

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В МАГНИТОПРОВОДЕ ЗА СЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛАСТИН

Плотников С.М., Колмаков В.О.

Ключевые слова: трансформатор, магнитопровод, вихревые токи, гистерезис.

Аннотация. Показано, что толщина пластин магнитопровода трансформатора выбирается исходя из минимума потерь на вихревые токи, что не всегда соответствует минимуму потерь в магнитопроводе. Определено оптимальное значение толщины пластин магнитопровода, зависящее от коэффициентов функций удельных потерь на гистерезис и на вихревые токи.

MINIMIZATION OF LOSSES IN THE MAGNETIC CIRCUIT DUE TO OPTIMAL THICKNESS OF PLATES

Plotnikov S.M., Kolmakov V.O.

Keywords: transformer, magnetic circuit, eddy currents, hysteresis.

Abstract. It is shown that the thickness of the plates of the transformer magnetic circuit is selected based on their minimum eddy current loss, which does not always correspond to the minimum loss in the magnetic circuit. The optimal value of the thickness of the plates of the magnetic circuit is determined, depending on the coefficients of the specific loss functions for hysteresis and eddy currents.

Качество изготовления магнитопроводов оказывает огромное влияние на технико-экономические показатели трансформатора. Важнейшим параметром магнитопровода является толщина пластин (листов), из которых он набран. В известной литературе толщина пластин выбирается в зависимости от частоты, на которой работает трансформатор – чем выше частота, тем тоньше пластины. Подавляющее большинство силовых трансформаторов эксплуатируются только на одной стандартной частоте. Для этой частоты толщину пластин магнитопровода целесообразно выбирать на основании других критериев, важнейшим из которых является потери в магнитопроводе (потери холостого хода). Данные потери составляют доли процента от мощности трансформатора, однако, с учетом многократной трансформации энергии при ее передаче и распределении, они могут составлять до 5% мощности, вырабатываемой электростанциями.

В настоящее время электротехническая изотропная лента, согласно ТУ 14-1-4657-89, выпускается толщиной от 0,05 до 1,5 мм (14 позиций), а электротехнический лист, согласно ГОСТ 3836-83, толщиной от 0,1 до 3,9 мм (26 позиций). Несмотря на возможность изготовления пластин с большим разнообразием по толщине, на практике для магнитопроводов силовых трансформаторов используются в основном четыре размера: 0,2, 0,35, 0,5 и 1,0 мм. Данный параметр выбирается из условия минимума потерь на вихревые токи, что не всегда соответствует минимуму потерь в магнитопроводе.

С уменьшением толщины пластины δ сталь уплотняется, т.к. доводка до требуемой толщины производится на холодных листах, и потери на

гистерезис (на перемагничивание) увеличиваются. В общем случае зависимость потерь на гистерезис P_{Γ} от толщины пластин δ приближенно можно выразить в виде линейной функции

$$P_{\Gamma} = a - b\delta, \tag{1}$$

где a – коэффициент, определяющий начальные потери, Вт;

b – коэффициент, определяющий наклон линии, Вт/мм.

Потери на вихревые токи $P_{\text{В}}$ зависят от квадрата толщины пластин магнитопровода

$$P_{\text{В}} = c\delta^2, \tag{2}$$

где c – коэффициент параболической кривой, Вт/мм².

Зависимость суммарных потерь в магнитопроводе P_0 от толщины пластин, из которых он набран, запишем в виде квадратного уравнения

$$P_0 = P_{\Gamma} + P_{\text{В}} = a - b\delta + c\delta^2.$$

С уменьшением толщины δ потери на вихревые токи уменьшаются, однако растут потери на гистерезис и наоборот. Таким образом, относительно изменения δ величины P_{Γ} и $P_{\text{В}}$ являются разнонаправленными. Зависимости P_0 , $P_{\text{В}}$, $P_{\Gamma} = f(\delta)$ представлены на рисунке 1.

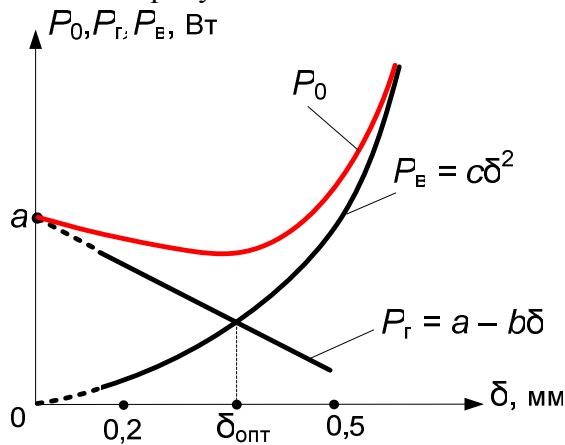


Рис. 1. Зависимости потерь в магнитопроводе от толщины пластин

Оптимальное значение толщины пластин $\delta_{\text{опт}}$, при которой суммарные потери в магнитопроводе минимальны, определим, взяв производную P_0 и приравняв ее нулю

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{d\delta} &= -b + 2c\delta, \\ \delta_{\text{опт}} &= \frac{b}{2c}. \end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, оптимум потерь определяется только двумя величинами – крутизной наклона линии $P_{\Gamma}(\delta)$ b и коэффициентом параболы $P_{\text{В}}(\delta)$ c . Формула (3) будет справедлива, если коэффициенты b и c выразить через удельные потери [Вт/кг·мм] и [Вт/кг·мм²].

Оценим данные параметры.

Исходя из полученного в [1] выражения удельных потери на вихревые токи, можно определить коэффициент c [Вт/кг·мм²]

$$c = 1,33 \cdot 10^6 \frac{B_m^2 \cdot f^2 \cdot k_f^2}{\gamma \cdot \rho}, \quad (4)$$

где B_m – амплитуда магнитной индукции, Тл; f – частота, Гц; δ – толщина пластин, мм; k_f – коэффициент формы кривой магнитной индукции; γ – плотность материала пластины, кг/м³; ρ – удельное электрическое сопротивление материала пластины, Ом·м.

С учетом того, что петля гистерезиса имеет форму прямоугольника, в [2] предложена приближенная формула удельных потерь на гистерезис [Вт/кг]

$$P_{\Gamma} = \frac{4B_m \cdot H_c \cdot f}{\gamma},$$

где H_c – коэрцитивная сила, А/м.

Удельные потери в магнитопроводе зависят от паспортной мощности трансформатора. В таблице 1 представлены удельные потери трансформаторов серии ТМ напряжением 10/0,4 кВ, рассчитанные для соотношения веса магнитопровода и веса обмоток равного 3,5 [3].

Табл. 1.

Номинальная мощность, кВА	Потери холостого хода, Вт	Масса трансформатора, кг	Масса магнитопровода, кг	Удельные потери в магнитопроводе, Вт/кг
25	110	260	202	0,544
63	220	400	311	0,707
100	305	525	408	0,747
160	410	705	548	0,748
400	830	1260	980	0,864
630	1500	1840	1431	0,815
1000	1700	2690	2092	0,813

Зная суммарные удельные потери P_0 (из табл. 1), потери на гистерезис P_{Γ} , потери на вихревые токи P_v и задавшись наклоном зависимости $P_{\Gamma}(\delta)$, можно найти коэффициенты b и c уравнений (1) и (2) и по формуле (3) определить значение толщины δ пластин магнитопровода, при которой потери в нем будут минимальны. Расчеты показывают, что данное значение для многих номиналов мощностей трансформаторов не соответствует реальному значению. Это говорит о том, что возможности снижения потерь холостого хода и, следовательно, повышения КПД трансформаторов не исчерпаны.

Список литературы

1. Тимофеев И.А. Удельные потери в ферромагнетике // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6 (часть 1). – С. 136-142.

2. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 239 с.
3. Дымков А.М. Расчет и конструирование трансформаторов. – М.: Высш. школа, 1971. – 264 с.

References

1. Timofeev I.A. Specific losses in ferromagnet // Modern problems of science and education. – 2007. – No. 6 (part 1) – P. 136-142.
2. Druzhinin V.V. Magnetic properties of electrical steel. – М.: Energy, 1974. – 239 p.
3. Dymkov A.M. Calculation and design of transformers. – М.: Higher school, 1971. – 264 p.

<p>Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Автоматизации технологических процессов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия, smplochnikov@rabler.ru</p>	<p>Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of Department automation of technological processes, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia, smplochnikov@rabler.ru</p>
<p>Колмаков Виталий Олегович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Управления персоналом, Красноярский институт железнодорожного транспорта, г. Красноярск, Россия, kolmakov53@mail.ru</p>	<p>Kolmakov Vitaliy Oleovich – candidate of technical sciences, associate professor, Head of the Department of human resources, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia, kolmakov53@mail.ru</p>

Received 31.03.2020