

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ОБОБЩЕННЫМ ЛИНЕЙНЫМ РАЗМЕРОМ

Невзлин Б.И., Загурняк М.В., Аль-Зурейгат А.М., Дьяченко Ю.Ю.
Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля
bnevz@snu.edu.ua

Theoretical associations linking idling current magnitude and an efficiency and generalized linear size are offered. Experimental verification of obtained associations is carried out.

Постановка задачи.

Считается общеизвестным [1, 2], что зависимость полной электромагнитной мощности электрической машины S от обобщенного линейного размера (ОЛР) ℓ имеет вид

$$S = k_s \ell^4 \quad (1)$$

где k_s – коэффициент пропорциональности.

Для массы M аналогичная зависимость отличается коэффициентом k_M и показателем степени 3:

$$M = k_M \ell^3 \quad (2)$$

Найдем вид зависимостей тока холостого хода и КПД от ОЛР и сравним полученные выражения с экспериментальными данными.

Расчет теоретических зависимостей.

В реальном трансформаторе полный ток холостого хода превышает ток холостого хода идеального трансформатора на величину около 1 % и менее, которой можно пренебречь.

Ток холостого хода I_0 идеального трансформатора является чисто реактивным I_{0r} , а его относительная величина [3, с. 29-30]

$$i_0 = \frac{I_0}{I} = \frac{I_{0r}}{I} = \frac{\Phi}{w} R_m \frac{1}{I}, \quad (3)$$

где Φ – основной поток трансформатора; w – число витков обмотки; R_m – магнитное сопротивление на пути основного потока.

При неизменной величине питающего напряжения величина тока трансформатора [4]:

$$I = \frac{S}{U} \sim S \sim \ell^4.$$

Из конструктивных соображений величина магнитной индукции поддерживается неизменной, поэтому можно записать, что [5]

$$\Phi = BS \sim \ell^2, \quad (4)$$

где B – магнитная индукция; S – площадь сечения стержня.

Приближенно, число витков первичной обмотки w_1 пропорционально отношению площади сечения обмотки S_{win} к площади сечения проводника S_{wir} и

$$w \sim \frac{S_{win}}{S_{wir}} = \frac{S_{win}}{I/J},$$

где J – плотность тока в обмотках.

Считая плотность тока в обмотках J величиной неизменной, а площадь сечения обмоточного окна пропорциональной квадрату ОЛР,

$$w \sim \frac{S_{win}}{S_{wir}} = \frac{S_{win}}{I/J} \sim \frac{S_{win}}{I} \sim \frac{\ell^2}{\ell^4} = \frac{1}{\ell^2}. \quad (5)$$

Магнитное сопротивление R_m пропорционально длине силовой линии и обратно пропорционально площади сечения магнитопровода [6], то есть

$$R_m \sim \frac{\ell}{\ell^2} = \frac{1}{\ell}. \quad (6)$$

Из (3)-(6) получаем, что

$$i_0 \sim \ell^2 \ell^2 \frac{1}{\ell} \frac{1}{\ell^4} = \frac{1}{\ell}, \quad (7)$$

то есть, относительная величина тока холостого хода обратно пропорциональна ОЛР.
КПД трансформатора выражается формулой [2]:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}, \quad (8)$$

где ΣP – сумма потерь; P_1 – потребляемая мощность.

Согласно [7], электрические потери в трансформаторе определяются по формуле:

$$P_e = \pi \rho \frac{S}{u_c} 2d_{12} J, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводников обмотки; u_c – напряжение витка; d_{12} – средний диаметр канала между обмотками.

Считая напряжение U не зависящим от ОЛР, с учетом (5), получаем

$$u_c = \frac{U}{w} \sim \ell^2. \quad (10)$$

Средний диаметр канала между обмотками пропорционален ОЛР, то есть $d_{12} \sim \ell$.

Так как плотность тока не зависит от ОЛР, то в соответствии с (9) с учетом (1), (10), получаем

$$P_e \sim \frac{\ell^4 \ell}{\ell^2} = \ell^3, \quad (11)$$

то есть, электрические потери в обмотке трансформатора пропорциональны третьей степени ОЛР.

Рассмотрим магнитные потери в трансформаторе. Потери в стали определяются как [7]

$$P_m = p_{sy} M_{sy} + p_{sc} M_{sc}, \quad (12)$$

где p_{sy} , p_{sc} – удельные потери в стали ярма и стержней; M_{sy} , M_{sc} – масса стали ярма и стержня.

Удельные потери зависят от величин индукции, марки и толщины листов стали. Принимаем вышеперечисленные величины независимыми от ОЛР. Тогда, в соответствии с (2),

$$P_m \sim \ell^3. \quad (13)$$

Добавочные потери также по сути являются электрическими или магнитными, поэтому, с учетом (11), (13) потери в трансформаторе пропорциональны третьей степени ОЛР

$$P = P_e + P_m \sim \ell^3. \quad (14)$$

Тогда, по (8) зависимость КПД от ОЛР должна выражаться формулой

$$\eta = 1 - \frac{n_\eta}{\ell}, \quad (15)$$

где n_η – коэффициент,

и, таким образом, в зависимость КПД ОЛР входит с показателем степени -1.

Экспериментальная проверка.

Проверим теоретические зависимости энергетических показателей, таких как КПД и ток холостого хода, от ОЛР, на экспериментальном материале.

В качестве примера возьмем трансформаторы двухобмоточные силовые масляные общего назначения серии ТМ мощностью до 630 кВА, изготавливаются с обмотками из алюминиевого провода и переключением ответвлений без возбуждения [7]. Магнитопроводы изготавливаются из стали марки 3405 толщиной 0,3 мм.

Параметры трансформаторов серии ТМ помещены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трансформаторов серии ТМ

S, кВА	ℓ , мм	η , о.е.	i_0 , %
25	834	0,971	3,2
40	881	0,974	3,0
63	958	0,976	2,8
100	1122	0,977	2,6
160	1251	0,980	2,4
250	1343	0,980	2,3
400	1422	0,983	2,1
630	1687	0,984	2,0

Зависимость КПД от ОЛР (рис. 1) должна выражаться формулой (15). Аппроксимация с ее помощью позволяет получить абсолютную погрешность 0,001, коэффициент корреляции 0,976, коэффициент $n_\eta = 24,4$. Таким образом, можно утверждать, что относительная величина потерь обратно пропорциональна ОЛР.

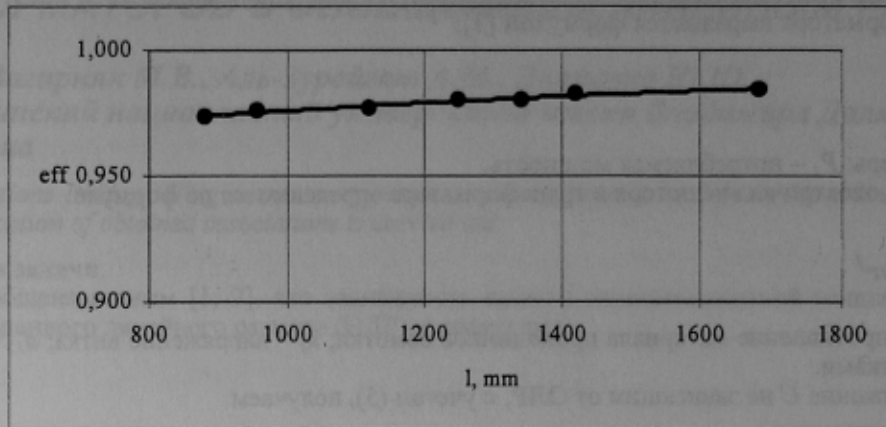


Рисунок 1 – Зависимость КПД η от ОЛР для трансформаторов серии ТМ

Аппроксимация зависимости тока холостого хода от ОЛР выражением

$$i_0 = i_{0c} + \frac{n_{i_0}}{l},$$

где i_{0c} – постоянная составляющая; n_{i_0} – коэффициент, позволяет получить коэффициент корреляции 0,976 и абсолютную погрешность 0,05 %, то есть половину последней значащей цифры, что говорит о совпадении теоретических (7) и экспериментальных зависимостей (рис. 2). Постоянная составляющая $i_{0c} = 0,87$, коэффициент $n_{i_0} = 1880$ мм.

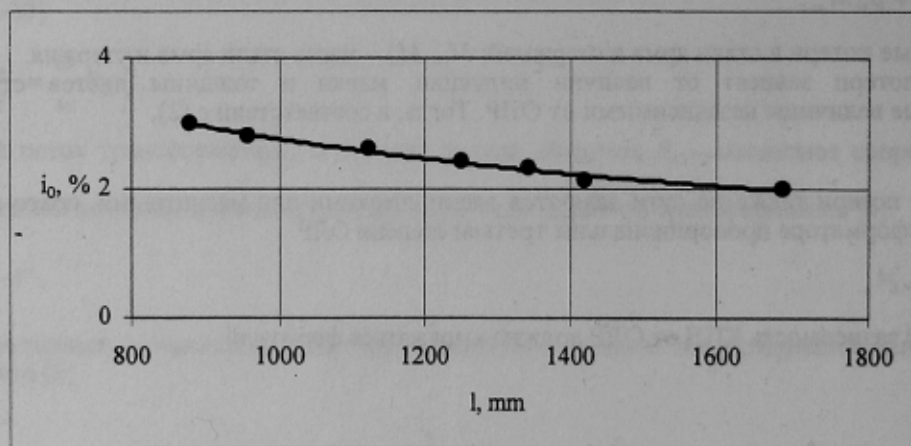


Рисунок 2 – Зависимость тока холостого хода i_0 от ОЛР для трансформаторов серии ТМ

Выводы.

Таким образом, относительная величина тока холостого хода обратно пропорциональна ОЛР.

Экспериментальные результаты подтверждают полученные теоретические зависимости тока холостого хода и КПД от ОЛР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 839 с.
2. Загірняк М.В. Електричні машини. – К.: ІСДО, 1993. – 200 с.
3. Сергеенков Б.Н. и др. Электрические машины: Трансформаторы: Учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.
4. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т. 2. Электромагнитное поле. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т. 2. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 416 с.
7. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 456 с.

Надано до редакції:

Рекомендовано до друку:

29.09.2003

д.т.н., проф. Дуднік М.З.