_2^2 \mu_0 \pi [(d + 2\Delta_{01} + 2a_1 + 2\Delta_{12} + a_2)^2 - 4h]}{4h} \cdot \frac{(d + 2\Delta_{01} + a_1)^2}{4h},$ $i=1,2$
$L_k^i$	$\frac{I_m (Y_{ii}^{-1})}{\omega}, i=1,2$	$\frac{\rho_2 w_2 \pi (d + 2\Delta_{01} + 2a_1 + 2\Delta_{12} + a_2) \delta_2}{k_a^2 I_{2i}}$
$L_i$	$\frac{I_m Z_{ii}}{\omega}, i=1,2$	$\frac{w_i^2 \mu k_3 \pi d^2}{8(h + 2d + a_1 + a_2 + \Delta_{\delta y} + \Delta_{\delta y} + \Delta_{01} + \Delta_{12} + \Delta_{02})},$ $i=1,2$

Здесь  $R_i$  – активное сопротивление  $i$ -ой обмотки;  $L_k^i$  – индуктивность короткого замыкания со стороны  $i$ -той обмотки;  $L_i$  – индуктивность  $i$ -той обмотки;  $\rho_i$  – удельная проводимость проводника  $i$ -ой обмотки;  $\mu$  –

магнитная проницаемость магнитной системы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\delta_i$  – плотность тока в  $i$ -ой обмотке;  $\Delta_{01}$ ,  $\Delta_{12}$ ,  $\Delta_{02}$ ,  $\Delta_{вн}$ ,  $\Delta_{вн}$  – нормативные изоляционные расстояния соответственно: магнитная система – внутренняя обмотка, между обмотками, наружная обмотка – боковое ярмо, обмотки – верхнее ярмо, обмотки – нижнее ярмо;  $k_3$  – коэффициент заполнения стальной описанной окружности,  $k_{из}$  – коэффициент, показывающий долю изоляции в сечении  $i$ -той обмотки;  $k_0$  – коэффициент добавочных потерь.

Приведенные выражения позволяют сформировать систему уравнений, решением которой являются искомые значения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $h$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $d$ . Некоторые сравнительные результаты применения традиционного (Т) и предлагаемого (П) метода приведены в табл. 2. Предлагаемый метод удобен также для экспресс-анализа различных вариантов конструкций.

Таблица 2

Тип трансформатора	Число витков первичной обмотки $w$		Радиальный размер обмоток $a$ , м		Высота обмоток $h$ , м		Диаметр стержня $d$ , м	
	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П
ТМГ-630/10	23	24	0,032	0,028	0,43	0,53	0,2	0,196
ТМГ-400/10	28	30	0,029	0,023	0,350	0,458	0,180	0,173
ТМГ-250/10	36	37	0,022	0,020	0,288	0,336	0,160	0,157
ТМГ-160/10	47	49	0,022	0,022	0,285	0,384	0,140	0,146
ТМГ-100/10	59	62	0,021	0,018	0,236	0,302	0,125	0,123
ТМГ-400/35	28	30	0,028	0,020	0,407	0,632	0,180	0,182
ТМГ-630/35	23	22	0,030	0,027	0,490	0,516	0,200	0,203

**Моделирование и расчет трансформаторов в рабочих режимах.** В традиционном представлении магнитные характеристики полей рассеяния трансформаторов, в основном, линейны. Однако исследования показали, что это не так [2, 3]. Наглядной иллюстрацией последнего утверждения служит выражение

$$\{Z_{ij}\}_{22} \neq \{Y_{ij}\}_{22}^{-1}, \quad (2)$$

отражающее соотношение между параметрами холостого хода  $\{Z_{ij}\}_{22}$  и короткого замыкания  $\{Y_{ij}\}_{22}$  трансформатора. Неравенство (2) показывает, что указанные параметры соответствуют разным магнитным состояниям трансформатора и, поэтому, например, объединение в одной системе уравнений данных двух этих режимов неправомерно. Более глубокий анализ позволил установить, что основной причиной этого факта является неравномерное распределение индукции в магнитной системе в рабочих режимах. Отмеченная неравномерность, в свою очередь, обуславливает нелинейное изменение магнитного сопротивления потоку рассеяния и, в итоге, изменение реактивного сопротивления трансформатора в сравнении с режимом к.з. Неучет данного обстоятельства приводит к тому, что неправильно рассчитываются воздействия, которым может подвергаться трансформатор в режиме внезапного короткого замыкания и других.

Расчет реального индуктивного сопротивления трансформаторов в рабочем режиме сводится к введению поправочного коэффициента к расчетному сопротивлению к.з. Сам коэффициент может быть приближенно вычислен путем сопоставления заданных параметров х.х. и к.з. на основе известных свойств

матриц  $Z$  и  $Y$  параметров эквивалентных многополюсников. Более сложной является расчетная модель распределения магнитного поля в магнитной системе трансформатора в режиме номинальной нагрузки, необходимая для вычисления уточненных параметров х.х. Предпочтительным здесь видится путь цепного моделирования.

**Снижение потерь от магнито-контурных токов.** Обнаруженный в середине 70-х годов эффект возбуждения в магнитных системах трансформаторов электрических токов проводимости, замыкающихся вдоль контура магнитопровода [7], тем не менее не получил отражения в методиках проектирования. В [8] предложен подход к предварительной оценке потерь в магнитной системе, вызванных указанными токами. Суть предложения сводится к последовательной реализации следующих двух этапов:

- нахождению функции пространственного распределения по глубине окна магнитной системы ЭДС, вызывающих магнито-контурные токи  $E_k(x)$ ;
- вычислению параметров электрической модели магнитопровода на основе нормированного значения удельного сопротивления межлистовой изоляции и последующему вычислению пространственного распределения электрических сопротивлений контуров магнитопровода –  $R_k(x)$ .

Дальнейший расчет собственно токов в контурах магнитопровода и вызываемых ими потерь достаточно тривиален. Однако важным является обоснование допустимого уровня указанных токов и потерь. В качестве такого критерия предлагается принять значение тока, вызывающего максимально допустимый по нормам перегрев пластин.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алпатова А.И., Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Идентификация трансформаторов // Изв. РАН. Энергетика. - 2001. - №4. - С. 93-98.
- [2] Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Диагностика силовых трансформаторов под нагрузкой // Изв. РАН. Энергетика. - 1996. - №1. - С.74-81.
- [3] Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Непрерывная диагностика трансформаторов // Электричество. - 1998. - №7.
- [4] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970.
- [5] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [6] Алпатов М.Е. Алпатова А.И. Формализация предварительных расчетов силовых трансформаторов // Электричество. - 1996. - №2.
- [7] Хенкин А.Л., Алпатов М.Е. Токи в контурах магнитных систем трансформаторов/ Электротехника. - 1983. - №7. - С. 55-57.
- [8] Алпатов М.Е., Алпатова А.И. Моделирование магнито-контурных токов в трансформаторе. Электрический журнал. – 2002. - №1. - С. 36-40.

Поступила 03.01.2003