

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ СЕРДЕЧНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Світо І. Л., Тихоновецький С. А.
Кафедра теоретических основ электротехники,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь
E-mail: svito@bsuir.by, tsa1954@tut.by

В работе предлагается нетрадиционный физический подход к расчету габаритной мощности сердечника через амплитудное значение синусоидальной мощности в нем, а также физический подход дополняется традиционным конструктивным.

ВВЕДЕНИЕ

Габаритная мощность P_{core} – это условное понятие, применяющееся при выборе сердечника трансформатора.

В данной статье, во первых, предлагается нетрадиционный физический подход к расчету габаритной мощности сердечника через амплитудное значение синусоидальной мощности в нем. Во вторых, физический подход дополняется традиционным конструктивным. Различные подходы увязываются между собой, что дает инженеру понимание того, что и почему он делает при расчете сердечника. Знание физики процессов позволяет применять формулы осмысленно, что значительно снижает вероятность ошибки.

I. ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Как известно из курса электротехники [1], энергия магнитного поля в единице объема сердечника определяется следующей формулой:

$$W_{\mu_0} = \frac{HB}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}. \quad (1)$$

Здесь $B = \mu_a H$ – действующее значение индукции магнитного поля в сердечнике, H – действующее значение напряженности магнитного поля, $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника с относительной магнитной проницаемостью μ_r , наконец, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Henry/m}$ – магнитная проницаемость вакуума.

Рассмотрим сердечник кольцевой формы с диаметрами D и d . Его параметры: S_c – площадь сечения сердечника, $S_o = \pi d^2/4$ – площадь окна сердечника, $l_m = \pi(D+d)/2$ – средняя длина силовой линии, $V = \pi h(D^2-d^2)/4$ – объем сердечника, B_m – индукция насыщения ферромагнитного материала.

На сердечник намотана катушка с числом витков w , по которой протекает синусоидальный ток с круговой частотой $\omega \text{ rad/sec}$: $i(t) = I_m \sin \omega t$. Тогда напряженность магнитного поля в сердечнике выражается формулой $H(t) = H_m \sin \omega t$. Ее амплитуда H_m может быть найдена согласно закону полного тока:

$$H_m l_m = I_m w \rightarrow H_m = I_m w / l_m. \quad (2)$$

Подставим данную напряженность в (1). Получим, что энергия магнитного поля в единице объема пульсирует по закону синуса в квадрате:

$$W_{\mu_0} = \frac{\mu_a H_m^2}{2} \sin^2 \omega t. \quad (3)$$

Мгновенную мощность в единице объема определим через производную от энергии:

$$p(t) = \frac{dW_{\mu_0}}{dt} = \frac{1}{2} \mu_a \omega H_m^2 \sin 2\omega t. \quad (4)$$

Тогда мгновенная мощность магнитного поля в сердечнике объемом V определится выражением

$$p_m(t) = P_m \sin 2\omega t, \quad (5)$$

где амплитудное значение мощности магнитного поля

$$P_m = \frac{1}{2} \mu_a \omega H_m^2 V. \quad (6)$$

Объем кольцевого сердечника выражается формулой

$$V = S_c l_m, \quad (7)$$

где S_c – это площадь сечения сердечника.

Предположим, что амплитуда тока такова, что индукция в сердечнике изменяется между значениями насыщения, то есть от $-B_m$ до $+B_m$ и обратно. Тогда максимально возможное значение мощности в данном сердечнике определится так:

$$P_{max} = \frac{B_m^2}{2\mu_a} \omega V. \quad (8)$$

Выбранная из числа стандартных габаритная мощность P_{core} сердечника должна быть больше, чем P_{max} .

Объем сердечника и число витков на один вольт

Оцениваются следующими формулами:

$$V_{min} = \frac{2\mu_0 \mu_r P_{max} (VA)}{B_m^2 (\text{Tesla}) \omega (\text{sec}^{-1})}. \quad (9)$$

$$w_0 = (4.44 \Phi_m f)^{-1} = (4.44 B_m S_c f)^{-1}, \quad (10)$$

II. Конструктивный подход

В инженерных расчетах габаритную мощность P_{core} традиционно определяют как полу-сумму полных мощностей в первичной и вторичной обмотках.

$$P_{core} = \frac{1}{2}(U_1 I_1 + U_2 I_2) = \frac{1}{2}j(s_1 U_1 + s_2 U_2). \quad (11)$$

Здесь j – это допустимая плотность тока, одинаковая в обеих обмотках. В малых трансформаторах мощностью до 1 кВт она выбирается в пределах $(3 - 5)A/mm^2$. Соответственно, s_1, s_2 – это сечения проводов первичной и вторичной обмотки.

Выбранный из числа типовых сердечник должен обладать габаритной мощностью большей, чем P_{core} .

Согласно формуле трансформаторной ЭДС

$$\begin{aligned} U_1 &= 4.44B_m S_c f w_1, \\ U_2 &= 4.44B_m S_c f w_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получим:

$$\begin{aligned} P_{core} &= \frac{1}{2}j(4.44B_m S_c f)(s_1 w_1 + s_2 w_2) = \\ &= 2.22jB_m S_c f(s_1 w_1 + s_2 w_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Введем понятие площади меди – это суммарное сечение проводов всех витков первичной и вторичной обмотки:

$$S_m = s_1 w_1 + s_2 w_2. \quad (14)$$

Тогда (13) перепишется следующим образом:

$$P_{core} = 2.22jB_m S_c f S_m. \quad (15)$$

Максимальная площадь меди S_m ограничена площадью окна S_o . Эта связь выражается коэффициентом заполнения:

$$\sigma = S_m / S_o < 1. \quad (16)$$

Для многослойной обмотки $\sigma = 0.15 - 0.4$, то есть, площадь меди всегда меньше площади окна.

Подставляя (16) в (15), окончательно получим:

$$P_{core} = 2.22jB_m S_c S_o f \sigma. \quad (17)$$

Данный подход не дает возможности получить объем сердечника. Здесь только можно найти произведение сечения сердечника S_c и площади окна S_o :

$$S_c S_o = \frac{P_{core}}{2.22jB_m f \sigma}. \quad (18)$$

В инженерных расчетах принимают $S_c = S_o$, тогда сечение сердечника

$$S_c = \sqrt{\frac{P_{core}}{2.22jB_m f \sigma}}. \quad (19)$$

III. Вывод

При сравнении различных подходов можно видеть, что P_{max} в физическом подходе меньше, чем P_{core} , полученная при конструктивном подходе. Это естественно, поскольку это разные мощности: амплитуда мощности синусоидального магнитного поля в сердечнике и некая полная мощность P_{core} , по сути дела, абстрактная величина, обеспечивающая передачу мощности, заведомо большей, чем амплитудная P_{max} .

IV. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи. Учебник для студентов вузов, 11-е издание, переработанное и дополненное. Учебное издание. Москва : Гардарики, 2007.