

## РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ И ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ТРПШ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В. П. ОБРУСНИК, Э. Г. ЗАВАЦКИЙ, В. Г. КИСЕЛЕВ

(Представлена научно-техническим семинаром отдела  
статических преобразователей НИИ АЭМ при ТПИ)

В промышленности существует целый ряд автоматизированных установок, где требуется не только регулирование напряжения на нагрузке, но и возникает необходимость его согласования и гальванической развязки по отношению к напряжению сети. К таким установкам относятся различного рода термические и плавильные печи, ванны нагрева, закалки или гальванообработки и др. С точки зрения надежности, простоты и технико-экономических показателей здесь наиболее приемлемыми оказываются системы, где силовым регулирующим элементом является трансформатор, регулируемый подмагничиванием магнитного шунта (ТРПШ). О достоинствах этих аппаратов достаточно сказано в технической литературе [1, 2, 3 и др.].

Теория расчета ТРПШ хорошо изложена в [2]. Однако при разработке регуляторов большой мощности с низковольтным выходом в расчете их геометрии и параметров появляется ряд особенностей, связанных со спецификой конструктивного выполнения вторичной обмотки.

Ниже излагаются теоретические разработки, позволяющие проектировать такие устройства с минимальным весом или габаритами, и даются некоторые практические рекомендации по их конструктивному выполнению.

Вторичную обмотку низковольтных трансформаторов, регулируемых подмагничиванием, как правило, целесообразно делать наружной и охватывающей магнитный шунт. Это улучшает условия ее охлаждения и упрощает конструкцию аппарата. Выполняется она обычно в один, реже в два слоя из медной или алюминиевой шины, или литой из этих же материалов. Подключение цепей нагрузки во избежание больших потерь энергии в токоведущих цепях производится также шинами большого сечения, причем контактные соединения часто выполняются с водяным охлаждением.

Для определения оптимальных параметров ТРПШ и его конструктивных размеров воспользуемся методикой, изложенной в [3]. В этом случае все размеры ТРПШ выражаем с помощью постоянных коэффициентов через размеры основного магнитопровода  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$  и базисную толщину катушки  $C_K$ , а последние связываем с сечением основного магнитопровода  $S_0$  через переменные коэффициенты  $K_c$ ,  $K_h$  и  $K_s$ , где

$$K_s = \frac{b_0}{a_0}; a_0 = \sqrt{\frac{S_0}{K_s}}; b_0 = \sqrt{S_0 \cdot K_s}; K_h = \frac{h_0}{S_0}; K_c = \frac{C_K}{\sqrt{S_0}} \quad (1)$$

Выражения для определения площади сечения главного магнитопровода  $S_0$  имеют вид

$$S_0 = D \sqrt{\frac{P_{2\phi}}{n_k \cdot K_c \cdot K_h}}, \quad (2)$$

где

$$D = \frac{1}{\sqrt{4,44 \cdot f \cdot B_{mo} \cdot K_{3c} \cdot K_{3k}}},$$

- $P_{2\phi} = U_2 \cdot I_{2ном}$  — мощность одной фазы трансформатора;  
 $B_{mo}$  — максимальная индукция основного магнитопровода;  
 $I$  — усредненная плотность тока в обмотках;  
 $K_{3k}, K_{3c}$  — усредненные коэффициенты заполнения катушек и сердечников магнитопроводов активными материалами;  
 $n_k$  — число катушек вторичной обмотки трансформатора;  
 $a_0, b_0, h_0, S_0$  — размеры и сечение основного магнитопровода;  
 $C_k$  — базисная толщина катушек.

Подставив  $S_0$  из (2) в выражение

$$W_2 = \frac{U_{2max}}{4,44 \cdot f \cdot B_{mo} \cdot S_c \cdot K_{3c}}, \quad (3)$$

получим

$$W_2 = \frac{U_{2max}}{4,44 \cdot f \cdot B_{mo} \cdot K_{3k} \cdot D \sqrt{\frac{U_{2max} \cdot I_2}{n_k \cdot K_c \cdot K_h}}}. \quad (4)$$

Заменив  $K_c \cdot K_h = L$  и подставив в (4) значение  $D$ , после преобразований получим

$$W_2 = D_w \sqrt{\frac{j U_2 \cdot L}{I_2}}, \quad (5)$$

где

$$D_w = \sqrt{\frac{n_k \cdot K_{3k}}{4,44 \cdot f \cdot B_{mo} \cdot K_{3c}}}.$$

Для такого типа ферромагнитных устройств величина максимальной индукции определяется в пределах линейного участка кривой намагничивания. Коэффициенты заполнения стали и катушек берутся согласно практике трансформаторостроения. Следовательно, в (5) количество витков вторичной обмотки будет зависеть от величины плотности тока, напряжения и тока нагрузки и коэффициента  $L$ , связанного с геометрическими размерами аппарата. Напряжение и ток обычно заданы, а плотность тока можно определить из выражения

$$j = \sqrt[7]{\frac{M_j^4 \cdot n_k \cdot L}{D_j^2 \cdot P_{2\phi} \cdot K_c^4}}, \quad (6)$$

где

$$M_j = \frac{\alpha_k \cdot \Delta\tau_k \cdot 10^6}{\rho_k \cdot K_{3k}}; \quad D_j = \frac{1}{\sqrt{4,44 \cdot f \cdot B_{mo} \cdot K_{3k} \cdot K_{3c}}},$$

- $\alpha_k$  — удельный коэффициент теплоотдачи катушек;  
 $\rho_k$  — удельное сопротивление материала катушек;  
 $\Delta\tau_k$  — установившаяся допустимая температура перегрева катушек.

Для выбора значения  $L_{\text{опт}}$ , при котором ТРПШ будет иметь наименьший вес, необходимо построить зависимость суммарного безразмерного объема аппарата от  $L$ , в соответствии с [4]. По кривой  $V_{\Sigma} = f(i)$ , имеющей четко выраженный минимум, определяется область  $L_{\text{опт}}$ , в которой изменение веса аппарата при изменении  $L$  находится в разумных пределах. При этом выражение для суммарного безразмерного объема ферромагнитного устройства в функции от  $L$  имеет вид [4]:

$$V_{\Sigma} = \frac{1,4 \cdot (a_1 + pz) \cdot B}{\sqrt[7]{\left[ \frac{2z(a_1 + pz)}{5(a_2z + a_3L)} \right]^2 (n_K^2 \cdot z \cdot L)^3}}, \quad (7)$$

а кривые  $V_{\Sigma} = f(L)$ , например, для конструкции, изображенной на рис. 1, при различных значениях  $z = \frac{h_0}{a_0}$  имеют вид, показанный на рис. 2.

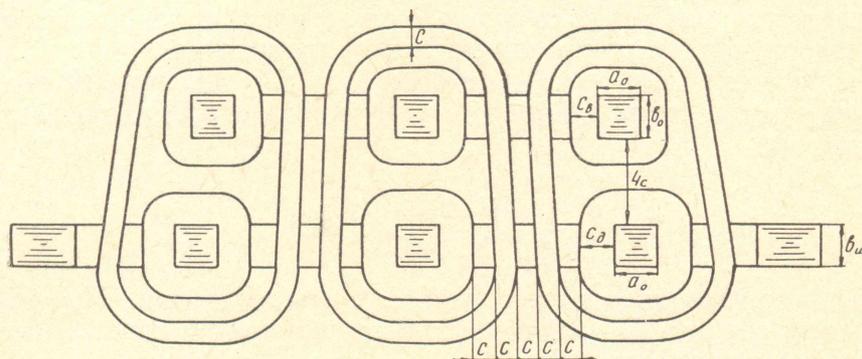


Рис. 1

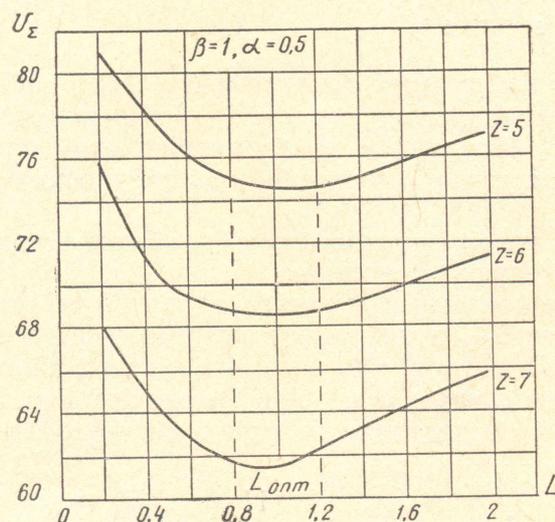


Рис. 2

Определив значение  $L_{\text{опт}}$ , находим коэффициент

$$K_c = \frac{L_{\text{опт}}}{z} \sqrt[7]{\frac{2z(a_1 + pz)}{5(a_2z + a_3L)}}, \quad (7)$$

где

$$a_1 = a \cdot m \cdot L + m', \quad a_2 = a \cdot n \cdot L + n', \quad a_3 = aqL + q',$$

$p$  — постоянный коэффициент, зависящий от выбранной конструкции аппарата.

Зная  $L_{\text{опт}}$  и  $K_c$  и задавшись величиной перегрева катушек аппарата, а также взяв в соответствии с практикой трансформаторостроения величину удельного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$ , можно определить из (6) усредненную плотность тока в обмотках.

В этом случае в выражении (5) все величины известны и можно найти оптимальное количество витков вторичной обмотки трансформатора. Следует отметить, что при определении  $W_2$  из (5) возможно получение дробного результата. В этом случае рекомендуется округлить значение  $W_2$  до ближайшего целого, соответствующего области  $L_{\text{опт}}$ . Из выражения (3) определяется  $S_0$  и находятся все размеры трансформатора по (1).

В практике проектирования ферромагнитных устройств, кроме рассмотренного выше общего случая, могут встретиться и частные, а именно:

- а) задано количество витков вторичной обмотки,
- б) задана плотность тока  $j$  в обмотках,
- в) известно количество витков  $W_2$  и плотность тока  $j$  в обмотках.

В этих случаях расчеты значительно упрощаются.

Если известно количество витков вторичной обмотки  $W_2$  трансформатора, то сечение стали главного магнитопровода  $S_0$  можно определить из выражения:

$$S_0 = \frac{U_2 \max}{4,44 f \cdot B_{\text{мо}} \cdot W_2 \cdot K_{\text{зс}}} \quad (9)$$

Описав конструкцию по методике [3], строим кривые  $V_2 = f(L)$  и по ним находим область  $L_{\text{опт}}$ . Это позволяет определить переменные коэффициенты геометрии аппарата

$$K_s = \frac{2z(a_1 + pz)}{5(a_2 z + a_3 L)}, K_h = \frac{z}{\sqrt{K_{s'}}}, K_c = \frac{L \sqrt{K_{s'}}}{z} \quad (10)$$

при условии, что  $z$  выбирается одновременно с  $L$ . Наиболее технологичными получаются конструкции при  $z = 5-8$ . По полученным коэффициентам  $k_s, k_h, k_c$  и  $S_0$  определяем все геометрические размеры трансформатора. Для выбора сечения меди обмоток плотность тока находится по (6).

В том случае, когда плотность тока в обмотках аппарата задана, расчет ведется в следующем порядке.

Так же, как и в предыдущем случае, строится зависимость  $V_2 = f(L)$ , выбирается  $L$  в зоне  $L_{\text{опт}}$  и находится сечение стали основного магнитопровода по (2), где  $K_c \cdot K_h = L$  уже выбрано и затем находится  $W_2$  из (3). Как и в предыдущем случае, задавшись величиной перегрева  $\Delta t$  и удельным коэффициентом теплоотдачи катушек  $\alpha_k$ , находим коэффициенты

$$K_c = \sqrt[4]{\frac{M_j^4 \cdot n_k \cdot L}{D_j^2 \cdot P_{2\phi} \cdot j^4}}, \quad K_s = \left(\frac{z}{K_h}\right)^2, \quad (11)$$

где  $z = 5 \div 7$ .

Зная коэффициенты  $K_c, K_h, K_s$ , по (1) можно определить все геометрические размеры аппарата.

Если заданы витки вторичной обмотки трансформатора и плотность тока  $j$ , то сечение главного магнитопровода находится из (3), а из (2) находится значение  $L$ . Как и в предыдущем случае, по (11) определяется величина  $K_c$  и все размеры аппарата.

Геометрические размеры шунта определяются, как правило, в соответствии с равенствами

$$a_{\text{ш}} = a_0, b_{\text{ш}} = \beta b_0; h_{\text{ш}} = h_0,$$

где значение  $\beta = \frac{S_{ш}}{S_0}$  зависит от глубины регулирования, необходимого минимального тока короткого замыкания и других конкретных условий.

Таким образом, предлагаемая методика расчета позволяет относительно просто рассчитать геометрические размеры трансформатора, регулируемого подмагничиванием магнитного шунта на оптимум веса или габаритов. Несмотря на свою простоту, она основывается на относительно строгих математических зависимостях, описывающих электромагнитный и тепловой режимы аппарата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Обрусник, Э. Г. Завацкий. Перспективы применения мощных подмагничиваемых регуляторов в термических установках. Труды VI конференции по вопросам автоматизации производства, т. 2, Томск, 1969.
  2. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием. «Энергия», 1965.
  3. В. П. Обрусник. Упрощенный метод расчета оптимальной геометрии трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов. «Известия ТПИ», т. 132, Томск, 1965.
  4. В. П. Обрусник, В. Г. Киселев, З. Н. Соболева. Анализ конструктивных вариантов однофазных ТРПШ и возможностей их применения в автоматических установках. «Известия ТПИ», т. 243, Томск, 1971.
-