

## МЕТОД БАЗИСНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ ПОДМАГНИЧИВАЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В. П. ОБРУСНИК, В. Г. КИСЕЛЕВ, Г. А. ХАЙДУРОВА

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Предлагается методика расчета геометрии, апробированная при проектировании многих конструкций обычных трансформаторов, магнитных усилителей и трансформаторов с подмагничиванием. В принципе она пригодна для расчета и других ферромагнитных устройств (ФУ), например, преобразователей частоты, числа фаз и т. д.. Известные методы, давшие практически исчерпывающие ответы по вопросам геометрии известных ФУ [2, 3 и др.], оказываются громоздкими и порой мало приемлемыми при появлении новых конструктивных вариантов ФУ того или иного типа. В частности, трудности возникают при исследовании

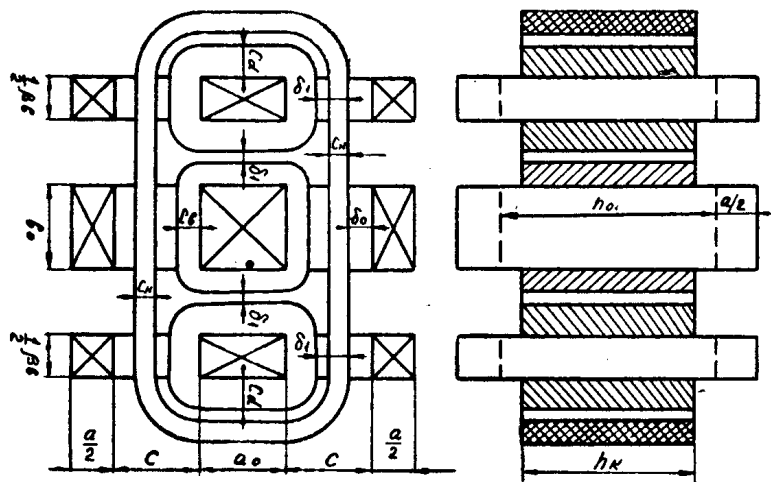


Рис. 1

геометрии трансформаторов с подмагничиванием, большое разнообразие конструктивных вариантов которых (несколько десятков) потребует при использовании вариационных методов большого объема вычислительных работ и превращает задачу анализа и синтеза по результатам расчетов в серьезную проблему.

Все размеры ТРПШ авторами предлагается выражать с помощью постоянных коэффициентов через размеры основного магнитопровода  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$  (рис. 1) и базисную толщину катушек  $C_k$ , а затем связывать

с сечением основного магнитопровода  $S_o$  через переменные коэффициенты  $K_c$ ,  $K_h$ ,  $K_b$  и  $K_s$  [1]:

$$\left. \begin{aligned} a_{ш} \cdot b_{ш} &= \beta \cdot b_o \cdot a_o, \quad a_{ш} = K_1 a_o, \quad \sigma_{ш} = K_2 b_o, \quad h_{ш} = K_3 h_o \\ C_k &= \frac{C_H}{K_4} = \frac{C_b}{K_5} = \frac{C_d}{K_6} = \frac{\delta}{K_7} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a_o &= \frac{\sqrt{S_o}}{K_b}, \quad b_o = K_b \cdot \sqrt{S_o}, \quad \text{где } K_b = \sqrt{\frac{b_o}{a_o}}, \quad h_o = K_h \sqrt{S_o} \\ C_k &= K_c \sqrt{S_o}, \quad K_s = \frac{h_o \cdot C_k}{S_o} = K_c \cdot K_h, \quad S_{ш} = \beta S_o \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь значения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_7$  устанавливаются в зависимости от конструктивных особенностей ТРПШ. Величины коэффициентов  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  находятся из соотношений между ампервитками отдельных обмоток и соотношений плотностей тока в них, а также с учетом электрической схемы соединения обмоток. Рекомендации по определению перечисленных коэффициентов хорошо известны [1, 2, 3].

Выражая обычным образом объемы и поверхности охлаждения сердечников и катушек с помощью линейных размеров и пользуясь соотношениями (1), (2), можно получить уравнения вида

$$V_k = \sqrt{S_o^3} \cdot K_c \cdot K_h A \left( \frac{m}{K_b} + nK_b + qK_c \right), \quad (3)$$

$$\Pi_k = S_o \cdot A (K_h + K_c) 2\varphi_{пк} \cdot \left( \frac{m}{K_b} + nK_b + qK_c \right), \quad (4)$$

$$V_c = \sqrt{S_o^3} \cdot B \left( \frac{m'}{K_b} + n'K_b + q'K_c + pK_h \right), \quad (5)$$

$$\Pi_c = S_o' 2\varphi_{пс} B \left( \frac{m'}{K_b} + n'K_b + q'K_c + pK_h \right). \quad (6)$$

Здесь  $S_o$  — базисное сечение магнитопровода

$$S_o = D_o^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{j \cdot B_m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{K_c \cdot K_h}} = D_o^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{j \cdot B_m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{K_s}}, \quad (7)$$

где

$$D_o = \sqrt[4]{\frac{P_n \cdot K_p}{m \cdot 4 \cdot K_f \cdot K_{зс} \cdot K_{зк} \cdot n_k}}, \quad (8)$$

$$K_p = \frac{1}{\cos \varphi_n \cdot \eta_n};$$

$A$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $m'$ ,  $n$ ,  $n'$ ,  $q$ ,  $q'$ ,  $p$  — постоянные коэффициенты, вполне определенные для данной конструкции,

$\varphi_{пк}$ ,  $\varphi_{пс}$  — коэффициенты, исключаяющие площади поверхностей катушек и сердечников, не участвующие в охлаждении,

$P_n$  — номинальная мощность нагрузки,

$\eta_n$ ,  $\cos \varphi_n$  — номинальные значения к. п. д. и коэффициента мощности нагрузки,

$K_{зс}$ ,  $K_{зк}$  — коэффициент заполнения сердечников и катушек,

$n_k$  — число катушек первичной обмотки,

$j$  — плотность тока в базисной обмотке,

$B_m$  — максимальная величина магнитной индукции в главном сердечнике,

$m, f, \kappa_f$  — число фаз, частота и коэффициент формы сетевого напряжения.

$$\Theta = \frac{K_{эк} V_k + K_{эс} V_c}{P_H} = \frac{K_{эс} (\alpha V_k + V_c)}{P_H}, \quad (9)$$

$$j = \sqrt{\frac{\sigma_k \cdot \Delta \tau_k \cdot \Pi_k}{\rho_k \cdot K_{эк} \cdot V_k}}, \quad B = \sqrt{\frac{\sigma_c \cdot \Delta \tau_c \cdot \Pi_c}{\gamma_c \cdot K_{эс} \cdot \rho_c \cdot V_c}},$$

Решая (3÷7) совместно с известными в [2, 3] выражениями, получим выражения удельно-экономических показателей ФУ для различных условий их проектирования, содержащие весьма простые формулы коэффициентов геометрии, что не удается при других базисных величинах.

Ниже приводится одна из формул коэффициента геометрии, определяющая соотношения размеров ТРПШ для расчетов по известным условиям «независимой геометрии».

$$K_r = \alpha A \cdot \sqrt[4]{K_s} \cdot \left( \frac{m}{K_b} + n K_b + q K_c \right) + \frac{B}{\sqrt[4]{K_s^3}} \left( \frac{m'}{K_b} + n' K_b + q' K_c + \rho K_h \right). \quad (10)$$

Как видно, выражение (10) позволяет легко определить оптимальные значения  $K_s, K_c, K_h, K_b$  для минимума  $K_r$  нахождением частных производных по этим величинам:

$$K_c = \sqrt{\frac{p \cdot K_s}{a q K_s + q'}}, \quad K_h = \sqrt{\frac{(a q K_s + q') \frac{K_s'}{\rho}}{\rho}}, \quad (11)$$

$$K_s^3 \cdot a_3 + K_s^2 a_2 + K_s a_1 + a_0 = 0, \quad K_b = \sqrt{\frac{a m K_s + m'}{a n K_s + n'}},$$

где  $a_3, a_2, a_1, a_0, a$  — постоянные численные коэффициенты, выраженные через  $A, B, m, m', p \dots$  и т. д.

Минимум удельно-экономических показателей всех ФУ, в том числе и ТРПШ, имеет весьма обширную область. Поэтому определить оптимальные значения  $K_c, K_h$  и  $K_b$  по (11) и подобным формулам лучше всего в сочетании с построением кривых  $K_r = f(K_s)$ , откуда можно найти целую область  $K_{s,оп}$ . Это дает большую свободу при проектировании ТРПШ с учетом требований конструктивности и технологичности. Например, подставляя  $K_b, K_c, K_h$  из (11) в (10), получим

$$K_r^* = \frac{2B}{\sqrt[4]{K_s^3}} \left[ \sqrt{(a m K_s + m')(a n K_s + n')} + \sqrt{\rho K_s (a q K_s' + q')} \right]. \quad (12)$$

Кривые  $K_r = f(K_s)$  по выражению (12) для броневых ТРПШ (рис. 1) показаны на рис. 2. Здесь значения  $K_{s,оп}$ , подсчитанные по (11), отмечены точками. Кривые при  $\alpha = 1$  соответствуют условию минимума объема, при  $\alpha < 1$  — минимуму стоимости, при  $\alpha > 1$  — минимуму веса.

В работе [4] приводятся выражения коэффициентов геометрии для всех типовых случаев проектирования ФУ и на их основе нетрудно провести анализ оптимальных геометрических соотношений ТРПШ любой конструкции.

В кратком изложении методика расчета геометрии ТРПШ будет заключаться в следующем:

1. На основании заданных условий проектирования определяются величины  $\beta$ ,  $\alpha$  и выбирается конструкция ТРПШ.

2. Устанавливаются значения коэффициентов  $K_1 \div K_7$ , составляются выражения для объема катушек и сердечников; на их основе устанавливаются численные значения коэффициентов  $A, B, m, m', n, n', q, q', p$ .

3. По выражению, соответствующему выбранному условию экономического показателя, строится график зависимости  $K_r = f(K_s)$ .

4. По кривой  $K_r = f(K_s)$  выбирается зона значений  $K_{s\text{оп}}$  в которой функция  $K_r$  минимальна.

5. Для выбранного значения  $K_{s\text{оп}}$  подсчитываются значения безразмерных коэффициентов  $K_b, K_h, K_c$ . Величины этих коэффициентов можно изменять в зоне оптимума  $K$  так, чтобы формы аппарата получились конструктивными и технологичными.

После определения значений безразмерных коэффициентов проектировщик находит величины  $V_m$  и  $j$ , по (9, 10) рассчитывает базисное сечение  $S_0$  и по (1) и (2) определяет все размеры ФУ.

Имеющийся опыт расчета подмагничиваемых трансформаторов и ряда других ФУ по предлагаемой методике показал, что она легко осваивается, позволяет наглядно и просто проводить анализ и синтез геометрии ферромагнитных устройств и не требует больших затрат времени на вычисления.

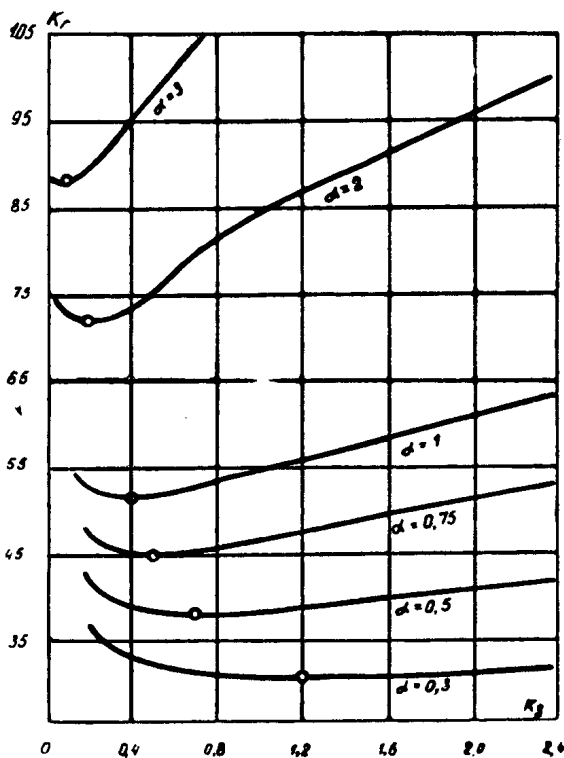


Рис. 2

маторов и ряда других ФУ по предлагаемой методике показал, что она легко осваивается, позволяет наглядно и просто проводить анализ и синтез геометрии ферромагнитных устройств и не требует больших затрат времени на вычисления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Обрусник. Упрощенный метод расчета оптимальной геометрии трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов. Известия ТПИ, т. 132, изд-во ТГУ, Томск, 1965.
2. Р. Х. Бальян. Трансформаторы малой мощности. Судпромгиз, Л., 1961.
3. И. И. Белопольский, Л. Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М., Госэнергоиздат, 1963.
4. В. П. Обрусник. Теория оптимальной геометрии ферромагнитных устройств. Тезисы НИИ АЭМ при ТПИ, Томск, 1972.