

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЯХ В СЕРДЕЧНИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Плотников С.М.

*Сибирский государственный университет имени М.Ф. Решетнева;
Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск,
Россия*

Ключевые слова: гистерезис, вихревые токи, опыт холостого хода, магнитная индукция, коэффициент Штейнмеца.

Аннотация. Рассмотрен ваттметровый метод определения показателя степени, в которой магнитная индукция входит в потери на гистерезис магнитопроводов электрических машин. Метод основан на измерении полных потерь в трех опытах холостого хода – двух на разных частотах перемагничивания и одного при пониженном напряжении – и расчете степени магнитной индукции. Для исследуемого трансформатора данный показатель составил 1,62.

DETERMINATION OF THE DEGREE OF MAGNETIC INDUCTION IN HYSTERESIS LOSSES IN THE CORES OF ELECTRICAL MACHINES

Plotnikov S.M.

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology;
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia*

Keywords: hysteresis, eddy currents, no-load experience, magnetic induction, Steinmetz coefficient.

Abstract. A wattmeter method for determining the degree to which magnetic induction is included in the hysteresis losses of magnetic circuits of electrical machines is considered. The method is based on measuring total losses in three no-load experiments – two at different frequencies and one at reduced voltage – and calculating the degree of magnetic induction. For the investigated transformer, this indicator was 1.62.

В настоящее время в магнитопроводах электродвигателей и трансформаторов теряется до 5% всей вырабатываемой электроэнергии. Снижение магнитных потерь в сердечниках, из которых выполнены магнитные системы электрических машин, связано с точным прогнозом двух составляющих потерь: вихретоковой P_v и гистерезисной P_r . Попытка уменьшить одну составляющую за счет изменения толщины листов [1, 2] или варьирования размеров зерна стали [3] часто приводит к росту другой составляющей. Разнонаправленность гистерезисной и вихретоковой составляющих потерь не позволяет добиться минимума общих потерь в сердечнике магнитопровода электрической машины.

Возможные меры, воздействующие на величину составляющих потерь, представлены в таблице 1.

Потери на гистерезис находят по формуле

$$P_r = k_r \cdot B_m^\alpha \cdot f, \quad (1)$$

где k_r – коэффициент, зависящий от материала сердечника; B_m – амплитудное значение магнитной индукции; f – частота перемагничивания; α – коэффициент Штейнмеца, зависящий от материала листов, их толщины, электропроводности и других факторов.

Табл. 1. Меры, воздействующие на величину составляющих потерь

Мера	P_r	P_v
Уменьшение толщины листа	↗	↘
Увеличение размера зерна	↘	↗
Увеличение содержания кремния	→	↘
Увеличение содержания углерода	↗	↘
Нанесение локальных поверхностных дефектов	-	↘
Термомагнитная обработка	↘	→
Создание растягивающего листы воздействия изоляционным покрытием	-	↘

Для большинства электротехнических сталей $n = 1,6$. Штейнмец получил данное значение эмпирически на основании наиболее лучшего соответствия модели и большого количества опытных данных. Для некоторых современных сталей этот показатель равен 3.

Потери на гистерезис P_r пропорциональны частоте, а потери на вихревые токи P_v – частоте в квадрате. Потери P_r и P_v нельзя непосредственно измерить, однако их сумму можно определить с помощью ваттметра в опыте холостого хода. На этом основании составлена система уравнений с двумя неизвестными P_r и P_v

$$P_r + P_v = P_1, \quad (1)$$

$$kP_r + k^2P_v = P_2, \quad (2)$$

где P_1 – показание ваттметра на частоте f_1 ; P_2 – показание ваттметра на частоте f_2 , k – отношение частот f_2/f_1 .

Совместное решение (1) и (2) дает выражения потерь

$$P_r = \frac{k^2P_1 - P_2}{k(k-1)}, \quad (3)$$

$$P_v = \frac{P_2 - kP_1}{k(k-1)}. \quad (4)$$

Потери на гистерезис пропорциональны индукции в степени α , а потери на вихревые токи P_v – индукции в квадрате [4]. Магнитная индукция в свою очередь, пропорциональна приложенному напряжению при условии постоянства частоты перемагничивания. С увеличением напряжения выше номинального значения $U_{1н}$ сердечник переходит в режим насыщения, в котором индукция практически не меняется. При незначительном снижении

напряжения (на 5...10%) индукция уменьшается в той же пропорции, т.е. зависимость индукции от напряжения можно считать линейной. При пониженном в m раз первичном напряжении потери на гистерезис уменьшаются в m^α раз, а потери на вихревые токи – в m^2 раз. Полные потери в стали на частоте f_1 равны

$$m^\alpha P_\Gamma + m^2 P_B = P_3, \quad (5)$$

где $m = U_{1п}/U_{1н}$; P_3 – полные потери (показания ваттметра) при пониженном напряжении.

Из выражения (5) находим коэффициент α

$$\alpha = \frac{\ln[(P_3 - m^2 P_B) / P_\Gamma]}{\ln m}. \quad (6)$$

Экспериментальное определение коэффициента α проводилось для однофазного трансформатора ОСМ1-1,6М мощностью 1600 ВА с паспортным значением потерь холостого хода $P_1 = 20$ Вт (для частоты 50 Гц). В опыте холостого хода, проведенном на частоте 60 Гц при номинальном напряжении $U_{1н} = 220$ В, ваттметр показал $P_2 = 25,9$ Вт. Коэффициент $k = f_2/f_1 = 60/50 = 1,2$. Потери на гистерезис определенные по формуле (3), составили 12,1 Вт, потери на вихревые токи, определенные по формуле (4), – 7,7 Вт. Во втором опыте холостого хода, проведенном на частоте 50 Гц при пониженном напряжении $U_{1п} = 198$ В, зафиксировано показание ваттметра $P_п = 16,6$ Вт. Коэффициент $m = U_{1п}/U_{1н} = 198/220 = 0,9$. Значение показателя степени α определялось из выражения (6)

$$\alpha = \frac{\ln[(16,6 - 0,9^2(20 - 12,1))/12,1]}{\ln 0,9} = 1,62.$$

Таким образом, для сердечника исследуемого трансформатора показатель степени α (коэффициент Штейнмеца) составил 1,62, что соответствует современным представлениям о гистерезисной составляющей потерь в стали. Данная методика определения коэффициента α , запатентованная в [5], может быть использована также для любой другой электрической машины.

Список литературы

1. Плотников С.М. Определение потерь в стали и оптимизация толщины листов магнитопровода трансформатора // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – №65(2). – С. 115-126. – doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-115-126.
2. Плотников С.М. Методика определения оптимальной толщины листов магнитопроводов электрических машин ваттметровым методом // Метрология. – 2021. – №.3 – С. 35-47. – https:// doi.org/10.32446/0132-4713.2021-3-35-47.
3. 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.

4. Плотников С.М., Колмаков О.В. Решение актуальных вопросов в теории трансформаторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 5-11. – DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-5-11.
5. Патент №2764780 РФ. Способ определения показателя магнитной индукции в потерях на гистерезис для стали сердечника трансформатора / Плотников С.М. – Заявка №2021102838 от 05.02.2021; опубл. 21.01.2022, Бюл. №3.

References

1. Plotnikov S.M. Determination of Steel Losses and Optimization of the Thickness of the Transformer Magnetic Conductor Sheets // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2022, no. 65(2), pp. 115-126. doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-115-126.
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, pp. 5-47. doi.org/10.32446/0132-4713.2021-3-35-47.
3. Plotnikov S.M. Optimization of grain sizes in electrical steel by criterion of minimum magnetic losses // Journal of Advanced Research in Technical Science. 20206, iss. 21, pp. 64-67. doi.org/10.26160/2474-5901-2020-21-64-67.
4. Plotnikov S.M., Kolmakov O.V. Solution of topical issues in the theory of transformers // News of universities. Electromechanics. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 5-11. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-5-11.
5. Patent No. 2764780 RU. Method for determining the magnetic induction index in hysteresis losses for the steel of the transformer core / S.M. Plotnikov. – Appl. No. 2021102838 from 05.02.2021; publ. 21.01.2022, Bul. No. 3.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor
smplotnikov@rambler.ru	

Received 22.06.2023