

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШУНТОВ ТРПШ, ОПТИМАЛЬНЫХ ДЛЯ ЗАДАННОГО РЕЖИМА ЕГО РАБОТЫ

В. П. ОБРУСНИК

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Общая постановка задачи

Известные в литературе полуэмпирические формулы расчета сечений шунтов трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунта (ТРПШ) [1, 2, 3, 4], являются удовлетворительными при конструировании этих аппаратов, но они не могут служить теоретически обоснованным критерием в определении параметров шунтов, оптимальных для ТРПШ при его работе в конкретно заданных системах регулирования.

Шунты будут оптимальными, когда они, с одной стороны, надежно обеспечивают требуемую регулировочную характеристику ТРПШ, а с другой стороны, не приводят к излишним затратам активных материалов, излишним увеличениям габаритов, веса, активных и реактивных потерь и других показателей регулятора. Величиной, связывающей эти два требования, может служить реактивное сопротивление вторичного (магнитного) рассеяния ТРПШ.

В замкнутой системе регулирования ТРПШ работает на регулировочной характеристике $U_2 = f(I_2)$. Начало ее будет соответствовать отсутствию управляющего сигнала, конец — максимуму этого сигнала. Напряжение, ток и сопротивление нагрузки в начале и конце регулировочной характеристики будем обозначать, соответственно, индексами *A* и *B* (U_{2A} , I_{2A} , Z_{HA} и U_{2B} , I_{2B} , Z_{HB}). Эти величины задаются предварительными условиями. Для примера на рис. 1 дана регулировочная характеристика, соответствующая условиям стабилизации вторичного напряжения $U_2 = U_{2НОМ} = \text{const}$ при изменении сопротивления нагрузки от $Z_{H \text{ мин}}$ до $Z_{H \text{ макс}}$. Здесь $U_{2A} = U_{2B} = U_{2НОМ}$, $Z_{HA} = Z_{H \text{ макс}}$, $Z_{HB} = Z_{H \text{ мин}}$, $I_{2A} = \frac{U_{2A}}{Z_{HA}}$, $I_{2B} = \frac{U_{2B}}{Z_{HB}}$.

ТРПШ сможет обеспечить заданную предварительно регулировочную характеристику лишь тогда, если при $U_1 = U_{1 \text{ мин}}$,

$f_1 = f_{1 \text{ макс}}$ и максимальном подмагничивании шунтов он даст на нагрузке Z_{HB} напряжение и ток не ниже U_{2B} и I_{2B} , а при $U_1 = U_{1 \text{ макс}}$, $f_1 = f_{1 \text{ мин}}$ и неподмагниченных шунтах напряжение и ток на нагрузке будет не больше U_{2A} и I_{2A} .

Первое условие выполняется независимо от шунтов соответствующим расчетом параметров основного магнитопровода и обмоток трансформатора.

Для выполнения второго условия нужно правильно определить параметры шунта: марку стали, длину силовой линии и сечение.

Возможность регулирования вторичного напряжения у ТРПШ создается за счет отвлечения части магнитного потока в шунт. В схемах замещения этого регулятора влияние шунта представляется в виде реактивного сопротивления рассеяния X_s [5]. Его всегда можно привести к первичной цепи и выразить через параметры шунта

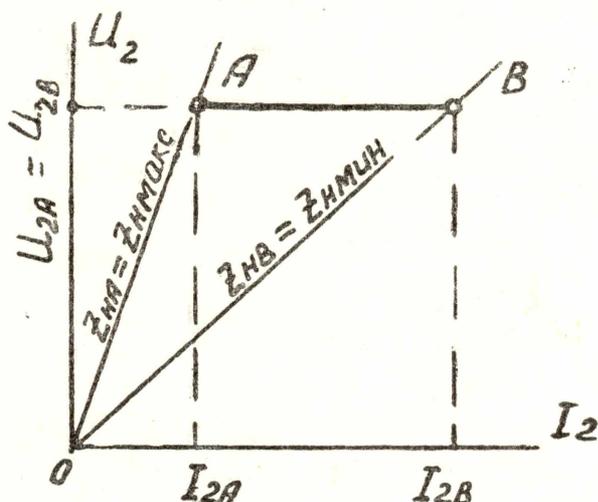


Рис. 1.

$$X_s = 2\pi f_1 \cdot \frac{W_1^2 \cdot S_{ш}}{l_{ш}} \cdot \kappa_p \cdot \frac{B_{ш}}{H_{ш}} \text{ [ом]}, \quad (1)$$

где $S_{ш}$, $l_{ш}$, $B_{ш}$ и $H_{ш}$ — сечение, длина силовой линии, индукция и напряженность шунта;

W_1 — число витков первичной обмотки ТРПШ;

κ_p — коэффициент размерности.

С точки зрения регулирования шунт будет оптимально рассчитан, когда он в неподмагниченном состоянии и при сопротивлении нагрузки Z_{HA} создает реактивное сопротивление рассеяния не больше и не меньше, чем достаточно для обеспечения начала регулировочной характеристики при $U_1 = U_{1\text{макс}}$ и $f_1 = f_{1\text{мин}}$.

Если значение такого сопротивления, обозначим его X_{SA} , будет известно, то, используя уравнение (1), можно приступить к определению $S_{ш}$ и $l_{ш}$, при выбранной марке стали оптимальных для заданного режима работы.

Определение величины X_{SA} .

В [5] все ТРПШ по характеру потоков вторичного рассеяния рекомендуется подразделять на три разновидности.

Там же для каждой разновидности ТРПШ даются полные схемы замещения. К расчетам X_{SA} эти схемы на рис. 2, 3, 5 даются в упрощенном виде. Здесь пренебрегается активными потерями в стали шунта, а потери на рассеяние по воздуху и в активном сопротивлении рабочих обмоток учитываются коэффициентом κ

$$\kappa = 1 - \delta \cdot \frac{I_{2A}}{I_{\text{ном}}} \quad (2)$$

Для трансформаторов от 1 кВа и выше можно считать $\delta = 0,1 \div 0,15$, для трансформаторов малой мощности $\delta = 0,15 \div 0,20$.

В дальнейших расчетах все параметры ТРПШ, не связанные с параметрами шунтов, считаются известными. Все величины вторичной цепи берутся приведенными к первичной через витковый коэффициент

$$\kappa_w = \frac{W_1}{W_2} \text{ и обозначаются штрихом.}$$

Отметим, что сечение шунтов ТРПШ нецелесообразно делать больше сечения основного магнитопровода, так как уже при $S_{\text{ш}} = S_0$ весь намагничивающий поток при замкнутой вторичной цепи может пройти через шунт и дальнейшее увеличение $S_{\text{ш}}$ малоэффективно влияет на U_2 и I_2 . Из схем замещения ТРПШ видно, что

$\frac{S_{\text{ш}}}{S_0} \gg 1$ будет (примерно) при

$I'_{2A} \rightarrow 0$ и $U'_{2A} \ll 0,5 U_{1\text{макс}}$ или

при $U_{2A} \rightarrow 0$ и $I_{2A} \ll I_{10}$, где I_{10} —

намагничивающий ток ТРПШ

в режиме холостого хода при под-

магниченных до полного насы-

щения шунтах. Поэтому, при

таких значениях U'_{2A} и I'_{2A} расчет

шунта по X_{SA} исключается. Луч-

ше выбрать $S_{\text{ш}} = (0,8 \div 1) S_0$ и,

в случае необходимости, приме-

нить дополнительное подмагничивание основного магнитопровода.

а) X_{SA} для ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки

Схема замещения на рис. 2 позволяет для определения X_{SA} составить выражение (3)

$$X_{SA} = X'_{2SA} = \frac{\sqrt{(U_{1\text{макс}} \cdot \kappa)^2 - (U'_{2A} \cdot \cos \varphi_{HA})^2} - U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA})}{I'_{2A}} \quad (3)$$

Минус перед углом нагрузки φ_{HA} ставится при емкостном ее характере.

ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки не регулируется на холостом ходу, поэтому определение величины X_{SA} здесь

будет иметь смысл, когда $I'_{2A} \neq 0$.

б) X_{SA} для ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки

Для схемы на рис. 3 даны векторные диаграммы: при индуктивном — (рис. 4 б) и емкостном — (рис. 4, в) характерах нагрузки.

Из треугольников *сов* можно составить общее уравнение для определения X_{SA}

$$U_{1\text{макс}}^2 \kappa^2 = [I_{1A} \cdot X_{1SA} + U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA} \pm \alpha)]^2 + [U'_{2A} \cdot \cos(\pm \varphi_{HA} \pm \alpha)]^2 \quad (4)$$

Здесь угол α всегда получается положительным, так как активная составляющая намагничивающего тока во много раз меньше индуктивной составляющей.

После преобразований из выражения (4) получим

$$X_{SA} = X_{ISA} = \frac{1}{I_{1A}} \sqrt{(U'_{2A})^2 [\sin^2(\alpha \pm \varphi_{HA}) - 1] + (U_{1\text{макс}} \cdot k)^2 - \frac{U'_{2A} \cdot \sin(\alpha \pm \varphi_{HA})}{I_{1A}}} \quad (5)$$

Перед корнем выбран знак "плюс", так как искомое сопротивление имеет индуктивный характер. В правой части уравнения (5) неизвестными являются I_{1A} и α . Способы определения этих величин вытекают из векторных диаграмм:

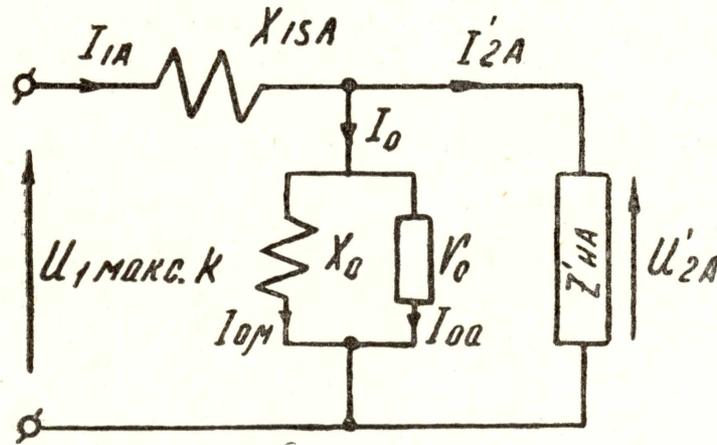


Рис. 3.

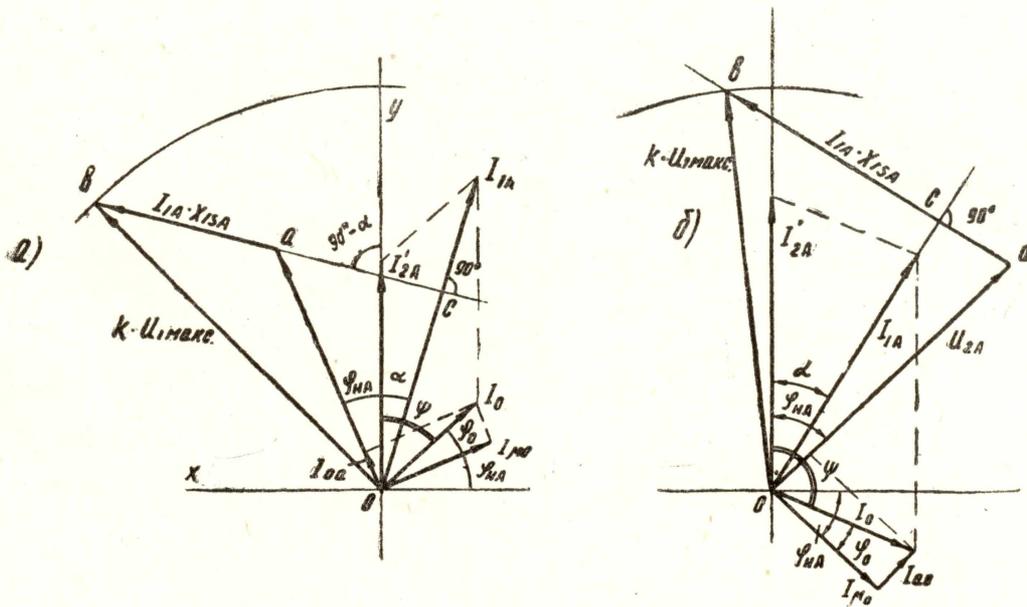


Рис. 4.

$$I_{1A} = \sqrt{(I'_{2A})^2 + 2I'_{2A} \cdot I_0 \cdot \cos\psi + I_0^2}, \quad (6)$$

$$\psi = 90 - (\varphi_0 \pm \varphi_{HA}), \quad (7)$$

$$\varphi_0 = \text{Argk} \, \text{tg} \, \frac{I_{a0}}{I_{\mu 0}}, \quad (8)$$

$$I_0 = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{\mu 0}^2}, \quad (9) \quad I_{a0} = \frac{P_{\text{ст. о}}}{U_{2A}'}, \quad (10)$$

$$I_{\mu 0} = \frac{H_0 l_0}{W_1}, \quad (11)$$

$$P_{\text{ст. о}} = G_{\text{ст. о}} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{B_{m0}}{10^4} \right)^{2,1} \cdot \left(\frac{f_{1\text{макс}}}{50} \right)^{1,4}, \quad (12)$$

где $P_{\text{ст. о}}$ — активные потери в стали основного магнитопровода;
 P_{10} — удельные потери в стали;
 $G_{\text{ст. о}}$, B_{m0} , H_0 , l_0 — вес, индукция, напряженность и длина силовой линии основного магнитопровода;
 H_0 — находится из кривой намагничивания $B = f(H)$ по B_{m0} и приводится к действующему значению в а/см.

$$B_{m0} = \frac{U_{2A}' \cdot 10^8}{4,44 f_{1\text{макс}} \cdot W_1 \cdot S_0} \text{ [гс]} \text{ — амплитудное значение.} \quad (13)$$

При качественном магнитопроводе потерями в стали можно пренебречь и считать

$$I_{a0} = 0, \quad \varphi_0 = 90^\circ, \quad I_0 = I_{\mu 0}.$$

Из треугольника, образованного векторами I_0 , I_{2A}' и I_{1A} , можно определить угол α

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{r}{p - I_0}, \quad (14)$$

где $p = \frac{1}{2} (I_{1A} + I_{2A}' + I_0)$ — полупериметр треугольника;

$r = \sqrt{\frac{(p - I_0)(p - I_{2A}')(p - I_{1A})}{p}}$ — радиус вписанной окружности.

Расчет величины X_{SA} значительно упрощается, когда $I_0 \ll I_{2A}'$ (так как тогда можно считать $I_0 = 0$, $\alpha = 0$, $I_{1A} = I_{2A}'$), и в режиме холостого хода, когда $I_{2A}' = 0$.

в) X_{SA} для ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток

Для ТРПШ этой разновидности всегда $X_{1s} = X_{2s}'$. В самом деле

$$\begin{aligned} X_{1s} &= 2\pi f_1 \cdot \frac{W_1^2 \cdot S_{\text{ш}}}{l_{\text{ш}}} \cdot \kappa_{\mu} \cdot \frac{B_{\text{ш}} \cdot l_{\text{ш}}}{I_1 W_1 + I_2 W_2} = \\ &= 2\pi f_1 \cdot W_1 \cdot S_{\text{ш}} \cdot \frac{B_{\text{ш}}}{I_1 + I_2}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} X_{2s}' &= 2\pi f_1 \cdot \frac{W_2^2 \cdot S_{\text{ш}}}{l_{\text{ш}}} \cdot \kappa_{\mu} \cdot \frac{B_{\text{ш}} \cdot l_{\text{ш}}}{I_1 W_1 + I_2 W_2} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 = \\ &= 2\pi f_1 \cdot W_1 \cdot S_{\text{ш}} \cdot \frac{B_{\text{ш}}}{I_1 + I_2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Следовательно, $X_{1s} = X_{2s}'$.

Для схемы замещения, представленной на рис. 5, когда заданы значения I_{2A}' , U_{2A}' , $\cos \varphi_{HA}$, U_1 , и неизвестно X_{SA} , векторные диаграммы можно построить лишь методом последовательных приближений.

Для пояснения приведенных ниже аналитических выражений эти диаграммы даются на рис. 6: а — при индуктивном характере нагрузки и б, б' — при емкостном характере нагрузки.

Если их расположить в прямоугольной системе координат таким образом, чтобы вектор тока I'_{2A} совпадал с осью y , то для точки встречи векторов $U_{1\text{макс}}$ и $I_{1A} \cdot X_{1SA}$, обозначенной через c , можно записать

$$x_c^2 + y_c^2 = U_{1\text{макс}}^2 \kappa^2, \quad (17)$$

$$x_c = U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA}) + I'_{2A} \cdot X'_{2SA} + I_{1A} \cdot X_{1SA} \cdot \cos \alpha, \quad (18)$$

$$y_c = U'_{2A} \cdot \cos(\pm \varphi_{HA}) + I_{1A} \cdot X_{1SA} \cdot \sin \alpha. \quad (19)$$

Здесь α считается положительным, иначе перед ним следовало бы ставить два знака — „плюс“ и „минус“.

Разрешение этих уравнений, считая $X_{1SA} = X'_{2SA} = X_{SA}$, дает

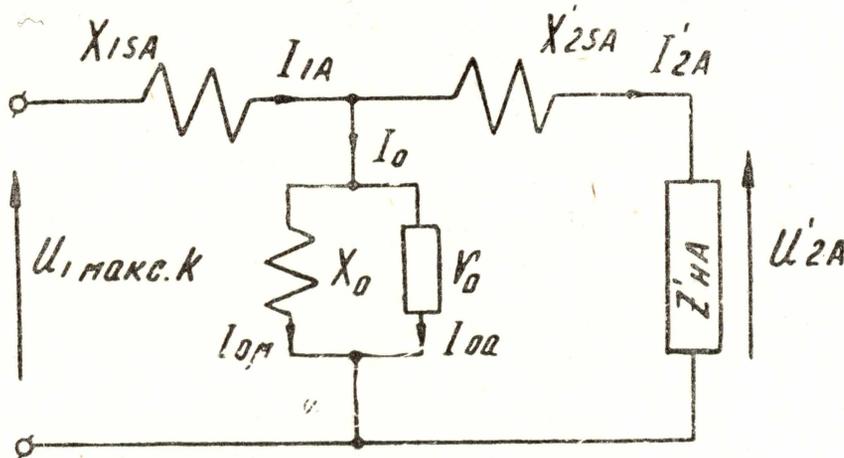


Рис. 5.

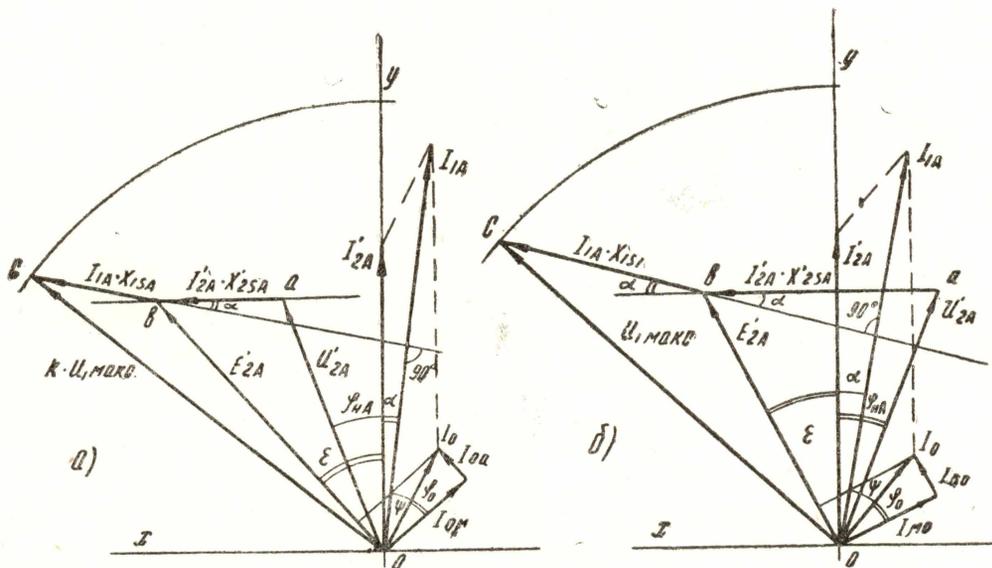


Рис. 6.

$$X_{SA} = \frac{1}{I_{\Sigma}} \cdot \left[\sqrt{(B^2 - 1) (U'_{2A})^2 + U_{1\text{макс}}^2 \cdot \kappa^2} - U'_{2A} \cdot B \right], \quad (20)$$

где, $I_{\Sigma} = I_{1A} + I'_{2A} = \sqrt{I_{1A}^2 + (I'_{2A})^2 + 2I_{1A} \cdot I'_{2A} \cdot \cos \alpha}$,

$$B = \frac{1}{I_{\Sigma}} \left[I_{1A} \cdot \sin(\alpha \pm \varphi_{HA}) + I'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA}) \right].$$

Однако определить значение X_{SA} из выражения (20) однократным решением не представляется возможным, так как I_{1A} и α являются функциями X_{SA} :

$$\psi = (90^\circ - \varphi_0 - \text{Ark tg } \varepsilon), \quad (21)$$

$$\text{tg } \varepsilon = \frac{U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA}) + I'_{2A} \cdot X_{SA}}{U'_{2A} \cdot \cos(\pm \varphi_{HA})}, \quad (22)$$

$$E'_{2A} = \sqrt{(U'_{2A})^2 + 2U'_{2A} \cdot I'_{2A} \cdot X_{SA} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA}) + X_{SA}^2 \cdot (I'_{2A})^2}, \quad (23)$$

$$B_{m0} = \frac{E'_{2A} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot S_0}, \quad I_{a0} = \frac{P_{\text{ст.0}}}{E'_{2A}}$$

и т. д., см. выражения (6 ÷ 14) в предыдущем разделе. Из выражения (20) искомое X_{SA} можно найти методом последовательных приближений (задаваясь значениями X_{SA} подсчитывать правую часть выражения до получения равенства).

Можно ускорить это решение, если записать

$$\frac{1}{I_2} \left[\sqrt{(B^2 - 1)(U'_{2A})^2 + U_{1\text{макс}}^2 \cdot \kappa^2 - U'_{2A} \cdot B} \right] - X_{SA} = \Theta(X_{SA}) \quad (24)$$

и построить эту функцию в координатах X_{SA} и $\Theta(X_{SA})$. Пересечение ее с осью X_{SA} даст искомое значение этого сопротивления. Начать построение функции $\Theta(X_{SA})$ можно с наибольшего значения $X_{SA} = X_{(SA)1}$, получаемого при $\alpha = 0$,

$$X_{(SA)1} = \frac{1}{2I'_{2A}} \left[\sqrt{[\sin^2(\pm \varphi_{HA}) - 1](U'_{2A})^2 + U_{1\text{макс}}^2 \cdot \kappa^2 - U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA})}, \quad (25)$$

задаваясь затем рядом значений X_{SA} меньшими $X_{(SA)1}$.

Как видно, расчеты получаются довольно громоздкими, но в частных случаях уравнение (20) значительно упрощается:

а) В режиме холостого хода, или близком к нему, когда $I'_{2A} = 0$, $U'_{2A} = E'_{2A}$ и $Z'_{HA} = \infty$, можно считать $\alpha = 90^\circ$, а X_{SA} равным:

$$X_{SA} = \frac{U_{1\text{макс}} - U'_{2A}}{I_0}. \quad (26)$$

б) В режиме короткого замыкания или близком к нему, когда $U'_{2A} = 0$, $I'_{2A} \gg I_0$, $Z'_{HA} = 0$, можно величиной I_0 пренебрегать и считать $I_{1A} = I'_{2A}$, $\alpha = 0$.

Тогда

$$X_{SA} = \frac{U_{1\text{макс}} \cdot \kappa}{2I'_{2A}}. \quad (27)$$

в) В режиме нагрузки при $U'_{2A} \neq 0$ и $I'_{2A} \gg I_0$, можно считать $\alpha = 0$ и для определения X_{SA} воспользоваться формулой (25).

Как видно, пользоваться уравнениями (20) и (25) приходится лишь в случаях, когда заданное значение I'_{2A} при $U'_{2A} \neq 0$ оказывается больше I_0 и соизмеримым с ним.

Определение параметров шунта по известному X_{SA}

В уравнении (1) после определения X_{SA} остается три неизвестные величины: $S_{ш}$, $I_{ш}$ и $\rho_{ш} = \frac{B_{шA}}{H_{шA}}$. Решение этого уравнения еще много-

значно, потому что одно и то же значение сопротивления рассеяния шунт может обеспечить при самых различных сочетаниях длины силовой линии сечения и марки стали. Выбрать конкретный вариант марки стали, сечения и длины силовой линии, вложенных в конкретные геометрические размеры шунта, можно, идя, например, по пути обеспечения минимального веса или минимального габарита ТРПШ. В литературе уже рассматриваются вопросы, касающиеся оптимальных типов магнитопроводов и оптимальных конструкций ТРПШ [4]. Будем считать, что для заданного нам режима работы, ТРПШ выбран по конструкции и параметры его основного магнитопровода (геометрические размеры, марка стали, способ шихтовки и т. д.) известны. Такая постановка вопроса дает возможность — часть размеров шунта определить по размерам основного магнитопровода.

Известные в литературе конструкции ТРПШ позволяют считать, что размеры шунтов являются наиболее благоприятными, когда высота его стержней равна высоте стержней основного магнитопровода, толщина и ширина пакета не превышает толщину и ширину стержней основного магнитопровода. Если придерживаться этого требования, то ширину окна шунта можно тоже считать известной.

$$b = \frac{\sum W_i \cdot S_i \cdot \kappa_{3i}}{h - c}, \quad (28)$$

где W_i , S_i , κ_{3i} — число витков, сечение и коэффициенты заполнения обмоток, расположенных в окне шунта;
 h — общая высота стержня шунта;
 c — ширина ярма.

Теперь задача по определению размеров шунтов сводится к определению ширины и толщины их стержней. Для этого нужно, прежде всего, определить марку стали шунтов. Будем считать, что она по тем или иным соображениям тоже определена. Напомним только, чем больше индукция насыщения и магнитная проницаемость в шунте, тем меньше габариты шунта и тем выше коэффициент усиления ТРПШ, как регулятора. Это нужно учитывать при выборе стали.

При такой конкретизации задачи оставшиеся неизвестными ширину и толщину стержней шунтов определить уже не трудно. Покажем это на примере для конструкций, представленных на рис. 7 а, б.

Все величины, обозначенные на рисунках, кроме a и d , считаем известными. Причем из экономических и конструктивных соображений необходимо, чтобы d было не больше d_0 , и a не меньше $0,4d$ и не больше a_0 .

Выразим длину силовой линии и сечение шунта через его размеры:

$$l_{ш} = 2(h - c + b + 2a), \quad (29)$$

$$S_{ш} = d \cdot a \cdot \kappa_{ст}. \quad (30)$$

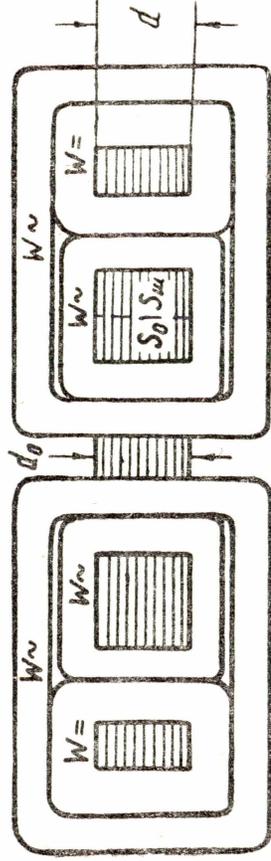
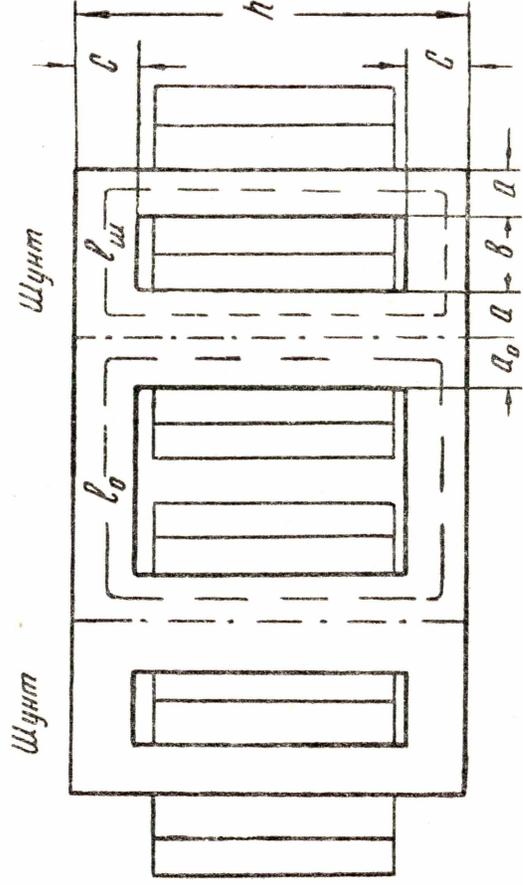
где $\kappa_{ст}$ — коэффициент заполнения сечения сталью.

Подставив эти значения в уравнение (1) и выразив напряженность через ампервитки, получим:

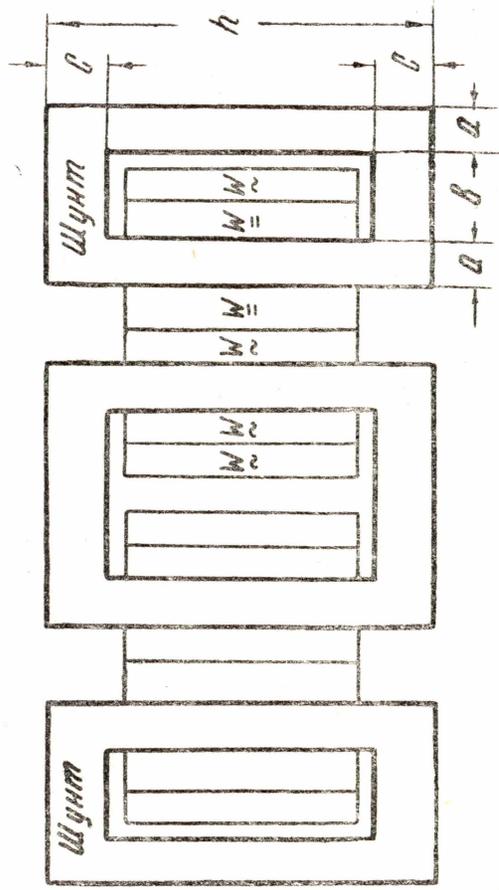
а) для конструкции на рис. 7а

$$X_{шA} = 2\pi f_{1\text{мин}} \cdot W_1 \cdot a \cdot d \cdot \kappa_{ст} \cdot \kappa_{\mu} \cdot \frac{B_{шA}}{I_{1A} + I'_{2A}}, \quad (31, а)$$

$$H_{шA} = \frac{(I_{1A} + I'_{2A}) \cdot W_1}{2(h - c + b + 2a)}. \quad (31, б)$$



а)



б)

Рис. 7.

б) для конструкции на рис. 7, б, когда шунты охватываются первичной обмоткой

$$X_{SA} = 2 \pi f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot a \cdot d \cdot \kappa_{\text{ст.}} \cdot \kappa_{\mu} \cdot \frac{B_{\text{шA}}}{I_{1A}}, \quad (32, a)$$

$$H_{\text{шA}} = \frac{I_{1A} \cdot W_1}{2(h - c + b + 2a)}. \quad (32, б)$$

в) для конструкции на рис. 7, б, когда шунты охватываются вторичной обмоткой

$$X_{SA} = 2 \pi f_{\text{макс}} \cdot W_1 \cdot a \cdot d \cdot \kappa_{\text{ст.}} \cdot \kappa_{\mu} \cdot \frac{B_{\text{шA}}}{I'_{2A}}, \quad (33, a)$$

$$H_{\text{шA}} = \frac{I'_{2A} \cdot W_1}{2(h - c + b + 2a)}. \quad (33, б)$$

Везде $B_{\text{шA}}$ находится по кривой намагничивания шунта через $H_{\text{шA}}$. Величина коэффициента κ_{μ} берется в зависимости от размерностей кривой намагничивания.

Определить величину a из (31 — 33) можно или методом последовательных приближений, задаваясь рядом значений a до получения равенства, или обычным решением, если кривую $B_{\text{ш}} = f(H_{\text{ш}})$ аппроксимировать известной функцией. В данном случае проще пойти по первому пути. При определении a величину d нужно первоначально взять равной d_0 . Если найденное a окажется меньше $0,4 d_0$, то лучше повторить расчет, задавшись новым значением $d < d_0$ (при $a < 0,4 d$ получается неблагоприятная конфигурация шунта).

Сечение шунта практически нецелесообразно, когда оно больше $(0,75 \div 1) S_0$. Поэтому, если при правильных расчетах появился такой результат, то лучше для шунта взять более высококачественную сталь или применить дополнительное подмагничивание основного магнитопровода. Можно было бы увеличить ширину окна b , однако, это нежелательно, так как чем больше b , тем больше вылет рабочей обмотки, что увеличивает рассеяние по воздуху, расход меди и т. д.

Иногда штамп пластин для магнитопровода шунта можно выбрать готовым (например, для конструкций на рис. 7, б и других). Тогда из всех его параметров остается неизвестным лишь сечение $S_{\text{ш}} = d \cdot a \cdot \kappa_{\text{ст.}}$, которое из уравнений (31 — 33) находится однократным решением, а по нему подбираются желательные значения a и d .

Формулы (31 — 33) и (3, 5, 20) можно использовать также для выбора ТРПШ при серийном выпуске этих аппаратов.

Использование метода для сравнения ТРПШ трех разновидностей

Пусть даны ТРПШ трех разновидностей с одинаковой выходной мощностью, работающих в одном режиме и имеющие одинаковые параметры основного магнитопровода. Выясним, будут ли они в этом случае отличаться шунтами. Для простоты сравнения будем считать, что шунты у этих ТРПШ изготовлены из одной стали и имеют одинаковую длину силовой линии, то есть сравнение проведем по сечению. Подставив в уравнение (1) значения X_{SA} из (3, 5, 20) и выразив напряженность через ампервитки, после преобразований можно записать:

$$а) \text{ для ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки}$$

$$\sqrt{(U'_{2A})^2 \cdot [\sin^2(\alpha \pm \varphi_{HA}) - 1] + U_{\text{макс}}^2 \kappa^2} - U'_{2A} \cdot \sin(\alpha \pm \varphi_{HA}) =$$

$$= 2 \pi f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot B_{\text{шA}_1} \cdot S_{\text{ш}_1}. \quad (34, a)$$

б) для ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки

$$\begin{aligned} \sqrt{U_{1\text{макс}}^2 \kappa^2 - (U'_{2A} \cdot \cos \varphi_{HA})^2} - U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA}) = \\ = 2 \pi f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot B_{\text{ш}A_2} \cdot S_{\text{ш}2}. \end{aligned} \quad (34, б)$$

в) для ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток

$$\sqrt{(U'_{2A})^2 (B^2 - 1) + U_{1\text{макс}}^2 \cdot \kappa^2} - U'_{2A} \cdot B = 2 \pi f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot B_{\text{ш}A_3} \cdot S_{\text{ш}3}. \quad (34, в)$$

Проанализируем теперь эти равенства. Если бы магнитопроводы ТРПШ были изготовлены из стали, имеющей прямоугольную кривую намагничивания, то тогда в равенствах (34, а, б, в) $B_{\text{ш}A_1} = B_{\text{ш}A_2} = B_{\text{ш}A_3} = B_s$ и $\alpha = 0$. Получим

$$S_{\text{ш}1} = S_{\text{ш}2} = S_{\text{ш}3} = \frac{\sqrt{U_{1\text{макс}}^2 \cdot \kappa^2 - (U'_{2A} \cdot \cos \varphi_{AH})^2} - U'_{2A} \cdot \sin(\pm \varphi_{HA})}{2 \pi \cdot f_{\text{мин}} \cdot W_1 \cdot B_s}. \quad (35)$$

Следовательно, когда ТРПШ изготовлен из высококачественной стали, имеющей высокую магнитную проницаемость и резко выраженную насыщаемость, то возможности для всех разновидностей этих аппаратов в режимах регулирования мощности практически одинаковы.

Но если используются обычные горячекатаные электротехнические стали (Э-42, Э-41 и др.), кривая намагничивания которых существенно отличается от прямоугольной формы, то при указанных выше условиях сравнения сечения шунтов ТРПШ не будут одинаковыми.

Например, при I'_{2A} , близком к $I'_{2\text{ном}}$, $S_{\text{ш}1} \approx S_{\text{ш}2} \approx (1,10 \div 1,20) S_{\text{ш}3}$, хотя для режима холостого хода $S_{\text{ш}1} = S_{\text{ш}3}$.

Наибольшая разница для сечений будет в режимах, когда I'_{2A} соизмеримо с I_0 . Здесь наименьшим будет $S_{\text{ш}3}$ и наибольшим $S_{\text{ш}2}$. Разница тем больше, чем больше угол и чем круче подъем насыщенного участка кривой намагничивания. Однако при $I'_{2A} \gg I_{10}$ даже для сталей Э-42 и Э-41 разница эта не превышает 25%.

Из всех разновидностей ТРПШ следует особо выделить трансформатор с магнитным рассеянием обеих рабочих обмоток, так как он обладает не только свойствами регулирования напряжения на холостом ходу, но и по сравнению с остальными разновидностями ТРПШ при прочих равных условиях имеет большую крутизну падающего участка внешних характеристик, что нужно отнести к ценным его свойствам [5].

О точности метода

Если погрешность расчета шунтов предлагаемым здесь путем измерять отклонением фактически получаемого на нагрузке напряжения от расчетного при заданном I'_{2A} , то есть

$$\Delta = \frac{U_{2A\text{факт}} - U_{2A\text{зад}}}{U_{2A\text{зад}}} \cdot 100 \%. \quad (36)$$

то эта погрешность иногда может достигать 15%. Наибольшая ошибка получается при расчете параметров шунта из условия обеспечения заданного минимального напряжения на холостом ходу. Точность расчетов в основном определяется тем, на сколько кривые намагничивания стали, используемые для расчетов, будут отличаться от реальных кривых намагничивания, изготовленных ТРПШ, так как метод не учитывает влияния воздушных зазоров, качество сборки, конфигурацию

магнитопровода, способ шихтовки и других факторов, а это может существенно влиять на точность расчетов. Поэтому нужно использовать кривые намагничивания, снятые на магнитопроводах, по форме и шихтовке близких к магнитопроводам выбранной конструкции ТРПШ. В значительно меньшей степени сказывается неточный учет активного сопротивления рабочих обмоток и потерь на рассеяние.

Метод был опробован поверочными расчетами сечений шунтов, изготовленных ТРПШ, при использовании кривых намагничивания и коэффициентов потери напряжения k , экспериментально снятых на этих аппаратах. Погрешность при этом была незначительной и определялась, в основном, неточным учетом фактического заполнения стали в стержне.

Принципиально метод пригоден для расчета шунтов как однофазных, так и трехфазных ТРПШ различных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, В. А. Сомов, А. О. Шмидт. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов. Госэнергоиздат, 1959.
2. А. М. Бамдас, В. А. Сучков. Трансформатор, регулируемый подмагничиванием шунта для выпрямительной установки с отсечкой по току. Труды Горьковского политехнического института, т. XVII, вып. 2, 1961.
3. А. М. Бамдас, М. А. Аркелов, С. В. Шапиро. Применение ТРПШ для однофазной выпрямительно-стабилизирующей установки с аккумуляторной батареей. Труды Горьковского политехнического института, т. XVII, вып. 2, 1961.
4. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро, О. Д. Гетманенко. Определение оптимальных конструкций трансформаторов и автотрансформаторов, регулируемых подмагничиванием, и их расчет. Труды Горьковского политехнического института, т. XVIII, вып. 1, 1962.
5. А. И. Зайцев, В. П. Обрусник. Вопросы теории и применения трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов. Известия ТПИ, том 117, 1963.

Поступила в редакцию
в июне 1962 г.