

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ОДНОФАЗНЫХ ТРПШ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В. П. ОБРУСНИК, В. Г. КИСЕЛЕВ, З. Н. СОВОЛЕВА

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

Как известно, однофазные трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов (ТРПШ), имеют более двадцати конструктивных разновидностей. Возможности их применения в автоматических установках различного назначения будут более ясны при наличии данных сравнительной оценки этих аппаратов по энергетическим и удельно-весовым показателям. В литературе [1, 2, 3] сравнения ТРПШ проводились на основе схемных и конструктивных решений, а также по их энергетическим характеристикам. Вопросы глубокого анализа этих устройств по весовым и габаритным показателям освещены, на взгляд авторов, слабо.

На основании ранее проведенных исследований [1] ряд конструкций из всего многообразия однофазных ТРПШ можно из рассмотрения исключить как имеющие явно худшие технико-экономические показатели. Из выполненных на не витых магнитопроводах с одинарным подмагничиванием определенного внимания заслуживают конструкции ТРПШ, изображенные на рис. 1, 2. Их сравнительная оценка в данной статье производится на основании метода определения геометрических размеров ТРПШ, предложенного в [4].

Если, в отличие от классической теории исследования оптимальной геометрии ферромагнитных устройств (ФУ), за базисную величину взять не ширину пластины главного магнитопровода, а корень квадратный из площади поперечного сечения последнего, то основные размеры магнитопровода и катушек можно выразить с помощью соотношений:

$$a_0 = \sqrt{\frac{S_0}{k_s}}, \quad b_0 = \sqrt{k_s S_0}, \quad h_0 = k_h \sqrt{S_0}, \quad C = k_c \sqrt{S_0}, \quad (1)$$

где

a_0, b_0, h_0 — основные размеры главного магнитопровода,
 k_s, k_h, k_c — переменные коэффициенты,
 C — базисная толщина катушек.

За базисную толщину катушек C удобно принимать толщину наружной обмотки, охватывающей стержни главного магнитопровода и шунта. При наличии зазоров между обмотками последние тоже можно выразить с помощью постоянных коэффициентов и базисной толщины C .

У конструкций, изображенных на рис. 1, 2, величина некоторых зазоров принята равной $\delta = 0,5C$, а в других случаях — $\delta = 1C$. Расстояние между главным магнитопроводом и магнитопроводом шунта выбирается из конструктивных соображений и также выражается в долях базисной величины C .

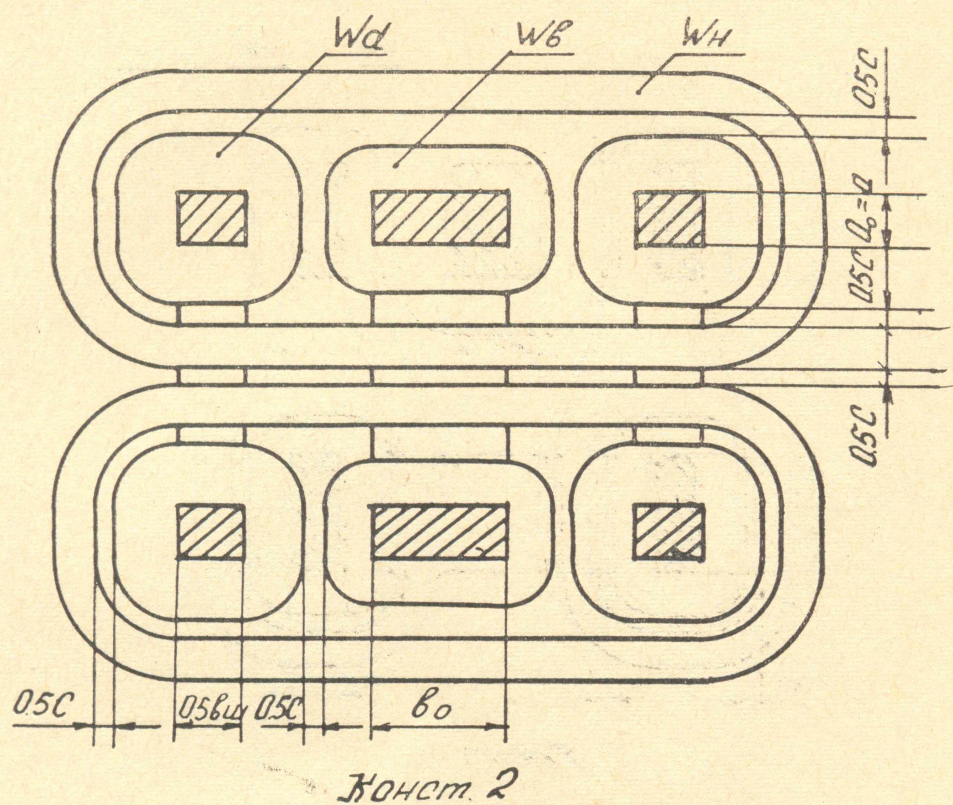
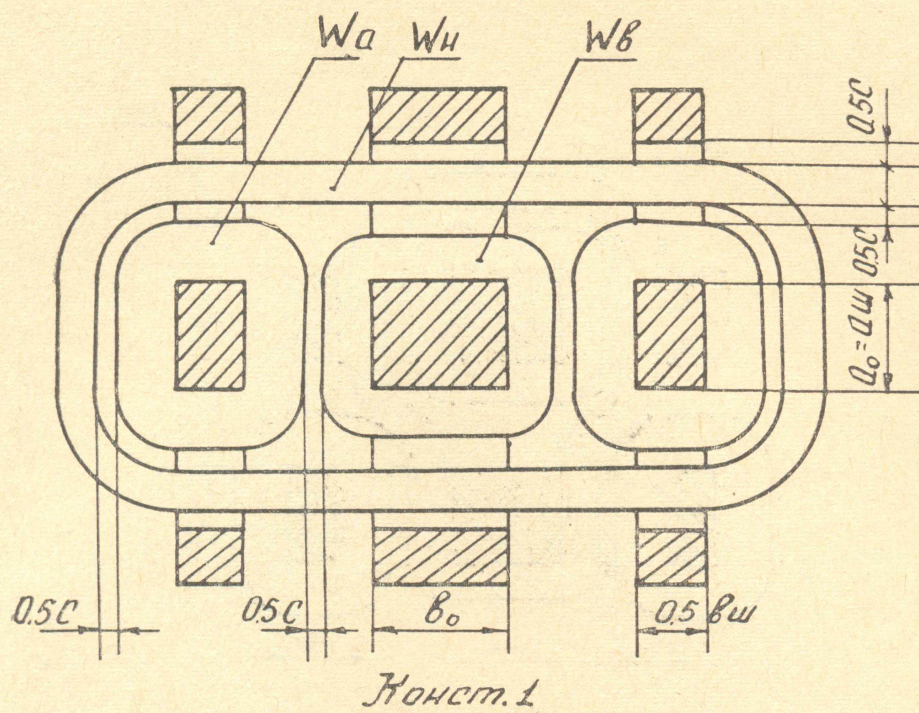
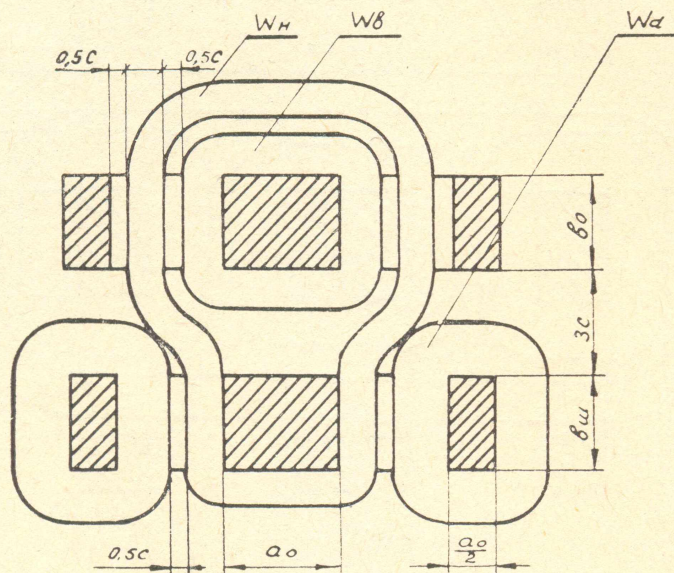
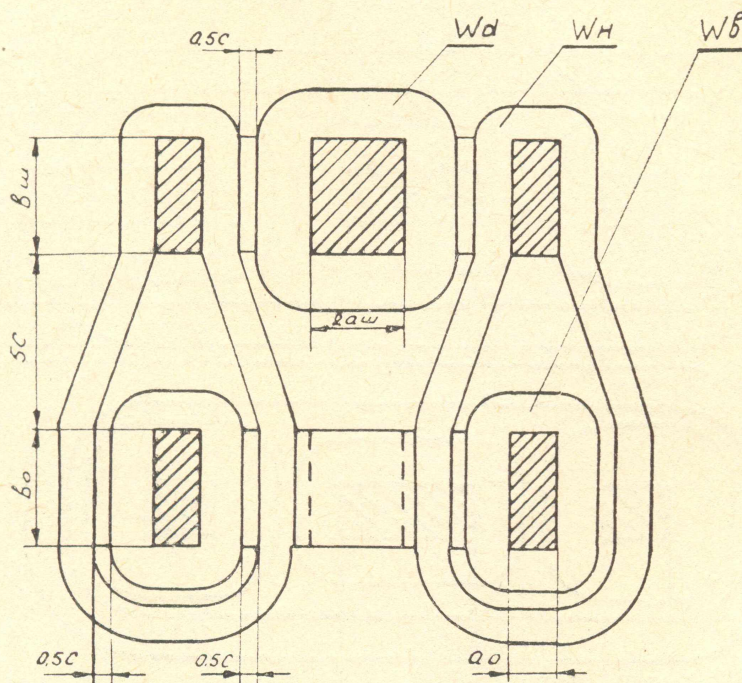


Рис. 1а

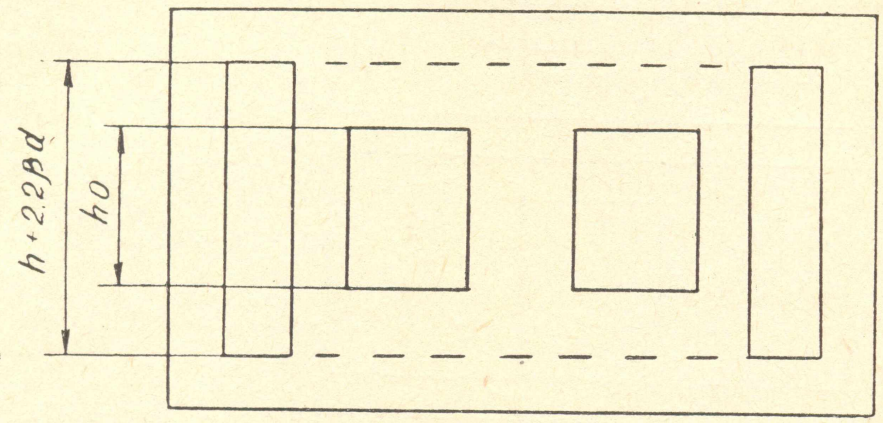
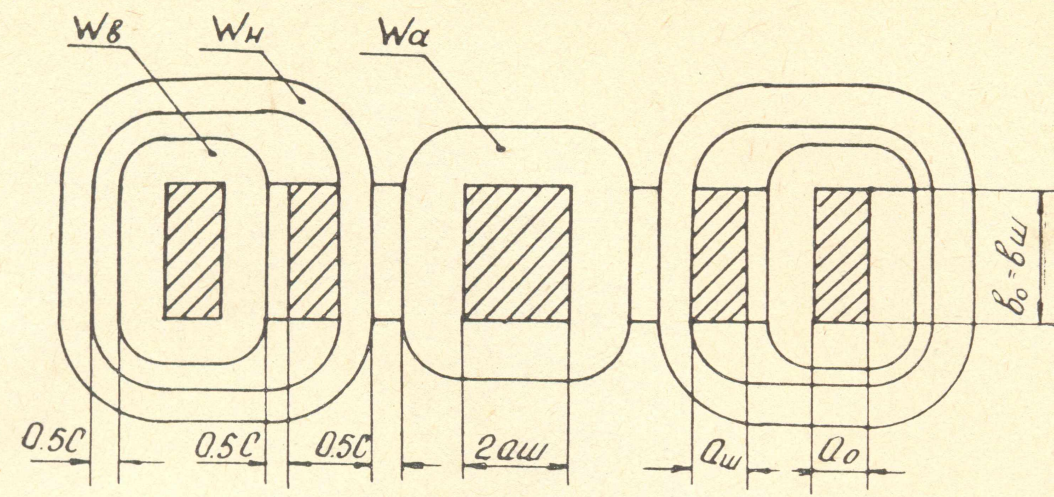


Конст. 3

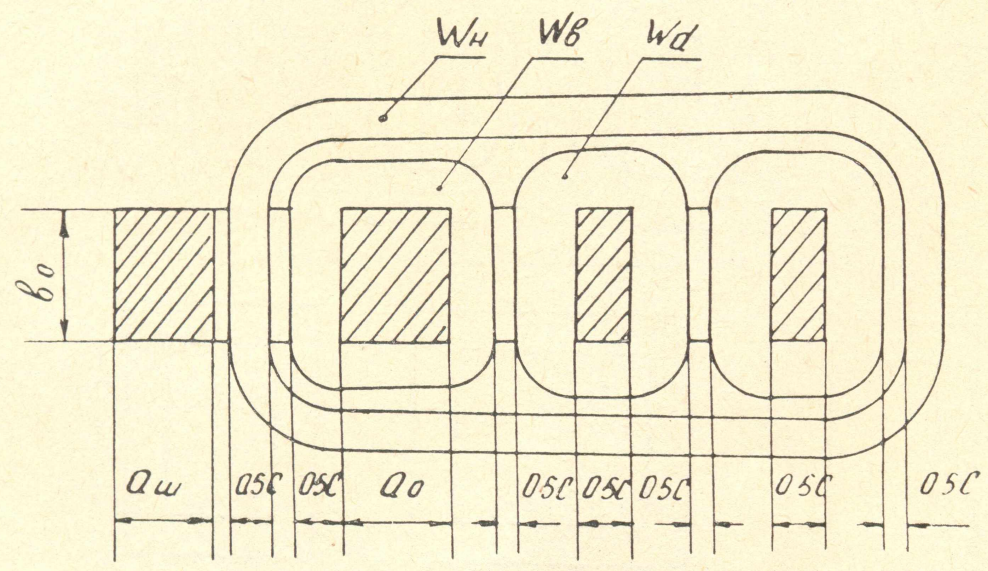


Конст. 4

Рис. 16

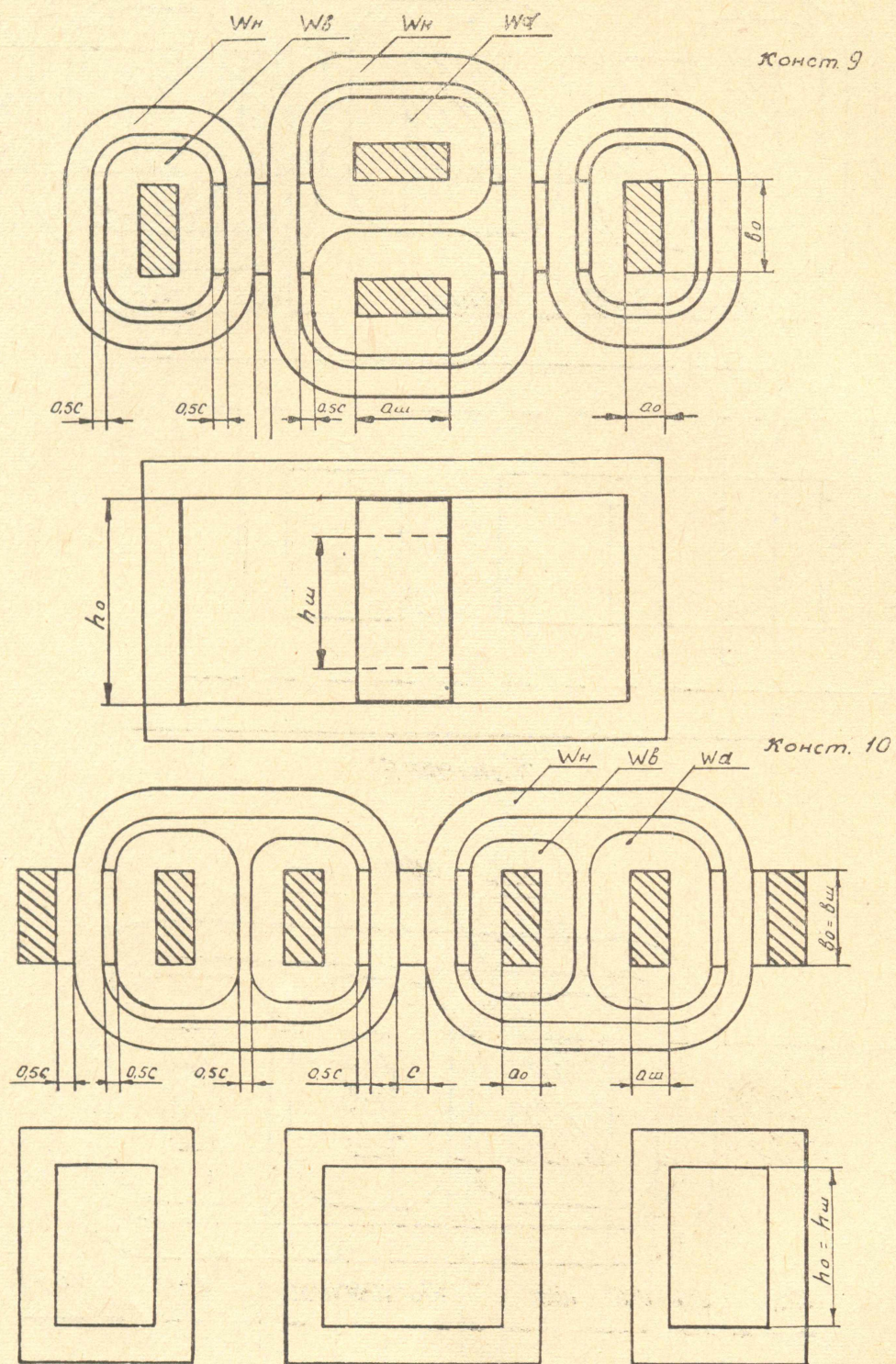


Номст. 5



Номст. 6

Рис. 1в



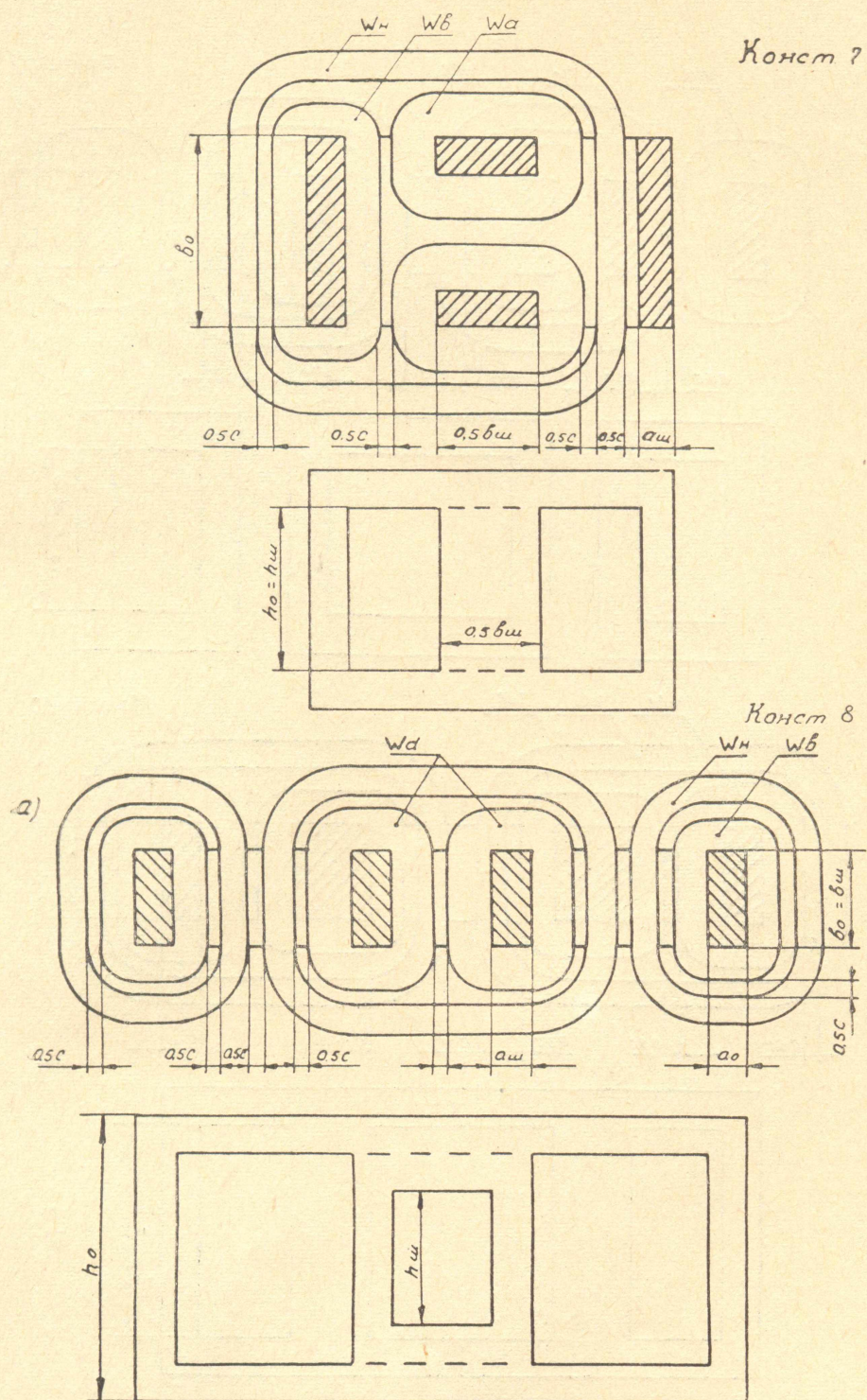


Рис. 26

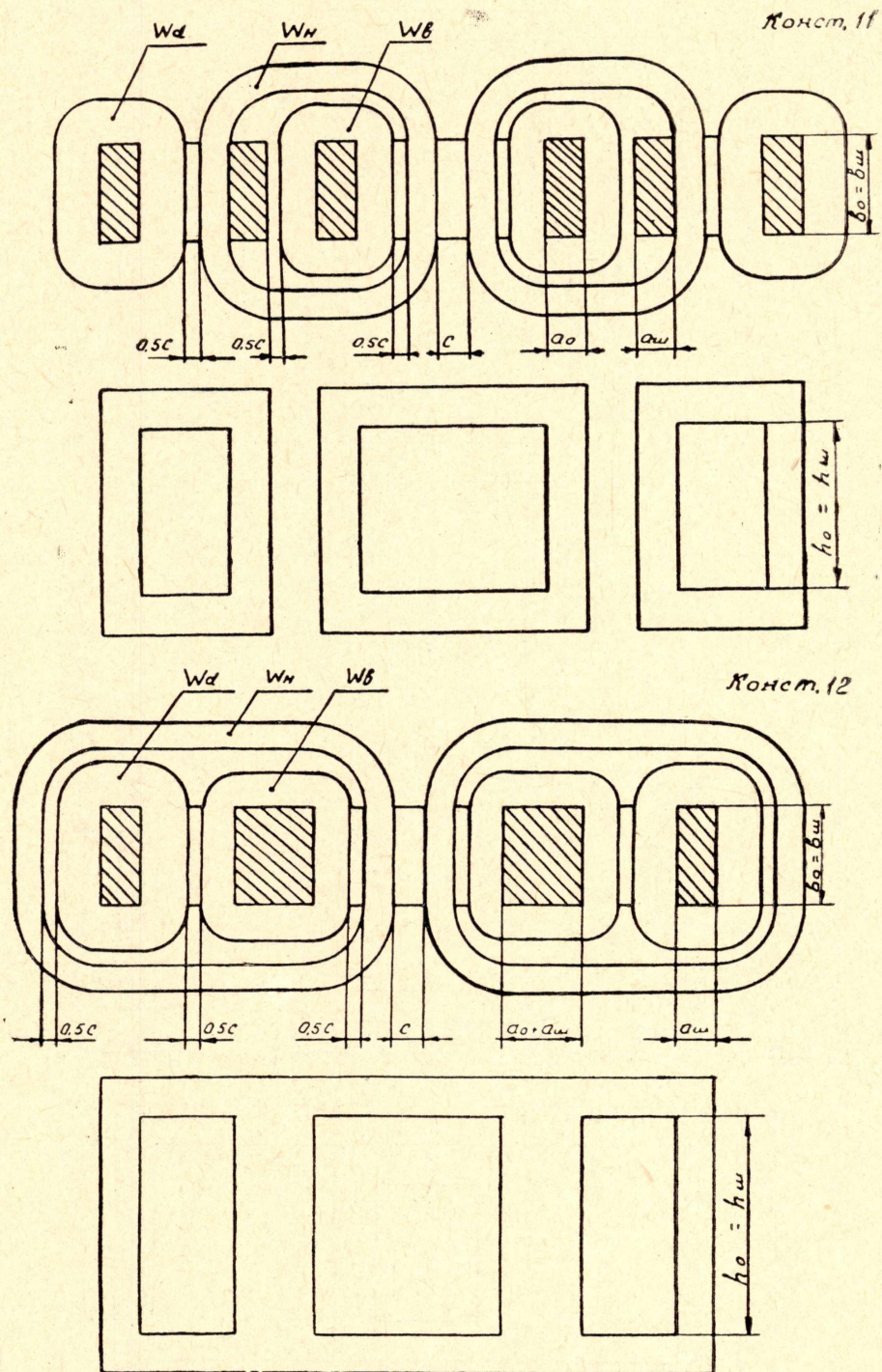
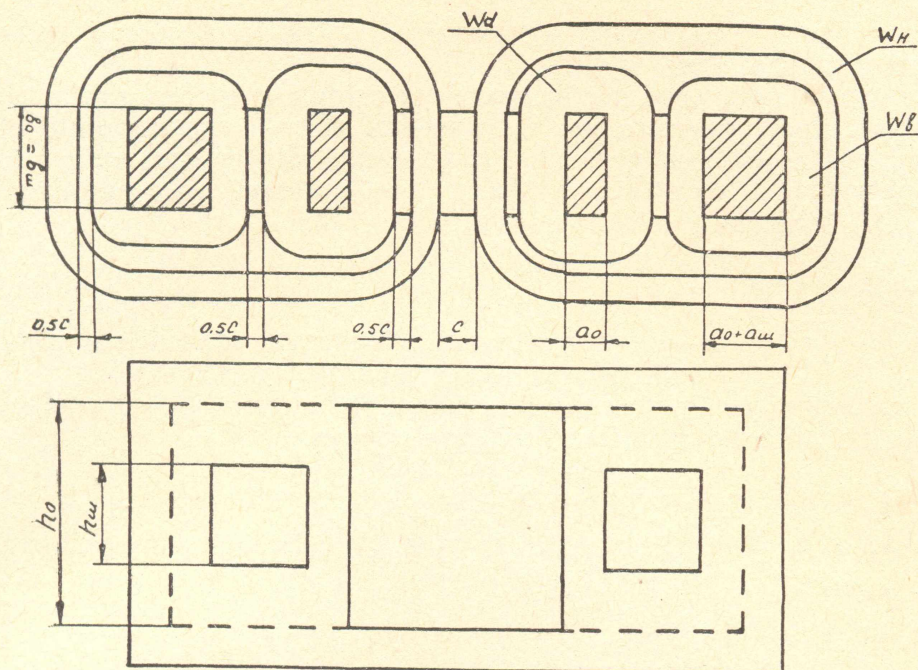


Рис. 2в



Конст 13

Рис. 2г

Охватывающей обмоткой может быть как первичная обмотка ТРПШ, так и вторичная, и, учитывая, что $I_1 w_1 \approx I_2 w_2$, можно было бы принять толщины внутренней и наружной катушек рабочих обмоток одинаковыми, равными C . Но поскольку охлаждение внутренних катушек хуже, а поэтому, как правило, плотность тока в них примерно на 10% ниже, то можно считать, что коэффициент, связывающий толщину внутренних катушек и базисную толщину C , равен 1,1. Коэффициент для определения толщины катушек обмоток подмагничивания равен 1,5, так как находится из условия:

$$I_d w_d = 1,5 I_{\text{наруж}} W_{\text{наруж}}$$

Подчеркнем, что во всех дальнейших формулах и рассуждениях будет использоваться именно величина C , являющаяся толщиной наружной рабочей обмотки и базисной величиной для относительного выражения толщин всех остальных катушек, воздушных промежутков и окон. Эта величина, по сравнению с шириной окна, более удобна для составления исходных уравнений и осмысливания геометрии ФУ, описанной математически, что особенно заметно, когда устройство имеет сложную конструкцию (ТРПШ, умножители частоты и т. д.).

Сечение и размеры шунта связаны с величиной сечения основного магнитопровода S_0 постоянным для данной глубины регулирования коэффициентом $\beta = \frac{S_{\text{ш}}}{S_0}$, где $S_{\text{ш}}$ — сечение стержня шунта. Тогда могут

быть два случая, когда $a_{\text{ш}} = a_0$, $b_{\text{ш}} = \beta \cdot b_0$ или $a_{\text{ш}} = \beta a_0$, $b_{\text{ш}} = b_0$. Если, например, считать, что у всех конструкций, изображенных на рис. 1, 2, величина β находится из условия ограничения тока короткого замыкания и при этом величина максимальной индукции в главном магнитопроводе и шунте должна быть одинакова, а напряжение сети меняется в пределах $(0,85 \div 1,1) U_{1\text{н}}$, то получим

$$\beta = \frac{S_{\text{ш}}}{S_0} = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{1\text{min}}} = 1,3.$$

При других требованиях и условиях величину β можно находить аналогичным способом.

Теперь имеются все необходимые величины для того, чтобы произвести описание объема любой конструкции ФУ в соответствии с [4] и сравнить их на равных условиях. Выражение для суммарного объема стали, независимо от конструктивных особенностей того или иного аппарата, в общем виде можно записать так [4]:

$$V_c = B \cdot S_0 [m'a_0 + n'b_0 + q'C + ph],$$

где

B, m', n', q', p — постоянные коэффициенты, значения которых не одинаковы для различных конструкций.

В зависимости от конструктивных особенностей ФУ при определении высоты окна шунта могут быть три случая.

$$1. h_{ш} = h_0.$$

$$2. h_{ш} = h_0 \mp (1,05 \div 1,1) 2a_{ш}, \text{ где } a_{ш} \text{ выбирается из условий:}$$

$$а) a_{ш} = \beta a_0, b_{ш} = b_0, \text{ или} \quad (4)$$

$$б) a_{ш} = a_0, b_{ш} = \beta b_0, \quad (4а)$$

$$3) h_{ш} = h_0 + (1,05 \div 1,1) 2a_0. \quad (4б)$$

Поэтому выражения объема катушек для указанных выше случаев, соответственно, будут иметь вид:

$$1. V_k = A \cdot C \cdot h_0 [m_1 a_0 + n_1 b_0 + q_1 C], \quad (5)$$

$$2. а) V_k = A \cdot C \{h_0 (m_1 a_0 + n_1 b_0 + q_1 C) + [h_0 \mp (1,05 \div 1,1) 2\beta a_0] [m_2 a_0 + n_2 b_0 + q_2 C]\}, \quad (6)$$

$$б) V_k = A \cdot C \{h_0 [m_1 a_0 + n_1 b_0 + q_1 C] + [h_0 \mp (1,05 \div 1,1) 2a_0] [m_2 a_0 + n_2 b_0 + q_2 C]\}. \quad (7)$$

$$3. V_k = A \cdot C \cdot \{h_0 [m_1 a_0 + n_1 b_0 + q_1 C] + [h_0 + (1,05 \div 1,1) 2a_0] [m_2 a_0 + n_2 b_0 + q_2 C]\}, \quad (8)$$

где

$A, m_1, m_2, n_1, n_2, q_1, q_2$ — те же постоянные коэффициенты, что и в (3).

Наличие нескольких разновидностей выражений для объема катушек (5) ÷ (8) затрудняет анализ конструктивных вариантов ФУ и, в отдельных случаях, несколько усложняет непосредственный их расчет.

Эти трудности можно исключить, если ввести ограничения на высоту аппарата, то есть выбирать $Z = \frac{h}{a} = 5 \div 10$. Тогда выражения

(6) — (8) приводятся к единому виду:

$$V_k = A \cdot C \cdot a_0 [ma_0 + nb_0 + qC], \quad (9)$$

где для условия (4):

$$m = Zm_1 + m_2 [Z - 2\beta (1,05 \div 1,1)], \quad (10)$$

$$n = Zn_1 + n_2 [Z - 2\beta (1,05 \div 1,1)], \quad (11)$$

$$q = Zq_1 + q_2 [Z - 2\beta (1,05 \div 1,1)]; \quad (12)$$

для (4а) и (4б):

$$m = Zm_1 + m_2 [Z \mp 2 (1,05 \div 1,1)], \quad (13)$$

$$n = Zn_1 + n_2 [Z \mp 2 (1,05 \div 1,1)], \quad (14)$$

$$q = Zq_1 + q_2 [Z \mp 2 (1,05 \div 1,1)]. \quad (15)$$

Выражение (5) к виду (9) можно привести посредством простой замены $h_0 = Za_0$, при этом $m = Zm_1$, $n = Zn$, $q = Zq_1$. Кроме того, ограничение конструкции по высоте дает возможность записать переменные коэффициенты k_h и k_c в виде

$$k_h = \frac{Z}{\sqrt{k_s}}, \quad k_c = \frac{L\sqrt{k_s}}{Z} \quad (16)$$

и получить форму аппарата не только оптимальную по удельно-весовым показателям, но и более простую по технологии изготовления, так как исключается возможность получения вытянутой, технологически не целесообразной конструкции.

В соответствии с [4] величина поперечного сечения главного магнитопровода определяется как:

$$S_0 = D \sqrt{\frac{P_{1\phi}}{n_k \cdot k_c \cdot k_h}} = D \cdot \sqrt{\frac{P_{1\phi}}{n_k L}}, \quad (17)$$

где

$$D = \frac{1}{\sqrt{4,44f B_{mo} \cdot j k_{3k} \cdot k_{3c}}}, \quad (18)$$

$P_{1\phi}$ — габаритная мощность одной фазы,

n_k — число катушек первичной обмотки,

B_{mo} — рабочая индукция основного магнитопровода,

j — усредненная плотность тока в обмотках.

Подставив (1), (16) и (17) в (3) и (9), окончательно получим выражения для объема катушек и сердечников:

$$V_k = \sqrt{D^3} \sqrt[4]{P_{1\phi}^3} \cdot A \sqrt[4]{\frac{L}{n_k^3}} \left(\frac{m}{\sqrt{k_s}} + n\sqrt{k_s} + q \frac{L\sqrt{k_s}}{Z} \right). \quad (19)$$

$$V_c = \sqrt{D^3} \sqrt[4]{P_{1\phi}^3} \cdot \frac{B}{\sqrt[4]{(n_k L)^3}} \left(\frac{m'}{\sqrt{k_s}} + n'\sqrt{k_s} + q' \frac{L\sqrt{k_s}}{Z} + \frac{pZ}{\sqrt{k_s}} \right). \quad (20)$$

В короткой записи эти выражения имеют вид:

$$V_k = \sqrt{D^3} \cdot \sqrt[4]{P_{1\phi}^3} v_k, \quad (21)$$

$$V_c = \sqrt{D^3} \cdot \sqrt[4]{P_{1\phi}^3} v_c, \quad (22)$$

где

v_k и v_c — безразмерные объемы катушек и стали, зависящие только от соотношения геометрических размеров ФУ.

Выражения для экономического показателя теперь можно записать как

$$\mathcal{E} = \frac{k_{эс}}{P_{н, вых}} \sqrt{D^3} \sqrt[4]{P_{1\phi}^3} (\alpha v_k + v_c), \quad (23)$$

где $P_{н, вых}$ — номинальная выходная мощность ФУ,

$k_{эс}$ — вес или стоимость единицы объема сердечников,

α — коэффициент, характеризующий отношение веса или стоимости единицы, объема катушек к весу (стоимости) единицы объема сердечников.

Выражения (21), (22), (23) являются произведениями двух функций, одна из которых зависит от геометрических форм аппарата, а другая — связана только с физическими величинами.

При сравнительной оценке различных конструктивных вариантов ФУ по одному из экономических показателей (весу, объему или стоимости) функцию, связанную с физическими величинами, можно считать

Т а б л и ц а 1

Конст	A	B	m	m ₁	m ₂	m'	n	n ₁	n ₂	n'	q	q ₁	q ₂	q'	ρ	п _к
1	2	2	5,1	—	—	5,06	5,35	—	—	—	23	—	—	17,7	2,3	1
2	2	2	10,2	—	—	5,06	10,7	—	—	—	46	—	—	16,4	2,3	2
3	2	2	3,6	—	—	5,06	7,3	—	—	—	16,35	—	—	15,7	2,3	1
4	2	2	10,2	—	—	10,1	10,7	—	—	—	36,6	—	—	22,8	3,6	2
5	2	2	66,7	12,4	2,2	18,2	30,2	5	2,2	—	159,6	30,5	3,8	26,3	3,6	2
6	2	2	5,35	—	—	5,15	5,1	—	—	—	23,4	—	—	18,2	1,8	1
7	1	1	10,2	—	—	6,6	9,4	—	—	18,6	39,8	—	—	18,9	3,6	1
8	2	2	41,5	6,5	4,2	11,64	29	4	42	—	128,4	18,4	17,0	22,3	2,3	2
9	2	2	36,7	5	4,2	7,26	37,7	5,2	4,2	1,43	139,6	18,4	17	18,3	2,3	2
10	2	2	10,7	—	—	9,6	7,2	—	—	—	32,8	—	—	16,8	3,6	2
11	2	2	10,7	—	—	9,56	7,2	—	—	—	24	—	—	15,35	3,6	2
12	2	2	16,1	—	—	10,3	7,2	—	—	—	32,8	—	—	17,8	3,6	2
13	2	2	60,4	8,96	7,2	18,2	30,3	5,2	2	—	101,4	10,9	21,9	23,4	3,6	2

 $\beta = 1,3;$ $Z = 5;$ $\alpha = 0,5$

величиной постоянной, так как значения $B_{\text{мо}}, j, P_{1\phi}, k_{3\kappa}, k_{3\text{с}}$ для всех конструктивных разновидностей можно взять одни и те же.

Однако в практике расчетов ФУ часто встречаются два случая:

1. Когда величина индукции $B_{\text{мо}}$ и плотность тока в обмотках j считаются заданными.

2. Когда величина индукции $B_{\text{мо}}$ задана или выбирается в пределах колена насыщения кривой намагничивания, а величина плотности тока в обмотках аппарата j неизвестна и определяется в процессе расчета. В первом случае, когда все величины $B_{\text{мо}}, j, P_{1\phi}, k_{3\text{с}}, k_{3\kappa}$, входящие в функцию, зависящую от физических параметров, постоянны, анализ весовых показателей конструктивных вариантов ФУ можно проводить по функции, зависящей только от соотношений геометрических размеров аппарата. Последняя после подстановки коэффициента k_s из выражения (24), полученного в [4],

$$k_s = \frac{(xmL + m' + pZ)}{\left[(xnL + n') + \frac{L(xqL + q')}{Z} \right]} \quad (24)$$

с учетом некоторых упрощений получит вид:

$$v_{\Sigma} = (\alpha v_{\kappa} + v_{\text{с}}) = \frac{2B}{\sqrt[7]{n_{\text{к}}^6}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{L^3}} \cdot \sqrt{[(xmL + m') + pZ] \cdot \left[(xnL + n') + \frac{L[(xqL + q')]}{Z} \right]}, \quad (25)$$

$$\text{где } x = \frac{\alpha A}{ZB}.$$

По этому выражению для конструкций, изображенных на рис. 1, 2 и принятых выше для них условий сравнения, что дало постоянные коэффициенты, приведенные в табл. 1, были построены графики функции $V_{\Sigma} = f(L)$, которые показаны на рис. 3.

Во втором случае, считая величину плотности тока незаданной и зависящей от геометрического соотношения размеров ФУ, можно в соответствии с [4] записать:

$$j = \sqrt[7]{\frac{M_{\text{ж}}^4 \cdot n_{\text{к}} \cdot k_{\text{н}}}{D_{\text{ж}}^2 \cdot P_{1\phi} \cdot k_{\text{с}}^3}}, \quad (26)$$

где

$$D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{1}{4,44f B_{\text{мо}} k_{3\kappa} k_{3\text{с}}}}, \quad (27)$$

$$M_{\text{ж}} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot \Delta \tau_{\text{к}} 10^6}{\rho_{\text{к}} \cdot k_{3\text{с}}}; \quad (28)$$

$\alpha_{\text{к}}$ — усредненный коэффициент теплоотдачи катушек,

$\Delta \tau_{\text{к}}$ — установившаяся допустимая температура перегрева катушек,

$\rho_{\text{к}}$ — удельное сопротивление материала катушек.

С учетом (26) ÷ (28) получим новое выражение для экономического показателя:

$$\mathcal{E} = \frac{k_{3\text{с}}}{P_{\text{н, вых}}} \cdot \sqrt[7]{\frac{D_{12}^{12} \cdot P_{1\phi}}{M_{\text{ж}}^3}} \cdot \frac{1,4 \cdot B (a_1 + pZ)}{\sqrt[7]{\left[\frac{2Z(a_1 + pz)}{5(a_2Z + a_3L)} \right]^2 (n_{\text{х}}^2 ZL)^3}} \quad (29)$$

$$\text{где } a_1 = xmL + m', \quad a_2 = xnL + n, \quad a_3 = xqL + q'.$$

В выражении (29), как и в (23), тоже можно выделить функцию, зависящую только от соотношения геометрических размеров ФУ. Ее можно назвать безразмерным объемом аппарата при незаданной плотности тока, и она будет иметь вид:

$$v_{\Sigma j} = \frac{1,4 \cdot B (a_1 + pZ)}{\sqrt[7]{\left[\frac{2Z (a_1 + pZ)}{5 (a_2 Z + a_3 L)} \right]^2 (n_K^2 Z L)^3}}. \quad (30)$$

Графики этой функции для однофазных ТРПШ, изображенных на рис. 1, 2 и с постоянными коэффициентами — в табл. 1, приведены на рис. 4, 5, 6, 7.

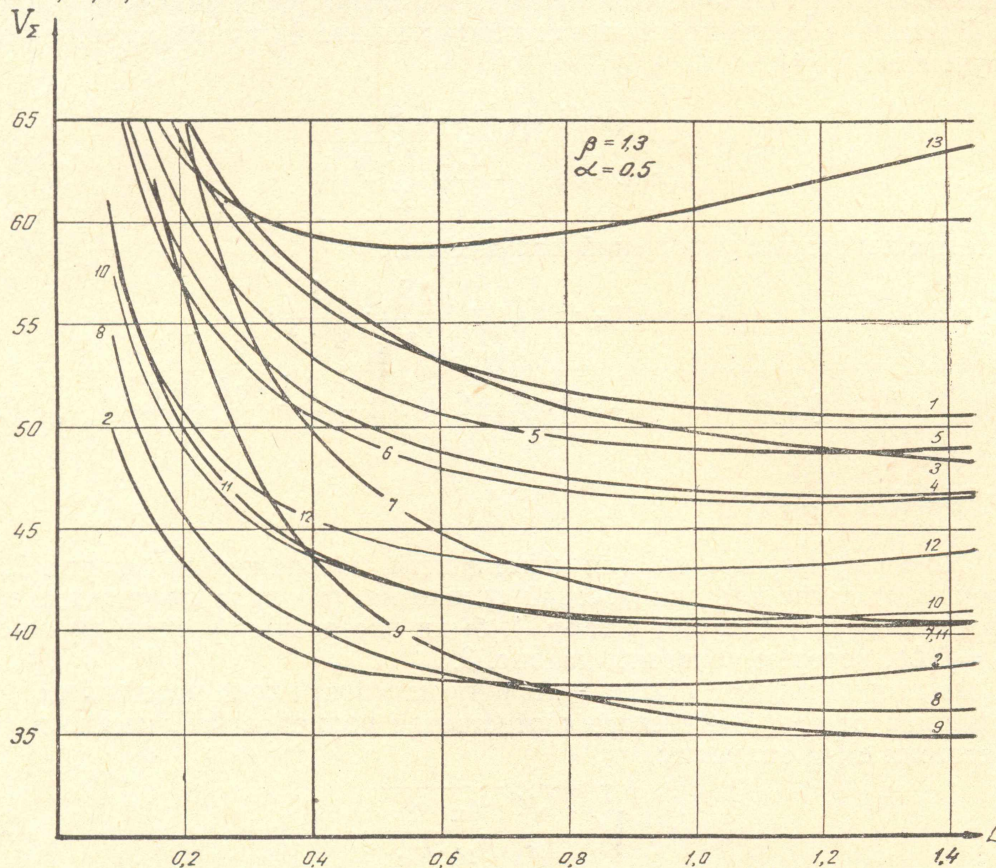


Рис. 3.

Для возможности всестороннего сравнения удельно-весовых показателей ТРПШ на рис. 1, 2 авторами с помощью вычислительной машины «Проминь» были просчитаны по выражениям (25, 30) кривые безразмерных объемов v_{Σ} и $v_{\Sigma j}$ для трех критериев минимума веса при медных обмотках, что соответствует значению $\alpha=0,5$ минимума объема, когда $\alpha=1$, и минимума стоимости, что соответствует $\alpha=2$. Для каждого из критериев задавались разные относительные сечения шунтов β от 1,3 до 0,6. Объем статьи не позволяет провести всех полученных кривых и здесь дается лишь часть из них, необходимая для иллюстрации основных выводов, полученных при проведенном анализе. Поскольку качественная картина у графиков $v_{\Sigma j}=f(L)$ при незаданной плотности тока и $v_{\Sigma}=f(L)$, когда она задана, в большинстве случаев получалась одинаковой, кривые безразмерных объемов для независимой геометрии нами приведены лишь на одном рис. 3.

По результатам проведенных исследований можно сказать, что при прочих равных условиях и если напряжение первичных обмоток меняет-

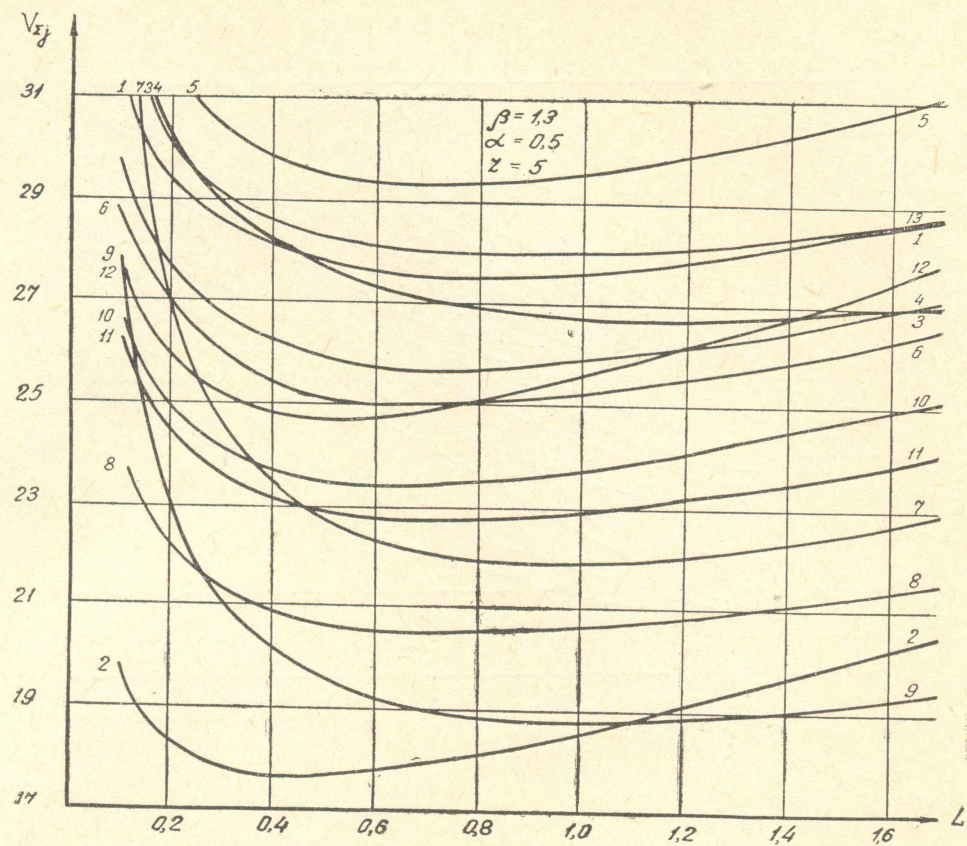


Рис. 4

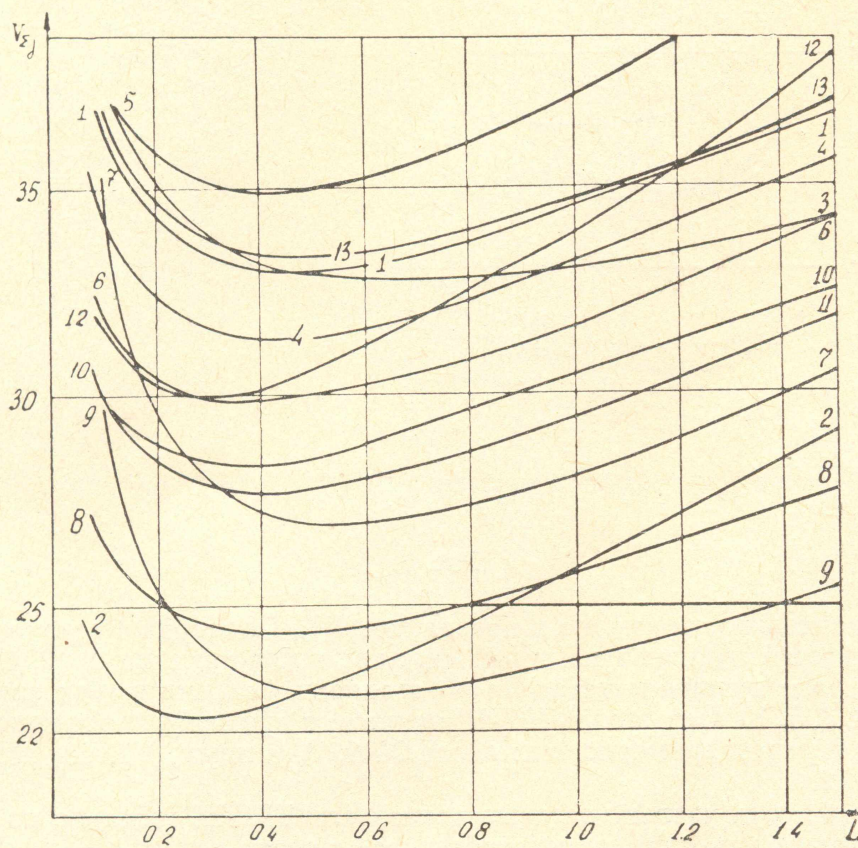


Рис. 5

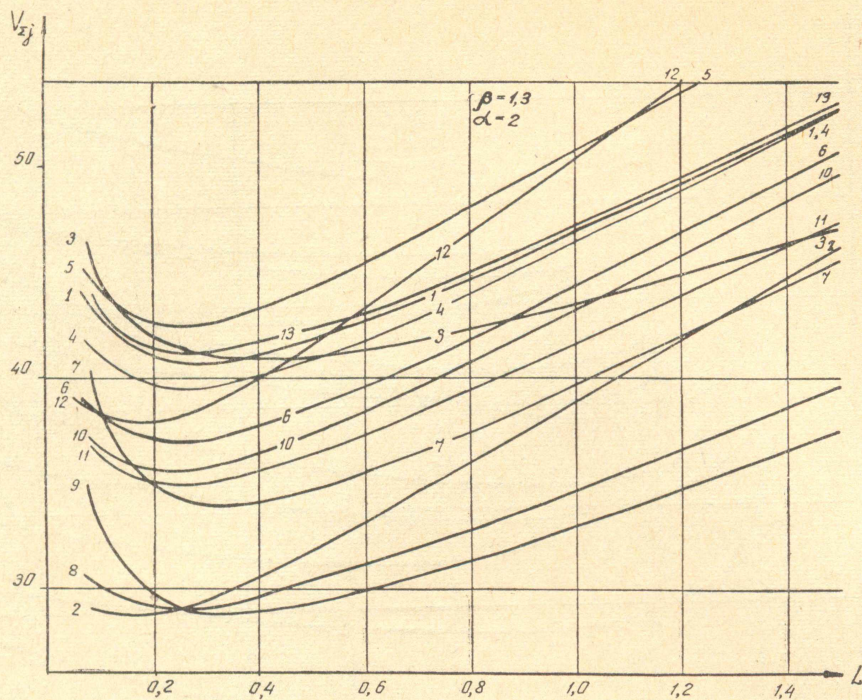


Рис. 6.

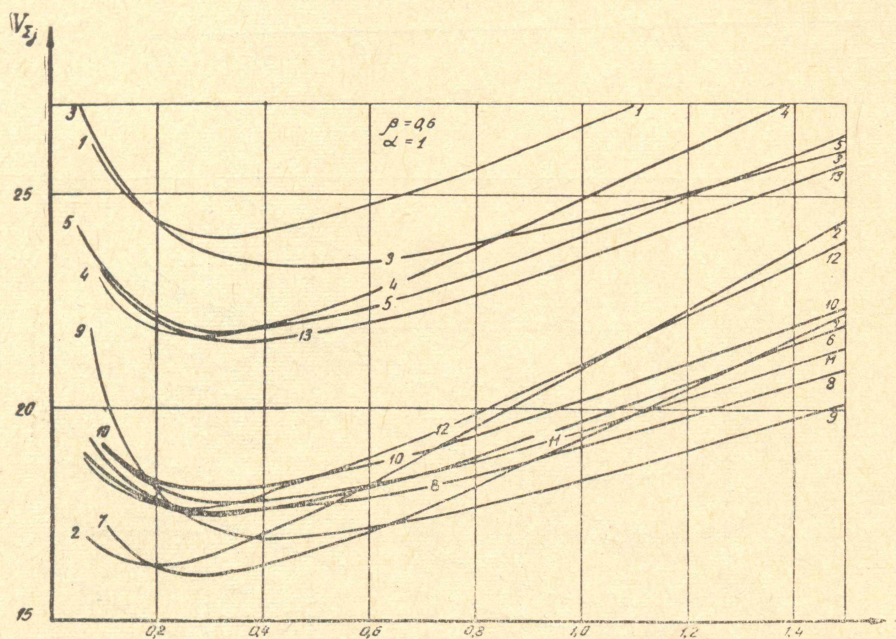


Рис. 7.

ся незначительно, примерно в пределах $\pm 5\%$ (оговорка будет пояснена ниже), всегда лучшими данными обладают конструкции № 2, 8, 9. В 1,3÷1,5 раза худшие показатели по сравнению с ними имеют конструкции № 1, 3, 5, 13. Остальные ТРПШ занимают промежуточное положение и группируются примерно так: после № 2, 8, 9 идут № 7, 10, 11, затем № 4, 6, 12.

Анализируя удельно-весовые показатели ТРПШ отдельно по критериям, следует отметить их некоторые особенности.

Прежде всего, экстремумы кривых v_2 и v_{2j} для некоторых конст-

рукций перемещаются по взаимному расположению. Например, экстремум V_2 конструкции № 2 при независимой геометрии лежит выше экстремума таких же кривых конструкций № 8 и 9 (рис. 3). При геометрии с заданной плотностью тока картина меняется на обратную — экстремум кривой v_{2j} под номером 2 лежит значительно ниже, чем у кривых № 8, 9 (рис. 4). Такая же картина наблюдается на рис. 3, 4 для кривых 5, 13. Объясняется это тем, что сравниваемые конструкции имеют различные поверхности охлаждения, и если при независимой геометрии ТРПШ это обстоятельство никак не сказывается на удельно-весовых показателях, то при геометрии с заданной плотностью тока у аппаратов, имеющих большую поверхность охлаждения при одном и том же нагреве катушек, вес, габариты, стоимость будут меньше за счет увеличения допустимой плотности тока.

Взаимное расположение и вид графиков функций весовых показателей зависят также от величин α . Это можно увидеть, сравнивая эти кривые для конструкций № 6, 12 и 13, 5 на рис. 4, 5, 6. Характерно, что с увеличением α функции $v_2 = f(L)$ и $v_{2j} = f(L)$ имеют более четко выраженную область минимальных значений.

Более существенно на расположение графиков безразмерных объемов влияет глубина регулирования, то есть величина β (сравните рис. 5 и рис. 7). Здесь обращает на себя внимание тот факт, что с уменьшением глубины регулирования удельные весовые показатели ряда конструкций выравниваются (на рис. 7 кривые 4, 5, 13; 1, 3; 2, 7). Поэтому для регуляторов с малой глубиной регулирования число конструктивных вариантов ТРПШ с близкими или даже одинаковыми экономическими показателями будет больше, чем для регуляторов с глубоким регулированием. Характерно то, что при малом β лучшей по весовым показателям стала конструкция ТРПШ № 7, которая ранее занимала промежуточное положение. По-прежнему здесь хорошими данными обладает ТРПШ № 2 и явно худшими остаются конструкции № 1, 3, 5, 13, присоединяется к последним теперь и ТРПШ № 4.

Проанализируем несколько подробнее показатели каждой из конструкций ТРПШ на рис. 1, 2.

Прежде всего следует отметить, что все их можно разбить на две группы, одна из которых состоит из устройств, развитых на основе броневого ТРПШ конструкции № 1 (см. № 1, 3, 4, 5, 6), другая — на основе стержневого ТРПШ конструкции № 2 (см. № 7—13). Посмотрим, целесообразно ли применение в автоматических установках всех представленных нами конструкций ТРПШ, если взвешивать не только их удельно-весовые показатели, но и другие возможные доводы.

Очевидно, что целесообразность применения ТРПШ конструкции № 2 не вызывает сомнения, так как она для всех критериев сравнения имеет лучшие показатели и выполняется на простых П- или Г-образных магнитопроводах.

Аналогичный вывод был получен ранее и другими авторами.

Конструкция ТРПШ № 1 хотя и проигрывает по всем весовым показателям ТРПШ № 2 примерно в 1,3—1,5 раза, может быть также рекомендована для применения, учитывая, что она имеет минимальное число катушек, очень технологична в изготовлении, имеет хорошие конструктивные формы и может быть выполнена на магнитопроводах из Ш-образных пластин, применяемых для дросселей насыщения или обычных трансформаторов.

По-другому обстоят дела с производными конструкциями названных выше ТРПШ. Смело можно не рекомендовать для применения ТРПШ № 4. Очевидно, этот аппарат был создан из побуждений исключить наводку э. д. с. нечетных гармоник в обмотке подмагничивания постоянным током и получился не очень удачным. На рис. 1 показана пунктиром эк-

вивалентная этому ТРПШ комбинация из обычного трансформатора и последовательно включаемого с ним дросселя насыщения. Как видно, последняя имеет с ТРПШ № 4 одинаковый объем активных материалов и более простое исполнение обмоток. Но если в этой комбинации уменьшить ширину окна трансформатора, то она уже выиграет по весу магнитопроводов и еще более выиграет при использовании в ней дросселя более удачной конструкции. Замена системы трансформатор — дроссель подмагничиваемым трансформатором с худшими показателями явно не рациональна.

Подмагничиваемый трансформатор № 5, описанный в [5], был создан тоже с целью иметь в нем обмотку подмагничивания без наводок э. д. с. нечетных гармоник. Дополнительно предусматривалось сократить размеры обмоток переменного тока и иметь один «сочлененный» магнитопровод. Однако полученный эффект привел к значительному ухудшению весовых показателей (по результатам нашего анализа они для этого аппарата наихудшие), и произошло это за счет увеличения объема магнитопровода. Представление о последнем легко получить, сочленив его из двух магнитопроводов ТРПШ № 3, «натянув» главный из них на шунт и оставляя окна под обмотки (см. магнитопровод конструкции № 5 на рис. 1). Обладая двойным магнитным рассеянием [6], ТРПШ № 5 имеет большую глубину регулирования под нагрузкой, за счет чего может быть уменьшено (для равных условий сравнения) сечение его шунта, а следовательно, и весовые показатели. Тем не менее, выигрыш этот не настолько велик, чтобы обеспечить весовые показатели ТРПШ № 5 лучшими, чем у ТРПШ № 4. Таким образом, применение ТРПШ № 5 в автоматических установках тоже нецелесообразно.

Подмагничиваемый трансформатор конструкции № 3 отличается от ТРПШ № 4 и № 5 тем, что имеет на одну обмотку меньше, но зато он теряет свойство компенсации нечетных гармоник потока в шунте и его главный магнитопровод тяжелее такового у ТРПШ № 4, ибо содержит средний стержень. Естественно, что применение ТРПШ № 2 нецелесообразно, так как он является худшим вариантом ТРПШ № 4.

Определенного внимания заслуживает конструкция ТРПШ № 6. Это один из первых отечественных подмагничиваемых трансформаторов. Он имеет один сочлененный магнитопровод, малое количество обмоток и обладает неплохими весовыми показателями. По данным нашего анализа, этот аппарат при относительных сечениях шунта $\beta \leq 0,7$ мало чем отличается по весовым показателям от лучших конструкций № 2, 8, 9. Если учесть еще, что ТРПШ № 6 обладает двойным рассеянием рабочего потока и поэтому имеет дополнительные преимущества по глубине регулирования, то будет понятно, что этот трансформатор заслуживает достойного внимания в смысле его применения. Практика показала, что он особенно хорош как регулятор тока, напряжения или мощности низковольтных установок.

Подмагничиваемые трансформаторы № 10, 11, 12, 13 являются разновидностью ТРПШ № 2 и отличаются от него тем, что у них главный магнитопровод и шунты расположены в одной плоскости. При этом удается сократить число катушек обмотки подмагничивания до двух и уменьшить размеры охватывающей обмотки переменного тока. Одновременно объем сердечников шунтов увеличивается вдвое, что в целом приводит к ухудшению удельно-весовых показателей этих конструкций по сравнению с таковыми для ТРПШ № 2. Даже при оптимальной геометрии сравниваемых ТРПШ это ухудшение составляет $24 \div 78\%$, что можно подсчитать по уровням минимумов функций $v_{2j} = f(L)$ на рис. 4, 5, 6.

Из названных четырех ТРПШ рекомендовать для практического применения следует лишь № 10 и № 12. ТРПШ № 11 отличается от

№ 10 тем, что катушки подмагничивающих обмоток вынесены из-под охватывающих рабочих обмоток на крайние стержни шунтов. У последних при этом уменьшается средняя длина витка, а следовательно, объем и вес. В целом, ТРПШ № 11 получается легче, чем № 10, на 3%, однако, он менее конструктивен, а главное — здесь обмотки подмагничивания имеют плохое потокоцепление с рабочими обмотками. Последние обстоятельства заставляют отдавать предпочтение ТРПШ № 10.

Подмагничиваемый трансформатор конструкции № 12 получится из ТРПШ № 11, если один сердечник шунта внести под внутреннюю рабочую обмотку и «приклеить» к сердечнику главного магнитопровода, а наружной рабочей обмоткой охватить все три сердечника (один главный и два шунта) вместе с расположенными на них обмотками ω_b и ω_n . Естественно, что теперь средняя длина витков ω_b и ω_n станет больше, чем она была бы у ТРПШ № 11 или № 10, увеличится объем катушек этих обмоток. В целом, ТРПШ № 12 даже при оптимальной геометрии имеет на 6% худшие удельно-весовые показатели, чем ТРПШ № 10. Но это не значит, что его не следует применять в автоматических установках. Имея один сочлененный магнитопровод, ТРПШ № 12 получается более компактным, меньшим по габаритам, более технологичным и обладает свойством рассеяния магнитного потока обеими рабочими обмотками, то есть одну и ту же глубину регулирования напряжения под нагрузкой обеспечит при меньшем относительном сечении шунтов, чем конструкции № 10, 11. Уверенно можно не рекомендовать для широкого практического применения конструкцию ТРПШ № 13. Принципиально она ничем не отличается от ТРПШ № 12, но за счет того, что шунты здесь не «приклеиваются» сбоку к главному магнитопроводу, а встраиваются внутри его (см. конфигурацию магнитопроводов ТРПШ № 12, № 13 на рис. 2), то за счет резкого увеличения средней длины последнего увеличивается общий объем стали и ухудшаются все удельно-весовые показатели. Это подтверждается кривыми безразмерных объемов на рис. 4÷7, которые для ТРПШ № 13 везде в числе самых верхних.

Особо следует остановиться на конструкциях ТРПШ № 7, 8, 9. В литературе они рекомендуются как один из самых лучших [7]. К такому выводу можно прийти и анализируя графики на рис. 4—7. На первый взгляд все логично, так как у этих ТРПШ шунты состоят не из двух, а из одной пары стержней. Отсюда следует и ожидаемый выигрыш в весовых показателях.

Однако, если у всех остальных конструкций ТРПШ на рис. 1, 2 максимальное напряжение сети определяет суммарную габаритную мощность параллельного и последовательного элементов (главной части и шунта), то у конструкций № 7, 8, 9 оно определяет только мощность параллельного элемента, независимо от того есть шунт или его нет. Это значит, что ТРПШ № 7, 8, 9 невыгодно использовать как стабилизаторы сетевого напряжения.

Покажем это на примере. Допустим, напряжение сети меняется в пределах $(0,65 \div 1,15) U_{1H}$. Тогда для конструкции № 10 габаритная мощность будет равна:

$$p_{\text{габ.10}} = p_r + p_{\text{ш}} = 0,65p + (1,15 - 0,65)p_{1H} = 1,15p_{1H}.$$

Для конструкции № 8 получим

$$p_{\text{габ.8}} = p_r + p_{\text{ш}} = 1,15p_{1H} + (1,15 - 0,65)p_{1H} = 1,65p_{1H}.$$

Таким образом, габаритная мощность, а следовательно, и удельно-весовые показатели ТРПШ № 3 будут больше по сравнению с ТРПШ № 10 в $1,65 - 1,15 = 1,5$ раза. Даже с учетом того, что ТРПШ № 8 при постоянном напряжении сети имеет перед ТРПШ № 10 меньший относительный объем примерно в 1,24 раза. В общем для нашего примера он

будет иметь худшие удельно-весовые показатели в $1,5:1,24=1,21$ раза. Следует полагать, что рекомендации о применении ТРПШ № 7, 8, 9, как лучших конструкций для стабилизаторов напряжения, данные в [7], весьма сомнительны.

Выводы

1. Из всего многообразия существующих конструктивных вариантов однофазных ТРПШ для практического применения в автоматических установках можно рекомендовать только несколько:

а) конструкцию № 2, как имеющую по всем критериям сравнения лучшие показатели;

б) ТРПШ № 6 и № 12, которые обладают свойством двойного рассеяния рабочего потока, обеспечивающим дополнительное увеличение глубины регулирования, и имеют хорошие удельно-весовые показатели, технологичны, конструктивны, компактны;

в) конструкцию ТРПШ № 10, обладающую свойствами ТРПШ № 12, но которую можно изготавливать на магнитопроводах из типовых пластин П, Г и С-образной формы, используемых для ферромагнитных устройств других типов (трансформаторов, дросселей насыщения и т. д.).

2. Все остальные конструкции ТРПШ обладают заметно худшими показателями и их применение может быть целесообразным лишь в особо оговариваемых случаях. Например, иногда удобно использовать броневой ТРПШ № 1, который имеет малое число катушек, технологичен в изготовлении и может быть выполнен на магнитопроводах из стандартных Ш-образных пластин, что существенно облегчает выполнение ТРПШ в условиях электромастерских и экспериментальных лабораториях.

3. Используемая в данной работе методика сравнительной оценки удельно-весовых показателей ТРПШ, дополненная анализом этих аппаратов по другим критериям, позволила сделать теоретически обоснованный выбор наиболее рациональных конструкций однофазных подмагничиваемых трансформаторов с шунтами. Эту методику можно использовать в дальнейшем для сравнительной оценки трехфазных ТРПШ, а также ферромагнитных устройств другого типа — умножителей, подмагничиваемых дросселей насыщения и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро, О. Д. Гетмоненко. Определение оптимальных конструкций трансформаторов и автотрансформаторов, регулируемых подмагничиванием, и их расчет. Труды ГПИ им. Жданова, т. XVIII, вып. 1, 1962.
2. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро. Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием. «Энергия», 1965.
3. А. Х. Тигранян. Об оптимальной конструкции трансформаторов, регулируемых подмагничиванием. ИНВУЗ. — «Электромеханика», 1964, № 4.
4. В. П. Обрусник, В. Г. Киселев. Вопросы оптимальной геометрии однофазных подмагничиваемых трансформаторов. Труды шестой научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства, т. II, Изд-во ТГУ, 1969.
5. В. П. Обрусник. Новый вариант конструкции трансформатора, регулируемого подмагничиванием. «Известия ТПИ», т. 161, 1966.
6. В. П. Обрусник, А. И. Зайцев. Вопросы теории и применения трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов. «Известия ТПИ», т. 117, 1963.
7. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро. Стабилизаторы с подмагничиваемыми трансформаторами. «Энергия», 1965.