

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ПОТЕРЬ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ МЕТОДОМ ДВУХ ТЕМПЕРАТУР

Плотников С.М., Колмаков О.В.

Ключевые слова: ферромагнетик, гистерезис, вихревые токи, опыт холостого хода, удельное электрическое сопротивление.

Аннотация. Рассмотрен ваттметровый метод определения потерь на вихревые токи в ферромагнитном сердечнике трансформатора. Метод основан на известной зависимости вихретоковых потерь от удельного электрического сопротивления ферромагнетика и использует результаты двух опытов холостого хода, проведенных при разных температурах. Экспериментально подтверждена гипотеза о независимости гистерезисных потерь от температуры

DETERMINATION OF EDDY CURRENT LOSSES IN FERROMAGNETICS BY THE TWO-TEMPERATURE METHOD

Plotnikov S.M., Kolmakov O.V.

Keywords: ferromagnetic, hysteresis, eddy currents, no-load experiment, electrical resistivity.

Abstract. The wattmeter method for determining eddy current losses in a ferromagnetic transformer core is considered. The method is based on the known dependence of eddy current losses on the resistivity of the ferromagnetic and uses the results of two no-load experiments carried out at different temperatures. The hypothesis of independence of hysteresis losses from temperature is experimentally confirmed.

Снижение магнитных потерь в ферромагнетике, их которого выполнены магнитные системы электрических машин, связано с как можно более точным прогнозом двух составляющих: вихретоковой P_e и гистерезисной P_h , т.к. уменьшение одной составляющей часто приводит к росту другой. В частности, при увеличении размеров зерна ферромагнетика потери P_h снижаются, а P_e растут [1]. Та же тенденция наблюдается при увеличении толщины листа образца [2]. Это обстоятельство не позволяет добиться минимума общих потерь в ферромагнетике.

Потери на гистерезис и вихревые токи находят из известных выражений [3]

$$P_h = k_h \cdot B_m^\alpha \cdot f, \quad (1)$$

$$P_e = \frac{(\pi \cdot B_m \cdot f \cdot \delta)^2}{6\rho}, \quad (2)$$

где k_h – коэффициент, зависящий от материала сердечника; α – коэффициент Штейнмеца; B_m – максимальное значение плотности магнитного потока; f – частота перемагничивания; δ – толщина листов сердечника; ρ – удельное сопротивление стали сердечника.

Потери P_h и P_e нельзя непосредственно измерить, однако их сумму можно определить по показанию ваттметра в опыте холостого хода. Все параметры в (1) и (2), за исключением удельного сопротивления стали ρ , не зависят от температуры, на которую возможен нагрев образца, что позволяет

определить вихретоковую составляющую полных потерь на основании того, что удельное сопротивление ферромагнетика возрастает с увеличением температуры линейно, а гистерезисные потери не зависят от температуры.

Как правило, опыта холостого хода проводят в условиях, при которых нагрев образца, практически отсутствует, т.е. при температуре окружающей среды. Однако большую часть времени магнитные системы машин имеют установившуюся рабочую температуру, достигающую 95°C . Полные потери в ферромагнетике при температуре T_1

$$P_1 = P_h + P_{e1}, \quad (3)$$

при температуре T_2

$$P_2 = P_h + P_{e2}. \quad (4)$$

С учетом того, что мощность потерь на вихревые токи обратно пропорциональна температуре, соотношение между этими потерями имеет вид

$$P_{e1} = P_{e2} [1 + \alpha(T_2 - T_1)], \quad (5)$$

где P_{e1} , P_{e2} – мощность потерь на вихревые токи соответственно при температуре T_1 и T_2 ; α – температурный коэффициент сопротивления ферромагнетика.

Если значение α неизвестно, но известны значения удельных сопротивлений материала при различных температурах, то коэффициент α можно вычислить по формуле

$$\alpha = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1(T_2 - T_1)},$$

где ρ_1 , ρ_2 – удельные сопротивления ферромагнетика соответственно при температуре T_1 и T_2 .

После вычитания (4) из (3) получим

$$P_1 - P_2 = P_h + P_{e1} - P_h - P_{e2} = P_{e1} - P_{e2}. \quad (6)$$

При этом величина P_h исключена из уравнений. После преобразований получим

$$P_{e1} = \frac{(P_1 - P_2)[1 + \alpha(T_2 - T_1)]}{\alpha(T_2 - T_1)}, \quad (7)$$

$$P_{e2} = \frac{(P_1 - P_2)}{\alpha(T_2 - T_1)}, \quad (8)$$

где P_1 и P_2 – измеренные ваттметром мощности полных потерь соответственно при температурах T_1 и T_2 .

Таким образом, измерив полные потери P_1 при температуре T_1 , полные потери P_2 при температуре T_2 и зная коэффициент температурного сопротивления стали α , по формулам (7) и (8) можно вычислить мощность потерь на вихревые токи при данных температурах.

Экспериментальная проверка полученных теоретических положений осуществлялась на сухом однофазном трансформаторе ОСМ1-1,6М с магнитопроводом из ферромагнитного материала марки 3412 (температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0024 \text{ 1}^{\circ}\text{C}$). Температуру образца

определяли по значению сопротивления первичной обмотки, измеренному перед опытом R_1 , и непосредственно после окончания опыта R_2 , исходя из выражения

$$T_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} T_1.$$

При температуре образца $T_1 = 23^\circ\text{C}$ полные потери составили 20 Вт, что близко к паспортному значению потерь холостого хода. При установившейся температуре образца 95°C , время достижения которой определялось по [4], потери составили 18,8 Вт. Потери на вихревые токи при температуре 23°C , рассчитанные по (7), составили 8,8 Вт, а при температуре 95°C , рассчитанные по (8), – 7,5 Вт. Таки образом, вихретоковые потери в исследуемом материале при 23°C составили 44%, при 95°C – 40%. Потери на гистерезис при температуре T_1 составили $P_1 - P_{e1} = 20 - 8,8 = 11,2$ Вт, при температуре T_2 : $P_2 - P_{e2} = 18,8 - 7,5 = 11,3$ Вт, т.е. при изменении температуры на 72°C гистерезисные потери изменились на 0,89%, что не превышает погрешности экспериментов. Это подтверждает гипотезу того, что гистерезисные потери практически не зависят от температуры.

В отличие от двухчастотного способа определения потерь [5], рассмотренный метод двух температур позволяет определить составляющие потерь для любой температуры, в частности, для установившейся рабочей температуры ферромагнетика.

Список литературы

1. Плотников С.М. Оптимизация размеров зерна в электротехнической стали по критерию минимума магнитных потерь // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2020. – № 21. – С. 64-67. – doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-64-67
2. Плотников С.М. Методика определения оптимальной толщины листов магнитопроводов электрических машин ваттметровым методом // *Метрология*. 2021. №3. С. 35-47. doi.org/10.32446/0132-4713.2021-3-35-47
3. Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials // *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 621-630. <https://doi.org/10.1109/20.43994>
4. Патент 2743902 РФ, МПК H02H 5/04, H02H 6/00. Способ определения постоянной времени нагрева сухого трансформатора / Плотников С.М. – Оpubл. 01.03.2021, Бюл. №7.
5. Плотников С.М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // *Измерительная техника*. 2020. №11. С. 54-58. doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58

References

1. Plotnikov S.M. Optimization of grain sizes in electrical steel by criterion of minimum magnetic losses // *Journal of Advanced Research in Technical*

- Science. – 2020. – № 21. – P. 64-67. – doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-64-67
2. Plotnikov S.M. Method for determining of the optimal thickness of sheets of magnetic cores of electrical machines by the wattmeter method // Metrology. 2021. No. 3. P. 5-47. doi.org/10.32446/0132-4713.2021-3-35-47
 3. Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials // IEEE Transactions on Magnetics, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 621-630. <https://doi.org/10.1109/20.43994>
 4. Patent 2743902 RU, IPC H02H 5/04, H02H 6/00. Method of determination of heating time constant of dry transformer / Plotnikov S.M. – Publ. 01.03.2021, Bul. No. 7.
 5. Plotnikov S. M. Determination of eddy current losses and hysteresis losses in magnetic circuits of electrical machines // Measurement Techniques. 2020. No.11. P. 54-58. doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры СОД, smplonikov@rabler.ru	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of Department SOD, smplonikov@rabler.ru
Колмаков Олег Витальевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой СОД, kolmakov53@mail.ru	Kolmakov Oleg Vitalievich – candidate of technical sciences, associate professor, head of Department SOD, kolmakov53@mail.ru
Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия	Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

Received 15.10.2021