ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 153 1965

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРОВ, РЕГУЛИРУЕМЫХ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТОВ

В. П. ОБРУСНИК

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Несмотря на то, что трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов (ТРПШ), широко и успешно применяются в ряде промышленных установок, анализ режимов работы и статических характеристик этих аппаратов пока не описан в литературе с достаточной ясностью. Известные статьи [1, 2] не дают правильного представления даже о принципе работы ТРПШ, так как в них не раскрывается физическая сущность действительных процессов, происходящих в трансформаторах с подмагничиваемыми шунтами. Автором сделана попытка изложить эти вопросы в таком плане, чтобы специалисты, занимающиеся проектированием и эксплуатацией автоматических систем с магнитными регуляторами, могли получить о регулировочных возможностях ТРПШ более, полное и правильное представление.

Исследования показывают, что хотя для работы ТРПШ свойственно перераспределение потоков (между основным магнитопроводом и шунтом), а для комбинаций из трансформатора и подмагничиваемого дросселя насыщения — перераспределение напряжений (между дросселем и трансформатором), оба регулятора имеют одинаковые законы изменения своих выходных величин — тока и напряжения нагрузки.

Покажем это сначала на режимах работы и статических характеристиках ТРПШ, имеющих магнитопроводы с безгистерезисной кривой намагничивания прямоугольной формы, полагая, что напряжение питающей сети синусоидально, нагрузка активная, индукция в основном магнитопроводе при полном насыщении шунтов не выходит за колено насыщения и сопротивление подмагничивающих обмоток ничтожно мало для токов четных гармоник. При этих допущениях схемы замещения для трех разновидностей ТРПШ [3] могут быть представлены рисунками 1а, б, в, где до насыщения шунтов X_{12}, X_{1s}, $X'_{2s} = \infty$, после насыщения — $X_{1s} = X'_{2s} = 0$, $X_{12} = \infty$.

Рассуждения будем вести, разбив режимы работы трансформатора на несколько состояний.

Состояние 1: нагрузка отключена, подмагничивания шунтов нет. Здесь общий поток ТРПШ распределяется пропорционально сечениям магнитопроводов, расположенным внутри первичной обмотки.

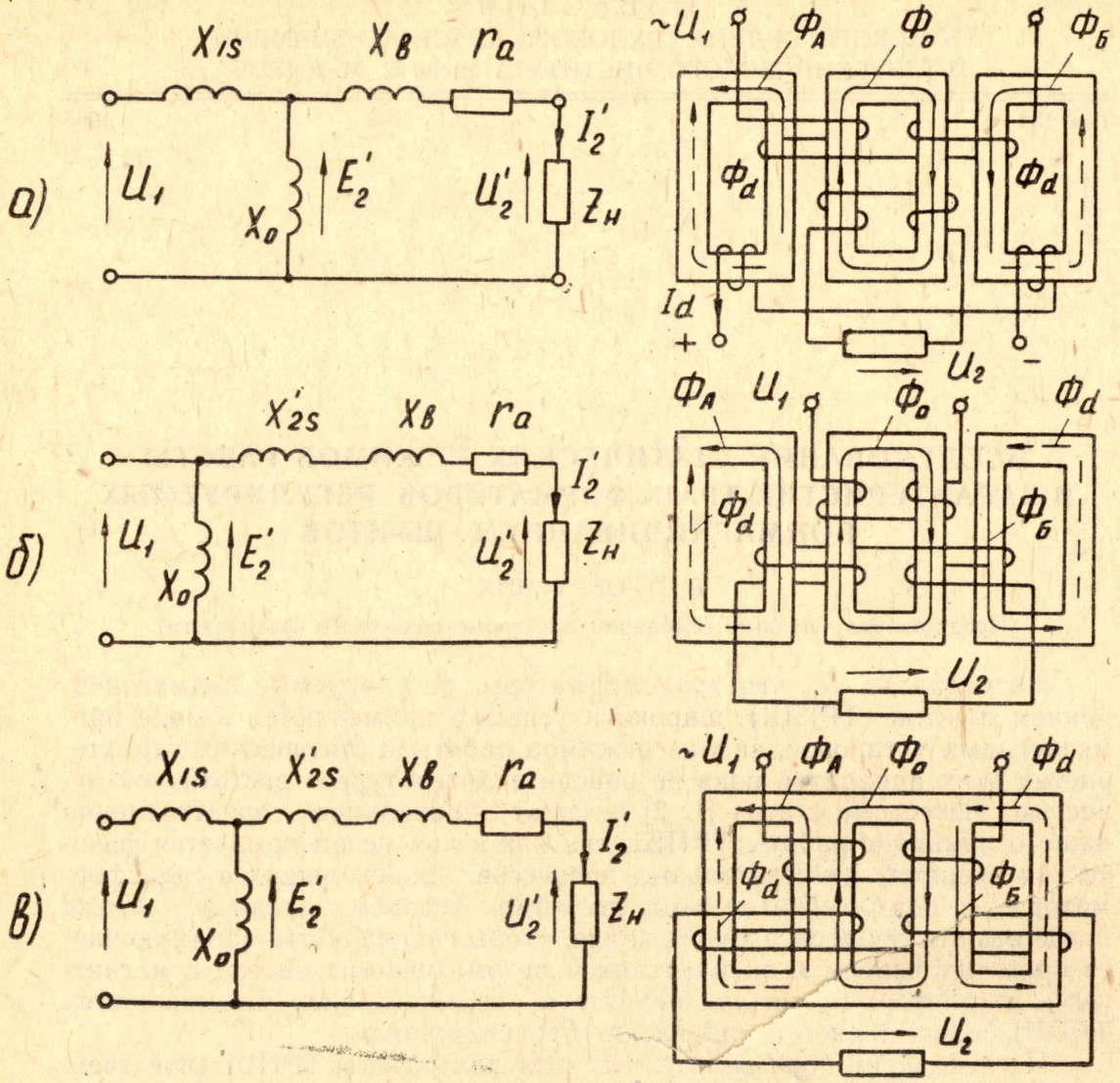

Рис. 1.

Часть его, замыкающаяся по основному магнитопроводу, сцепляется с витками вторичной обмотки и наводит в ней синусоидальную э. д. с.

для рис. 1 а, в
$$E_{2xx} = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{S_0}{S_ш + S_0}, \qquad (1)$$

для рис. 1 б:
$$E_{2xx} = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1}, \qquad (2)$$

где S_0, $S_ш$ — соответственно, сечение основного магнитопровода и шунта.

Э. д. с. хлостого хода будет несинусоидальной лишь в случаях, если индукция насыщения шунта или основного магнитопровода меньше индукции холостого хода, то есть

$$B_{s0} \text{ или } B_{sш} < B_{xx} = \frac{U_1}{4{,}44 f_1 \cdot W_1 \cdot (S_ш + S_0)}. \qquad (3)$$

Для ТРПШ это исключается, так как основной магнитопровод рассчитывается из условия:

$$U_1 \leqslant B_{so} \cdot S_o \cdot W_1 \cdot 4{,}44 f_1, \qquad (4)$$

следовательно, всегда

$$B_{so} \geqslant B_{xx} \cdot \frac{S_ш + S_o}{S_o}. \qquad (5)$$

Состояние 2: нагрузка включена, подмагничивания нет.

При замкнутой вторичной цепи, трансформатор стремится сбросить нагрузку. Поэтому, если

$$S_ш \geqslant \frac{U_1}{4{,}44 f_1 \cdot W_1 \cdot B_{sш}},$$

то у ТРПШ со схемами на рис. 1а, в весь поток будет замыкаться через шунт, а со схемой на рис. 1 б — внутри вторичной обмотки происходит вычитание основного потока и потока шунта. В обоих случаях коэффициент трансформации равен нулю и $E_2 = 0$.

Если $$S_ш \leqslant \frac{U_1}{4{,}44 f_1 \cdot W_1 \cdot B_{sш}},$$

то сказанное выше справедливо лишь до момента насыщения шунта, после чего изменение потока будет наблюдаться только в основном магнитопроводе и коэффициент трансформации скачком возрастает до значения виткового коэффициента $K_т = W_1/W_2$. Форма вторичной э. д. с. при активной нагрузке показана пунктиром на рис. 5. Здесь угол насыщения α_{so} и эффективное значение вторичной э. д. с. можно найти из выражений

$$\alpha_{so} = \text{arc Cos}\left(1 - 2\frac{U_{sш}}{U_{xs}}\right), \qquad (4)$$

$$E_{2мин} = \frac{U_1}{K_т} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha_{so} + \frac{1}{2}\text{Sin}\, 2\alpha_{so}\right)}, \qquad (5)$$

где $U_{sш}$ — напряжение, при котором должно наступить насыщение шунта,

$$U_{sш} = 4{,}44 \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot B_{sш} \cdot S_ш; \qquad (6)$$

U_{xs} — фактическое напряжение, определяющее индукцию сердечников шунта

$$U_{xs} = U_1 \cdot \frac{X_s}{Z_{вх}} = U_1 \cdot K_z; \qquad (7)$$

$Z_{вх}$ — сопротивление на входе схемы замещения;

X_s — сопротивление магнитного рассеяния, равное X_{1s} для схем на рис. 1 а, в и X'_{2s} для схемы на рис. 1б.

В рассматриваемом случае для схем на рис. 1 а, б $K_z = 1$, для схемы на рис. 1 в $K_z = \frac{1+\beta}{2+\beta}$, где $\beta = S_ш/S_o$.

Наклон внешней характеристики при изменении нагрузки будет определяться только потерями на расстояние по воздуху и в активном сопротивлении рабочих обмоток. Например, выражение для напряжения на активном сопротивлении нагрузки имеет вид:

$$U_2 = E_{2мин} \cdot \frac{R'_н}{\sqrt{X^2_b + (r_a + R'_н)^2}}, \qquad (8)$$

где $X_b = X_{1b} + X'_{2b}$; $r_a = r_1 + r'_2$.

На рис. 2 показано, что при включении нагрузки рабочая точка скачком переместится от $E_{2хх}$ до $E_{2мин}$ и затем по внешней характеристике неподмагниченного трансформатора перейдет в точку ее пересечения с вольтамперной характеристикой нагрузки (траектория 1—3—3').

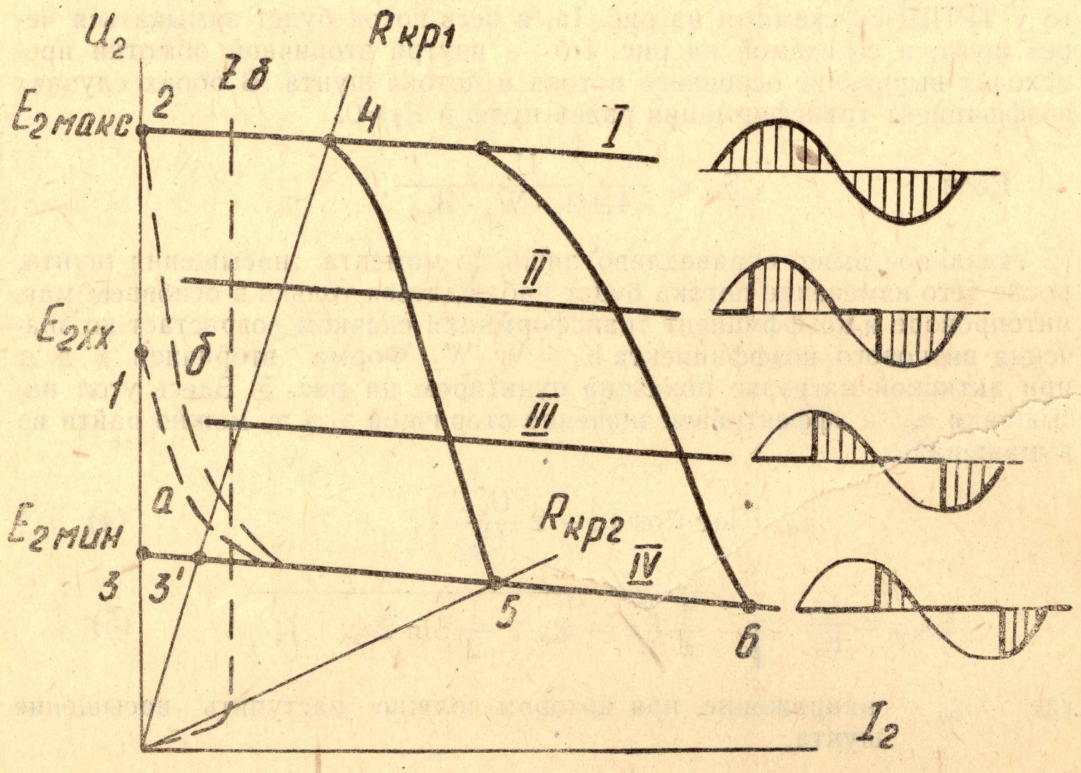

Рис. 2.

Состояние 3: нагрузка отключена, подмагничиваются шунты или основной магнитопровод.

Прежде всего, если один из двух магнитопроводов (основной или шунт) подмагничивается постоянным током, то неподмагничиваемый магнитопровод должен иметь сечение, позволяющее пропускать весь переменный поток при амплитудном значении индукции меньшем индукции насыщения. Иначе неизбежен большой ток холостого хода, который придется ограничивать балластным сопротивлением в первичной цепи.

При выполнении указанного условия для ТРПШ на рис. 1 а, в достаточно малейшего подмагничивания шунта, чтобы весь поток вытеснить в основной магнитопровод или наоборот, — подмагничивая последний, весь поток вытеснить в шунт. В первом случае вторичная

э. д. с. скачком вырастет от E_{2xx} до $E_{2макс}$, во втором — уменьшится от E_{2xx} до 0. Плавное регулирование выходного напряжения на холостом ходу при безгистерезисной прямоугольной кривой намагничивания невозможно.

Для ТРПШ на рис. 1 б подмагничивание при разомкнутой вторичной обмотке не имеет смысла.

Состояние 4: нагрузка включена, подмагничиваются шунты.

Картина изменения основных величин для этого состояния показана на рис. 3.

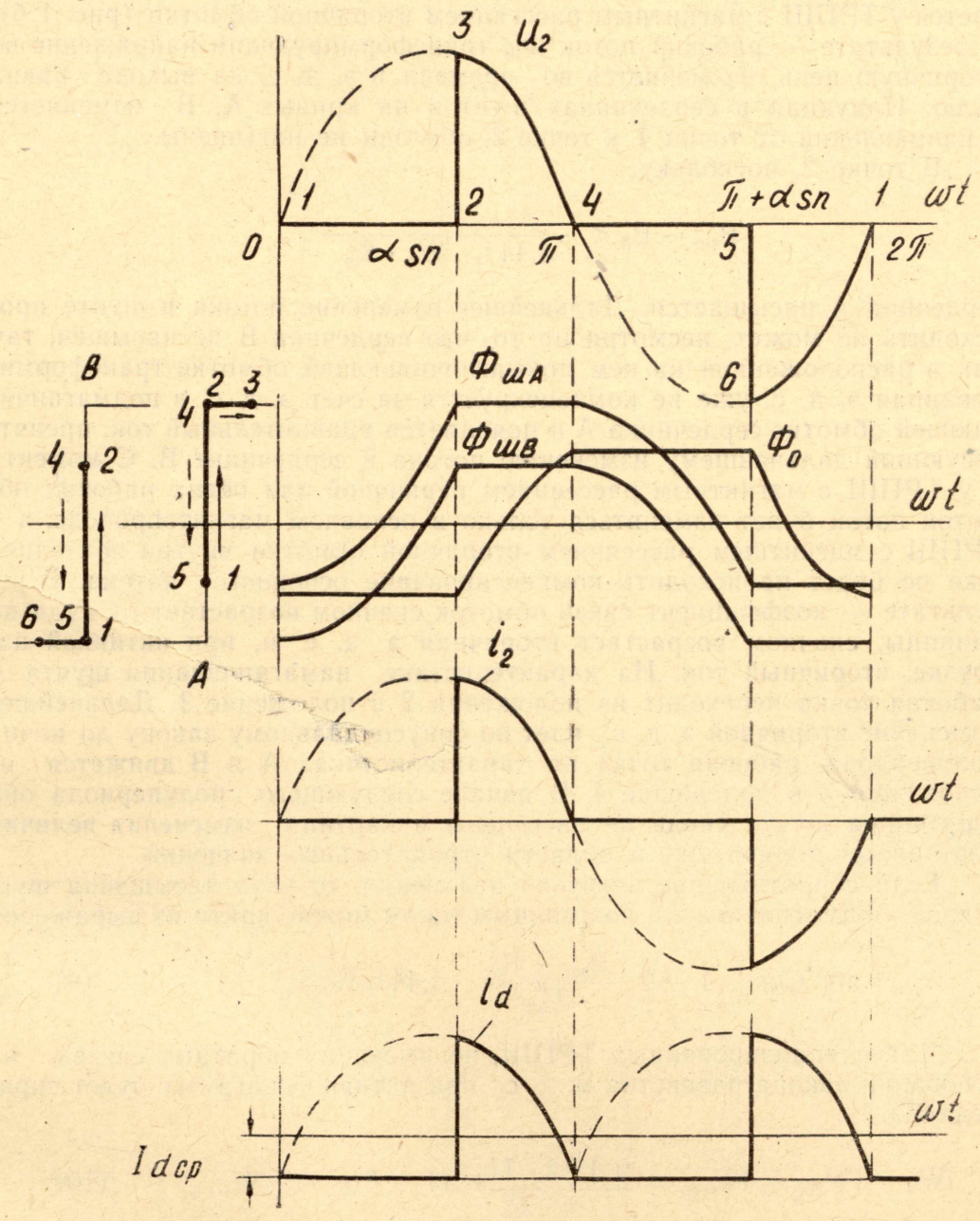

Рис. 3.

Здесь характерно периодическое скачкообразное изменение коэффициента связи между рабочими обмотками. Пока шунты не насыщены, коэффициент трансформации равен нулю; при насыщении шунтов он скачком возрастает до виткового коэффициента $K_т = W_1/W_2$. В момент,

когда амплитудное значение первичного напряжения равно нулю, оба сердечника шунта не насыщены, а их индукция определяется постоянной составляющей B_d, что соответствует некоторому положению точки 1 на идеализированных кривых намагничивания А и В. С возрастанием амплитуды первичного напряжения поток в основном магнитопроводе либо вообще не изменяется, замыкаясь через сердечники шунтов, что будет справедливо для ТРПШ с магнитным рассеянием первичной или обеих рабочих обмоток (рис. 1 а, в), либо его изменение компенсируется внутри вторичной обмотки изменением потока шунта, что наблюдается у ТРПШ с магнитным рассеянием вторичной обмотки (рис. 1 б). В результате — рабочий поток Φ_0, трансформирующий напряжение во вторичную цепь, не меняется во времени и э. д. с. на выходе равна нулю. Индукция в сердечниках шунтов на кривых А, В изменяется в направлении от точки 1 к точке 2, оба они не насыщены.

В точке 2, поскольку

$$B_{sш} - B_d < \frac{U_1}{4{,}44\, f_1 \cdot W_1 \cdot S_ш},$$

сердечник А насыщается. Дальнейшее изменение потока в шунте происходить не может, несмотря на то, что сердечник В не насыщен, так как в расположенной на нем подмагничивающей обмотке трансформированная э. д. с. уже не компенсируется за счет э. д. с. в подмагничивающей обмотке сердечника А и появляется уравнительный ток, препятствующий дальнейшему изменению потока в сердечнике В. С момента 2 у ТРПШ с магнитным рассеянием первичной или обеих рабочих обмоток поток будет изменяться только в основном магнитопроводе, а у ТРПШ с магнитным рассеянием вторичной обмотки внутри последней уже не будет происходить компенсирование основного потока. В результате — коэффициент связи обмоток скачком возрастает от нуля до единицы, скачком возрастает вторичная э. д. с. и, при активной нагрузке, вторичный ток. На характеристике намагничивания шунта А рабочая точка переходит из положения 2 в положение 3. Дальнейшее изменение вторичной э. д. с. идет по синусоидальному закону до конца полупериода, рабочая точка на характеристиках А и В движется из положения 3 в положение 4. В начале следующего полупериода оба сердечника шунта снова не насыщены и картина изменения величин повторяется только уже в области отрицательных значений.

Если сопротивление нагрузки неизменно, то угол насыщения шунтов при подмагничивании постоянным током можно найти из выражения

$$\alpha_{sn} = \text{arc Cos}\left(1 - 2\,\frac{B_{sш} - B_d}{U_{xs}} \cdot 4{,}44\, f_1 W_1 S_ш\right). \qquad (9)$$

Для идеализированных ТРПШ, не имеющих обратных связей, на основании закона равенства м. д. с., при активной нагрузке будет справедливо

$$IW_d = IW_{2ср} = IW_{1ср} = \frac{2\sqrt{2}\cdot U_{xs}}{\pi \cdot R}(1 + \text{Cos}\,\alpha_{sn})\, W_1, \qquad (10)$$

где $R = R'_н + r_a$, а X_b — принимается равным 0,

Из выражения (10) можно получить

$$\alpha_{sn} = \text{arc Cos}\left(2\,\frac{IW_d R}{0{,}9 \cdot K_z \cdot U_1 W_1} - 1\right). \qquad (11)$$

Анализ равенства (11) показывает, что изменение угла насыщения шунта идеализированного ТРПШ ограничивается определенными значениями сопротивления рабочей цепи и тока подмагничивания.

Если общее сопротивление рабочей цепи ТРПШ изменяется от ∞ до

$$R_{кр1} = \frac{K_z \cdot 0.9\, U_1 W_1}{IW_d} \quad \text{при } IW_d = \text{const},$$

или подмагничивающий ток I_d изменяется от

$$I_{dкр2} = \frac{0.9 K_z U_1 \cdot W_1}{W_d \cdot R} \quad \text{и выше при } R = \text{const},$$

то угол насыщения равен 0, ток нагрузки синусоидален и определяется выражением

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X^2_b}}. \qquad (12)$$

При изменении R от

$$R_{кр2} = \frac{(\text{Cos}\alpha_{so} + 1) \cdot 0{,}9 K_z\ U_1 W_1}{2IW_d} \quad \text{и ниже, когда } IW_d = \text{const},$$

или изменении I_d от

$$I_{dкр1} = \frac{(\text{Cos}\alpha_{so} + 1) \cdot 0.9 U_1 K_z W_1}{2W_d \cdot R} \quad \text{и ниже, когда } R = \text{const},$$

угол насыщения остается неизменным и равным α_{so}, а ток нагрузки определяется выражением

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X_b^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha_{so} + \frac{1}{2} \cdot \text{Sin}2\alpha_{so}\right)}. \qquad (13)$$

Внешняя характеристика идеализированного ТРПШ без обратных связей при $IW_d = \text{const}$ имеет вид ступенчатой кривой, показанной на рис. 3 цифрами 2, 4, 5, 6. Здесь, при $R_{кр1} > R > R_{кр2}$ угол насыщения шунта автоматически меняется согласно (11), обеспечивая по закону равенства м. д. с. постоянство среднего значения тока нагрузки, эффективное значение которого при этом равно

$$I_{2эф} = I_{2ср} \cdot K_f = I_d \cdot \frac{W_d}{W_2} \cdot K_f, \qquad (14)$$

где

$$K_f = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}\left(\pi - \alpha_{sn} + \frac{1}{2}\,\text{Sin}\,2\alpha_{sn}\right)}}{1 + \text{Cos}\,\alpha_{sn}}. \qquad (15)$$

С введением положительной обратной связи по току влияние сопротивления нагрузки на угол насыщения шунтов заметно снижается и совершенно исчезает при коэффициенте обратной связи, равном единице, что видно из выражения

$$\alpha_{sn} = \text{arc Cos}\left(\frac{2IW_d}{K_z\ U_1\, 0{,}9 W_1 (1 - K_{oc})} - 1\right). \qquad (16)$$

При положительной обратной связи по току с коэффициентом связи, равном единице, угол насыщения зависит только от управляющего сигнала, меняющего постоянную составляющую индукции насыщения, поэтому для каждого значения подмагничивающего тока можно получить внешнюю характеристику ТРПШ, жесткость которой будет определяться потерями на рассеяние по воздуху и в активном сопротивлении рабочих обмоток (см. I. II, III, IV на рис. 2). Эти характеристики аналогичны внешним характеристикам обычного трансформатора, регулируемого за счет витков вторичной обмотки и отличаются от последних лишь формой выходного напряжения.

Как видно, у ТРПШ можно получить характеристики двух типов: характеристики регулятора тока, когда трансформатор не имеет обратных связей, и характеристики регулятора напряжения, если он выполнен с глубокой обратной связью по току. В точках пересечения эти характеристики имеют одинаковые значения угла насыщения. Уменьшение выходного напряжения ТРПШ всегда связано с увеличением угла насыщения, а тем самым и с уменьшением коэффициента мощности аппарата, который при глубоком регулировании может достигать весьма малых величин.

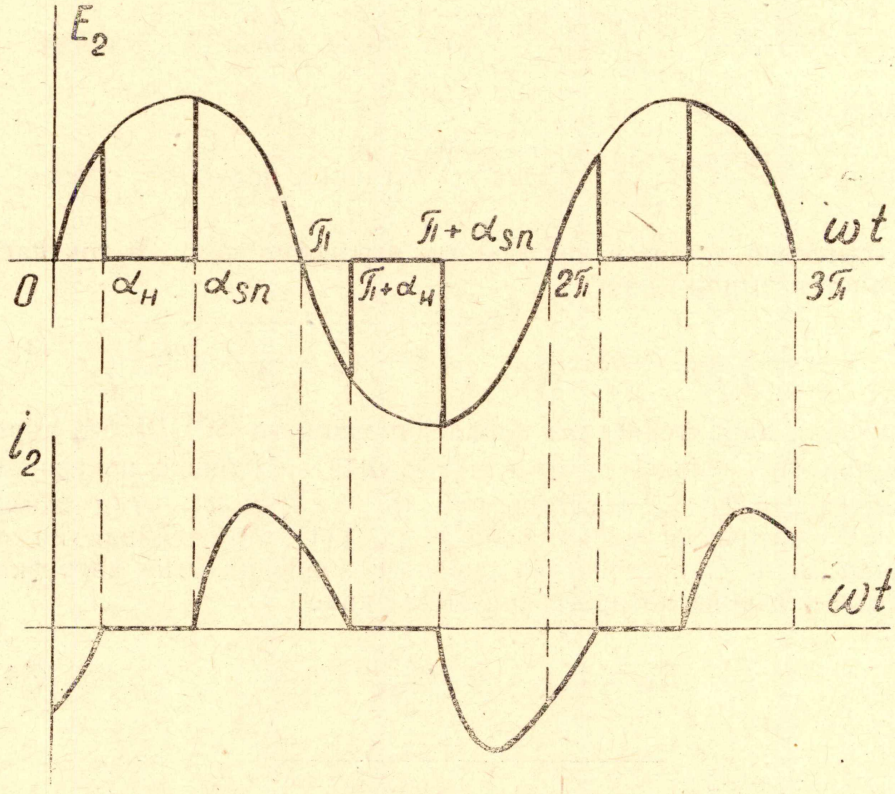

Рис. 4.

Характеристики ТРПШ существенно зависят от вида нагрузки. Например, при чисто индуктивной или активно-индуктивной нагрузке, когда $Z_н << X_{1s}$, X'_{2s}, картина изменения выходных величин будет иметь вид на рис. 4. В момент насыщения шунтов мгновенное значение вторичной э. д. с. скачком возрастает от нуля до $U_1 \sqrt{2} \frac{W_2}{W_1} \cdot \mathrm{Sin}\alpha_{sn}$, но ток нарастает постепенно, и к концу полупериода он не равен нулю. Во втором полупериоде за счет спадающего тока индуктивности на-

грузки поток в основном магнитопроводе некоторое время уменьшается и во вторичной обмотке наводится э. д. с. до тех пор, пока ток нагрузки не спадет до нуля, после чего коэффициент связи между обмотками станет равным нулю. Поскольку изменятся кривые выходных величин, то изменятся их эффективные значения, изменится вид внешних и нагрузочных характеристик. Но следует подчеркнуть, что сам принцип регулирования ТРПШ, принцип управления моментом насыщения шунтов, сохраняется при любом характере нагрузки.

Кривые на рис. 3, 4, 5 хорошо подтверждаются осциллограммами при изготовлении магнитопроводов ТРПШ из пермаллойных и даже текстурованных сталей.

Оставляя в силе сделанные выше допущения, проанализируем теперь работу ТРПШ на активную нагрузку, апроксимируя кривую намагничивания кусочно-линейной функцией, имеющей при $B \leqslant B_s$, $B/H \neq \infty$ и при $B > B_s$, $B/H = 0$. Будем полагать также, что качество всех магнитопроводов одинаково. Тогда до насыщения шунтов

$$X_{1s} = X'_{2s} = \varepsilon X_{12} = 2\pi f_1 \cdot w_1^2 \frac{S_ш}{l_ш} \cdot \frac{B_{ms}}{H_{ms}}, \qquad (17)$$

где $\varepsilon = \dfrac{S_ш \cdot l_o}{S_o \cdot l_ш}$ — безразмерный коэффициент.

l_o, $l_ш$ — длина силовой линии основного магнитопровода и шунта.

На холостом ходу при отсутствии подмагничивания вторичная э. д. с. трансформатора будет определяться выражением

$$E_{2xx} = \frac{W_2}{W_1} U_1 \frac{X_{12}}{X_{1s} + X_{12}} = \frac{U_1}{K_т(1+\varepsilon)}. \qquad (18)$$

При включении нагрузки и отсутствии подмагничивания вторичная э. д. с. не может сразу принять значение, определяемое выражением (5), поскольку X_{1s}, X'_{2s} и X_{12} не равны бесконечности.

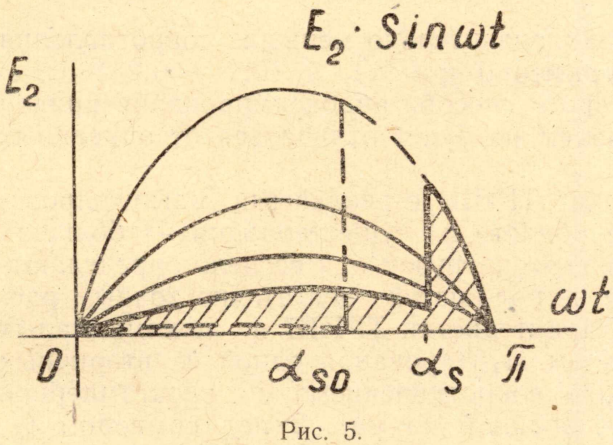

Рис. 5.

До определенного сопротивления нагрузки, обозначим его $R_{нs}$, шунт не насыщается: на выходе будет синусоидальное напряжение, амплитудное значение которого уменьшается с уменьшением $R_н$. При $R_н \leqslant R_{нs}$ шунт начинает насыщаться и форма выходного напряжения приобретает вид кривой, огибающей на рис. 5 заштрихованную площадку. Когда $R_н << R_{нs}$, она приближается к кривой, показанной пунктиром и определяемой выражениями (4,5).

Значение $R_{нs}$ можно найти из схем замещения, полагая

$$(U_{2xs};\ U_{1xs}) = 4{,}44 f_1 \cdot W_1 \cdot B_{sш} \cdot S_ш$$

и считая, что X_{1s}, X'_{2s} и X_{12} определяются из выражения (17).

Например, для схемы на рис. 1 б можно получить,

$$R'_{нs} = X_{12} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_{xs}}\right)^2 - 1}. \qquad (19)$$

Внешние характеристики здесь состоят из двух участков. При значениях сопротивления $R_н \geqslant R_{нs}$ выходное напряжение рассчитывается из схем замещения обычным способом, а при $R_н < R_{нs}$ его следует определять уже как средне-квадратичную площадь кривой, состоящей из двух усеченных синусоид (см. заштрихованную площадку на рис. 5) и тогда

$$U'_2 = \frac{R'_н}{\sqrt{X^2_b + R^2}} \cdot \sqrt{E^2_{2дн} \cdot \frac{1}{\pi}\left(\alpha_{so} - \frac{1}{2}\sin 2\alpha_{so}\right) + E^2_{2пн} \cdot \frac{1}{\pi} \times \rightarrow}$$

$$\rightarrow \times \left(\pi - \alpha_{so} + \frac{1}{2}\sin 2\alpha_{so}\right)}, \qquad (20)$$

где $E_{2дн}$, $E_{2пн}$ — соответственно, э. д. с. вторичной обмотки, найденные из схем замещения при не насыщенных и насыщенных шунтах.

Значение α_{so} в выражении (20) определяется по (4). Если построить характеристики, то на рис. 2 они будут иметь вид кривых а, б, обозначенных согласно схемам замещения.

У ТРПШ с реальными магнитопроводами возможно плавное регулирование напряжения холостого хода, так как потери в стали здесь выполняют роль балластной нагрузки. Для вытеснения переменного потока из подмагничиваемого магнитопровода потребуется ток, удовлетворяющий равенству

$$I_d = \frac{I_{1o} \cdot W_1}{K_f \cdot W_d}(1{,}1 \div 1{,}2), \qquad (21)$$

где I_{1o} — эффективное значение первичного тока холостого хода ТРПШ при полном насыщении подмагничиваемого магнитопровода.

При сопротивлениях нагрузки, значительно меньших сопротивления магнитного рассеяния ТРПШ, примерно при $Z'_{2н} \leqslant (0{,}2 \div 0{,}25) \cdot (X_{1s}, X'_{2s})$, физика процессов для второго способа апроксимирования кривой намагничивания практически ничем не будет отличаться от описанных выше в состояниях 3, 4.

Статические характеристики ТРПШ с реальными магнитопроводами можно разделить на две области их существования — больших и малых нагрузок. В области малых нагрузок они всецело определяются величиной потерь в стали и не поддаются достаточно точным расчетам. Искривление внешних характеристик ТРПШ в режиме малых нагрузок легко исключается путем шунтирования одной из вторичных обмоток нелинейным балластным сопротивлением с вольтамперной характеристикой барретора, показанной на рис. 2 под символом $Z_б$. Такое шунтирование позволяет также осуществить у ТРПШ любого конструктированного исполнения регулирование вторичной э. д. с. холостого хода в пределах от 0 до $E_{2макс}$ без подмагничивания основного магнитопровода.

Изложенный анализ статических характеристик ТРПШ хорошо подтверждается экспериментами.

На рис. 6 представлены расчетные и экспериментальные (выделены точками) характеристики ТРПШ с магнитным рассеянием первичной обмотки, имеющего следующие данные:

$W_1 = W_2 = W_{oc} = W_d = 600$ вит., $r_1 = 6{,}4$ ом, $r_2 = 3{,}6$ ом, $r_d = r_{oc} = 3{,}4$ ом $S_o = 14$ см^2, $S_ш = 0{,}6\ S_o$; магнитопроводы выполнены из одинаковых П-образных пластин стали Э-320.

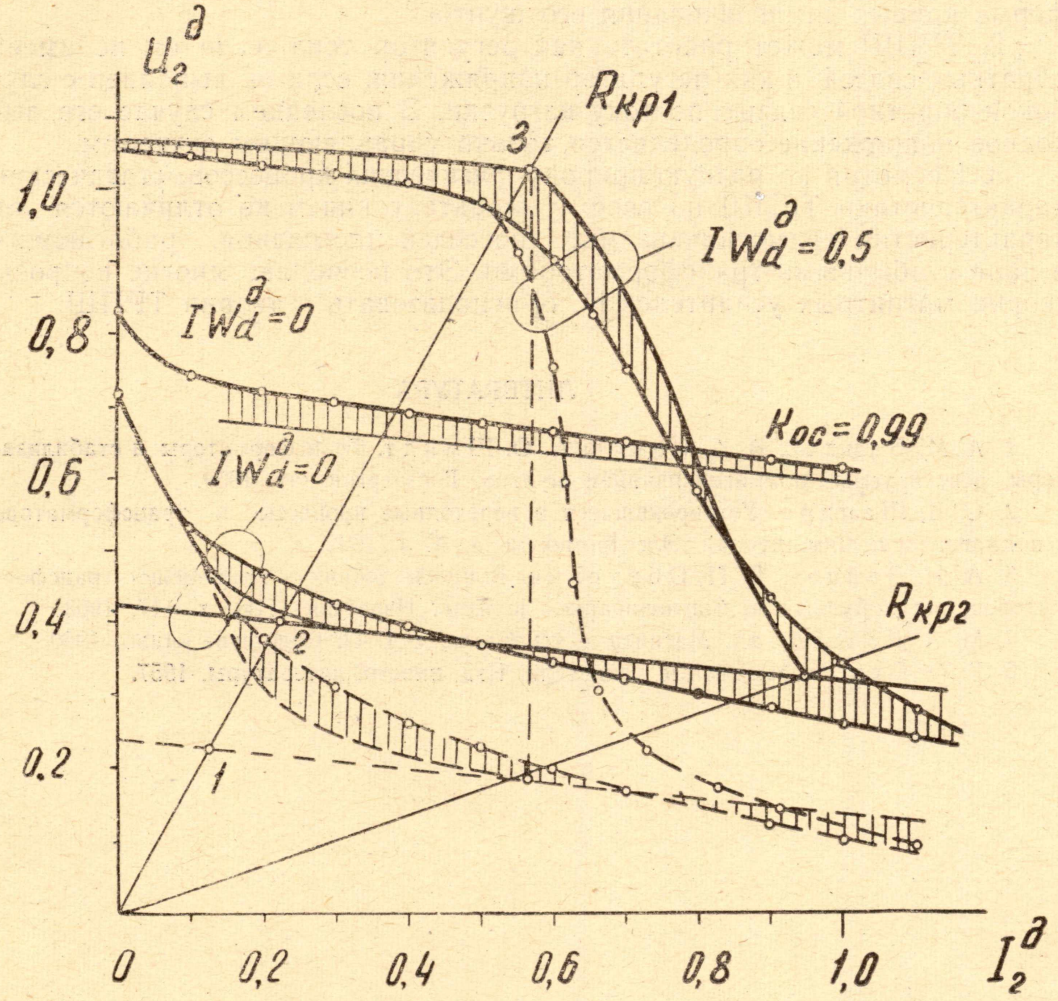

Рис. 6.

В расчетах принималось $B_{sш} = B_{so} = 19500$ гс, $X_{1s} = X'_{2s} = \varepsilon X_{12} = 1700$ ом, $\varepsilon = 0{,}6$, $U_1 = 220$ в.

Характеристики в средних значениях на рис. 6 показаны пунктиром. При построении текущие значения величин относились к их номинальным значениям, причем величины в средних значениях умножены на коэффициент 1, 11.

Как видно, характер экспериментальных кривых вполне соответствует расчету. Наблюдаются лишь некоторые количественные отклонения, которые будут наибольшими для обычных трансформаторных сталей и наименьшими для специальных сталей типа пермаллой и др.

На основании проделанного анализа работы ТРПШ можно сделать следующие выводы:

1. Характерным для ТРПШ является периодическое скачкообразное изменение коэффициента трансформации от минимума до максимума, которое происходит в момент насыщения шунтов. Регулирование эффективного и среднего значения выходного напряжения происходит за счет изменения его формы и вольтсекундной площади, что в принципе отличает ТРПШ от регулируемых трансформаторов с подвижными обмотками и подвижными участками магнитопроводов. Наиболее четко регулировочные свойства аппарата проявляются при прямоугольной форме кривых намагничивания его шунтов.

2. ТРПШ может работать как регулятор тока, если он не имеет обратных связей, и как регулятор напряжения, если он выполнен с глубокой обратной связью по току нагрузки. В последнем случае его выходное напряжение определяется только управляющим сигналом.

3. Несмотря на разную природу физических процессов, статические характеристики ТРПШ по своему характеру ничем не отличаются от характеристик подмагничиваемых дросселей насыщения, работающих в паре с обычными трансформаторами. Это позволяет многие вопросы теории магнитных усилителей [4, 5] использовать в теории ТРПШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, В. А. Сомов, А. О. Шмидт. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов. Госэнергоиздат, 1959.

2. С. В. Шапиро. Установившиеся и переходные процессы в трансформаторе с подмагничивающим шунтом. Электромеханика, № 4, 1962.

3. А. И. Зайцев, В. П. Обрусник. Вопросы теории и применения трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов. Известия ТПИ, т. 117, 1963.

4. М. А. Розенблат. Магнитные усилители, ч. I, II, Советское радио, 1960.

5. Г. Ф. Стром. Магнитные усилители. Изд. иностр. литературы, 1957.