

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. — М.: Машиностроение, 1972. — 304 с.
2. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 318 с.
3. Клемин А.И. Расчет надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 207 с.
4. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: Учебное пособие для вузов / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др. - Под ред. А.И. Андрущенко. — М.: Высшая школа, 1991. — 303 с.
5. Иванов Ю.М., Чумакова С.В. К вопросу оценки надежности технологических схем котельных // Известия вузов: Энергетика. — 1982. — № 5. — С. 57–61.
6. Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. — М.: Стройиздат, 1985. — 240 с.
7. Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. — М.: Стройиздат, 1989. — 268 с.
8. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости: Учебное пособие. — М.: Наука, 1981. — 303 с.
9. Турчак Л.И. Основы численных методов. Учебное пособие. — М.: Наука, 1987. — 320 с.
10. Голдаев С.В., Ляликов Б.А. Основы математического моделирования в теплотехнике: Учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 1999. — 106 с.
11. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 2001. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 544 с.
12. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / Под ред. О.Т. Ильченко. — Харьков: Вища школа, 1985. — 384 с.
13. Поршневые компрессоры / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 372 с.
14. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Зубков П.Т., Фадеев С.А. Математическое моделирование подъема дымового факела в атмосфере // Известия вузов. Энергетика. — 1986. — № 9. — С. 87–89.
15. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 240 с.

УДК 621.384.6:539.12.04

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА

В.А. Колчанова

Томский политехнический университет
E-mail: kolchanova_nika@mail.ru

Показана возможность экспериментального определения параметров схемы замещения трансформатора Тесла из осциллограмм опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Одним из критериев обеспечения надежного функционирования трансформатора Тесла – ключевого элемента различных электрофизических комплексов для согласования трансформатора с другими устройствами, является контроль и диагностика его параметров [1, 2]. В данной работе предлагается экспериментальное определение параметров схемы замещения трансформатора Тесла из опытов холостого хода и обратного холостого хода.

Рассмотрим алгоритм определения параметров первичной цепи трансформатора Тесла (рис. 1, а) на примере модельной задачи. После срабатывания ключа S в режиме холостого хода на первичную обмотку трансформатора с индуктивностью L1, разряжается конденсатор C1, заряженный до напряжения U (рис. 1, б).

Решением прямой задачи по расчету колебательного переходного процесса в цепи второго порядка для тока $i_1(t)$ будет выражение вида [1]

$$i_1(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} = 2 \cdot |A_1| \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega t),$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования; p_1 и p_2 – комплексно-сопряженные корни характеристического уравнения, которые являются величинами, несущими информацию о параметрах схемы.

Задаем параметрами схемы: R1=0,02 Ом; L1=6 мкГн; C1=8 мкФ; M=0,2 мГн; R2=20 Ом; L2=20 мГн; C2=2,4 нФ; U=50 кВ и, решая характеристическое уравнение, получаем комплексно-сопряжен-

ные корни $p_{1,2} = -1666,6 \pm j144328$ и выражение для тока $i_1(t) = 57739 \cdot e^{-1666,6t} \cdot \sin(144328t)$, А, графическая зависимость которого от времени приведена на рис. 2, а.

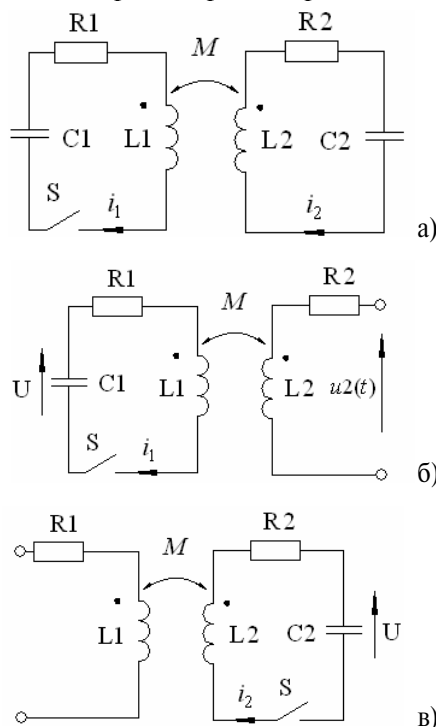


Рис. 1. Схема замещения трансформатора Тесла в режимах: а) рабочем; б) холостого хода; в) обратного холостого хода

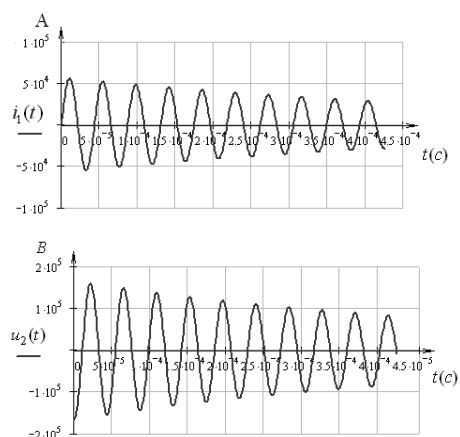


Рис. 2. Осциллограммы: а) тока $i_1(t)$; б) напряжения $u_2(t)$ в режиме холостого хода

По известной осциллограмме тока решаем *обратную задачу* определения параметров схемы. Используя систему нелинейной регрессии (1), определяем коэффициенты K_0, K_1, K_2 по графической зависимости рис. 2 [3]:

$$\begin{cases} i_1(t) = K_0 e^{K_1 t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \frac{di_1(t)}{dK_0} = e^{K_1 t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \frac{di_1(t)}{dK_1} = t \cdot K_0 e^{K_1 t} \cdot \sin(K_2 \cdot t); \\ \frac{di_1(t)}{dK_2} = t \cdot K_0 e^{K_1 t} \cdot \cos(K_2 \cdot t). \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{1,2} = -K_1 \pm jK_2 = -1666,6 \pm j144328 \frac{1}{c}; \quad (2)$$

$$L1 = \frac{U}{|K_0| \cdot K_2} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}; \quad (3)$$

$$C1 = \frac{1}{(K_1^2 + K_2^2) \cdot L1} = \frac{1}{|p| \cdot L1} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; \quad (4)$$

$$R1 = \sqrt{\left(\frac{1}{L1 \cdot C1} - K_2^2\right) \cdot 4L1^2} = 0,02 \text{ Ом}. \quad (5)$$

В результате получаем значения для коэффициентов: $K_0=5,774 \cdot 10^4$, $K_1=\delta=-1666,6$, $K_2=\omega=144328$. Используя соотношения (2–5), определяем параметры первичной цепи трансформатора.

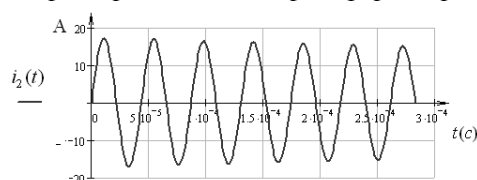


Рис. 3. Осциллограмма тока $i_2(t)$ в режиме обратного холостого хода

Для определения параметров вторичной цепи трансформатора $R2, L2, C2$ по осциллограмме тока $i_2(t)$ (рис. 3) выполним все предыдущие операции для режима обратного холостого хода (рис. 1, в).

В результате получаем значения коэффициентов для тока $i_2(t)$: $K2_0=17,32$; $K2_1=\delta=-500$; $K2_2=\omega=1443367$ по которым, используя соотношения (6–8) определяем $R2, L2, C2$.

$$L2 = \frac{U}{|K2_0| \cdot K2_2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad (6)$$

$$C2 = \frac{1}{(K2_1^2 + K2_2^2) \cdot L2} = \frac{1}{|p| \cdot L2} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}; \quad (7)$$

$$R2 = \sqrt{\left(\frac{1}{L2 \cdot C2} - K2_2^2\right) \cdot 4L2^2} = 20 \text{ Ом}. \quad (8)$$

Коэффициент взаимной индукции M определим из опыта холостого хода по осциллограмме напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Выражение для напряжения на вторичной обмотке:

$$u_2(t) = -M \frac{di_1}{dt} = -M \cdot |2 \cdot A_1 \cdot p_1| \cdot e^{\delta t} \cdot \cos(\omega t). \quad (9)$$

Решением системы уравнений нелинейной регрессии общего вида (10) для функции $u_2(t)$ (9) являются коэффициенты $a_0; a_1; a_2$ (11), с помощью которых по выражению (12) определяем коэффициент взаимной индукции M .

$$\begin{cases} u_2(t) = a_0 \cdot \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot e^{a_1 t} \cdot \cos(a_2 t); \\ \frac{du_2(t)}{da_0} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot e^{a_1 t} \cdot \cos(a_2 t); \\ \frac{du_2(t)}{da_1} = a_0 \cdot \cos(a_2 t) \left(\frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} \cdot e^{a_1 t} + \right. \\ \left. + \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot t \cdot e^{a_1 t} \right); \\ \frac{du_2(t)}{da_2} = a_0 \cdot e^{a_1 t} \cdot \left(\frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} \cdot \cos(a_2 t) - \right. \\ \left. - \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \cdot t \cdot \sin(a_2 t) \right). \end{cases} \quad (10)$$

$$a_0 = 1,667 \cdot 10^5; \quad a_1 = -1666,6; \quad a_2 = 144336,7 \quad (11)$$

$$M = \frac{-a_0 \cdot a_2 \cdot L1}{U} = \frac{-a_0 \cdot K_2 \cdot L1}{U} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}. \quad (12)$$

Полученные значения согласуются с модельными параметрами схемы. Таким образом, на примере модельной задачи доказана эффективность данного алгоритма и возможность его применения для контроля и диагностики трансформатора Тесла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зевеке П.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
- Вассерман С.Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных уско-

- рителях заряженных частиц. — Новосибирск: Препринт ИЯФ 77-110, 1977. — 43 с.
- Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: Специальный справочник. — СПб.: Изд-во "Питер", 2000. — 592 с.