

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, В.М. Яров
 (г. Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»,
 Чувашский государственный университет)
 K.V. Bykov, N.M. Lazareva, V.M. Yarov (Cheboksary, LLC Research
 and Production Enterprise "ECRA", Chuvash State University)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

DEFINITION OF PARAMETERS OF THE EQUIVALENT CIRCUIT OF A TRANSFORMER

Рассматриваются методики экспериментального определения параметров T-образной схемы замещения трансформатора напряжения. Приведены результаты идентификации параметров модели трансформатора различными методами.

The methods of experimental determination of the parameters of a T-shaped equivalent circuit of a voltage transformer are considered. The results of identification of the parameters of the transformer model by various methods are presented.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, параметры схемы замещения, моделирование в Simulink.

Keywords: voltage transformer, equivalent circuit parameters, simulation in Simulink.

В паспортных данных на силовые трансформаторы часто приводятся только основные электрические параметры: напряжения, токи и мощность, которых недостаточно для определения параметров схемы замещения трансформатора (рис. 1), необходимых для выполнения компьютерного моделирования режимов работы преобразователя, например, в Simulink Matlab [1].

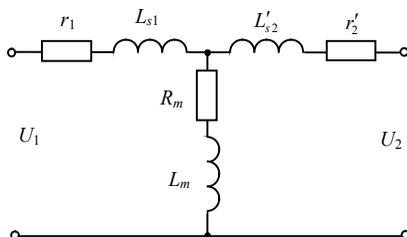


Рис. 1. T-образная схема замещения трансформатора

Существуют различные методики определения параметров схемы замещения трансформатора [2–4].

Измерения с помощью RLC -метра выполняются в режимах существенно меньших номинального [3, 4], а по методике, предложенной в [2], измеряются только индуктивные параметры. В работе [5] параметры индуктора предлагается измерять при разряде на него конденсатора. С помощью предварительно заряженного конденсатора можно обеспечить измерение параметров при режимах работы трансформатора, близких к номинальному. Рассмотрим процессы при разряде конденсатора на обмотки трансформатора (рис. 2, а).

Временные диаграммы тока и напряжения разряда предварительно заряженного конденсатора C на первичную обмотку трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке приведены на рис. 2, б.

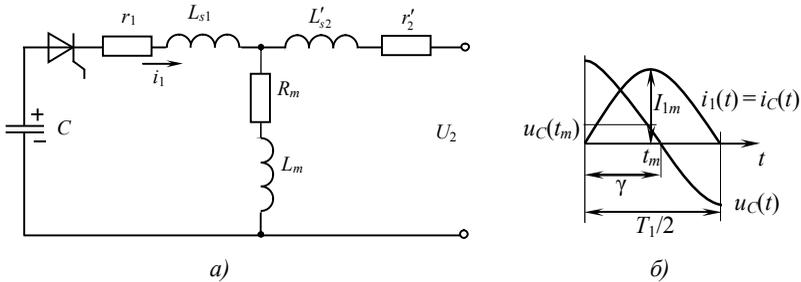


Рис. 2. Опыт холостого хода на вторичной стороне трансформатора: а – схема; б – временные диаграммы

Собственная круговая частота

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T_1} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (1)$$

где

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_1 C} = \frac{1}{(L_{s1} + L_m) C}; \quad (2)$$

$$\beta^2 = \frac{R_1^2}{4L_1^2} = \frac{(r_1 + R_m)^2}{4(L_{s1} + L_m)^2}. \quad (3)$$

Коэффициент затухания β можно определить, измеряя интервал γ , соответствующий моменту времени t_m , при котором ток $i_1(t)$ достигает максимального значения

$$\beta = \frac{\omega_c}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{2\pi}{T_1 \operatorname{tg} \gamma}. \quad (4)$$

Из (1) можно определить

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_c^2 + \beta^2}, \quad (5)$$

следовательно индуктивность

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C}. \quad (6)$$

Активное сопротивление R_1 вычисляем из (3)

$$R_1 = 2\beta L_1 \quad (7)$$

или в соответствии с рис. 2, б

$$R_1 = u_c(t_m)/I_{1m}. \quad (8)$$

Совмещая временные диаграммы тока $i_1(t)$ и напряжения вторичной обмотки $K_1 u_2(t)$, можно вычислить значение активного сопротивления ветви намагничивания

$$R_{m1} = K_1 u_2(t_m)/I_{1m}, \quad (9)$$

где $K_T = U_1/U_2$.

Сопротивление первичной обмотки

$$r_1 = R_1 - R_{m1}. \quad (10)$$

Аналогично, рассматривая разряд конденсатора C на вторичную обмотку при холостом ходе на первичной стороне, в соответствии с (1)–(10) определяем

$$L_2 = L_{s2} + L_m \text{ и } R_2 = r_2 + R_m,$$

а, совмещая временные диаграммы тока $i_2(t)$ и напряжения $u_1(t)/K_T$, вычисляем значение активного сопротивления ветви намагничивания

$$R_{m2} = u_1(t_m)/(K_T I_{2m})$$

и сопротивление вторичной обмотки

$$r_2 = R_2 - R_{m2}.$$

Для определения индуктивности намагничивания определяем индуктивности обмоток при согласном L_c и встречном L_b включении обмоток, а затем вычисляем взаимоиндуктивность

$$M = \frac{L_c - L_b}{4} \quad (11)$$

коэффициент связи

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (12)$$

Индуктивность намагничивания

$$L_m = KL_1,$$

а индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток вычисляем как

$$L_{s1} = L_1 - L_m, \quad (13)$$

$$L_{s2} = L_2 - L_m/K_T^2. \quad (13)$$

Схему опытов холостого хода можно реализовать, выполняя разряд конденсатора через встречно-параллельно включенные тиристор и диод (рис. 3, а).

В этом случае коэффициент затухания переходного процесса (рис. 3, б)

$$\beta = \frac{\omega_c}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}.$$

Резонансную частоту определяем по выражению (5), индуктивность L_1 и активное сопротивление R_1 – по формулам (6) и (7) соответственно. Дальнейшие расчеты будут совпадать с предыдущим вариантом.

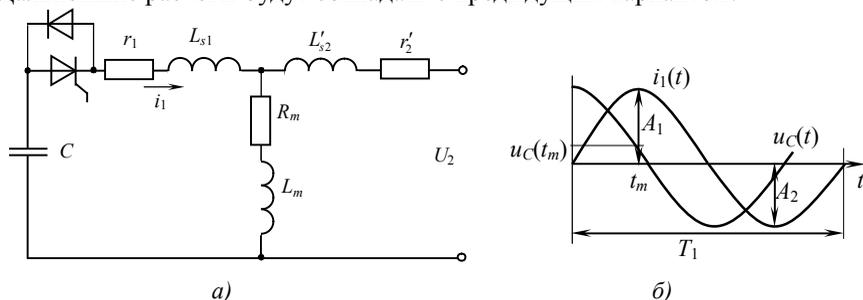


Рис. 3. Опыт холостого хода на вторичной стороне трансформатора с двумя ключами на первичной стороне:
а – схема; б – временные диаграммы

Для снижения погрешности вследствие влияния сопротивлений тиристора и диода, индуктивности и активного сопротивления соединительных проводов их можно определить при коротком замыкании входных зажимов прибора, а затем вычесть из измеренных значений.

Как вариант определение параметров схемы замещения трансформатора можно реализовать на основе измерений RLC -мультиметром, выполнив следующий алгоритм.

1. Измерить индуктивность первичной L_1 и вторичной L_2 обмоток на холостом ходу и активные сопротивления обмоток $r_{1\square}$, $r_{2\square}$ на постоянном токе.

2. По измеренным значениям добротностей индуктивностей L_1 и L_2 определить сопротивления обмоток на переменном токе

$$r_{\square} = \frac{\omega L_1}{Q_1}, r_{2\square} = \frac{\omega L_2}{Q_2}.$$

3. При согласном и встречном включении обмоток измерить соответственно индуктивности L_c и L_b .

4. Рассчитать взаимную индуктивность и коэффициент связи по соотношениям (11) и (12).

5. Определить индуктивности рассеяния по выражениям (13) и (14), сопротивление ветви намагничивания рассчитать как разность

$$R_m = r_{\square} - r_{1\square},$$

а сопротивление

$$r_2 = r_{2\Omega} - \frac{1}{K_T^2} R_m.$$

В таблице приведены результаты идентификации параметров схемы замещения трансформатора инверторного источника различными методами.

Таблица. Параметры схемы замещения трансформатора

Параметры	r_1 , Ом	L_{s1} , мкГн	r_2 , Ом	L_{s2} , мкГн	R_m , Ом	L_m , мкГн	R_1 , Ом	L_1 , мкГн	R_2 , Ом	L_2 , мкГн
Опыт рис. 2	0,118	3,72	0,25	1,0	2,152	740,9	2,27	744,66	0,62	42,9
Опыт рис. 3	0,4	14,1	0,23	6,14	10,05	1049	10,45	1190	0,85	71,6
<i>RLC</i> -метр	0,12	11,95	0,188	1,3	2,48	1183	2,6	1195	0,343	76

Различие результатов определения параметров можно объяснить нелинейным характером зависимости индукции в сердечнике от напряженности электромагнитного поля. При использовании первого метода сердечник премагничивается по несимметричному частному циклу. В двух других – перемагничивание происходит по более симметричным циклам, причем измерение *RLC*-метром осуществляется при малых токах.

Заключение

1. Результаты измерения параметров подтверждают нелинейный характер зависимостей трансформатора и влияние режима работы преобразователя на значения параметров трансформатора.

2. Первый из рассмотренных методов можно рекомендовать для трансформаторов, работающих в однотактных преобразователях.

3. Измерение параметров трансформаторов для двухтактных преобразователей предпочтительнее выполнять вторым методом.

4. Для предварительных измерений параметров трансформатора «на скорую руку» можно использовать *RLC*-метр, так как этот способ самый быстрый и незатратный.

Список литературы

1. Лазарева, Н.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.

2. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

3. Бердников, Л.В. Связь индуктивности рассеяния трансформатора и потерь в снаббере обратного преобразователя // Современная электроника, 2005. – № 3. – С. 62–64.

4. Бердников, Л.В. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью *RLC*-метра // Современная электроника, 2006. – № 8. – С. 58–61.

5. Болотовский, Ю.И. Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным / Ю.И. Болотовский, Л.И. Гутин, Г.И. Таназлы, А.А. Шуляк // Силовая электроника, 2005. – № 1. – С. 104–106.

Материал поступил в редколлегию 21.10.19.