

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. РЕГУЛИРУЕМЫХ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ШУНТА

А. И. ЗАЙЦЕВ, В. П. ОБРУСНИК

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Актуальной проблемой электротехники является создание новых типов статических аппаратов и устройств плавного регулирования напряжения переменного тока в установках большой мощности. Они должны быть простыми по устройству, надежными в эксплуатации, экономичными и достаточно быстродействующими. Из электромагнитных аппаратов в наибольшей степени таким требованиям отвечают только дроссели насыщения и подмагничиваемые трансформаторы. Последние менее известны в литературе и практике, но неизменно привлекают к себе внимание, поскольку регулируемые трансформаторы необходимы для самых различных установок.

Различают две группы подмагничиваемых трансформаторов: трансформаторы регулируемые путем перераспределения первичного напряжения между двумя отдельными единицами [4, 5] и трансформаторы, регулируемые путем отвлечения части магнитного потока в шунт с изменяемым магнитным сопротивлением [1, 2, 3]. Если у трансформаторов второй группы магнитное сопротивление шунта изменяется за счет подмагничивания постоянным током, то их называют „трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунта“, сокращенно — „ТРПШ“.

ТРПШ выгодно отличаются от аналогичных трансформаторов первой группы тем, что они представляют собой одну конструктивную единицу, а ряд их конструкций требуют для изготовления ощутимо меньших затрат активных материалов при более высоких к. п. д. и коэффициентах мощности.

Первые конструкции ТРПШ известны более 30 лет назад, однако все они имели общий недостаток, заключающийся в чрезмерно большом магнитном рассеянии, обусловленном размещением их первичной и вторичной обмоток на разных стержнях основного магнитопровода. Плохая электромагнитная связь между обмотками явилась одной из причин, тормозящих широкое внедрение подобных трансформаторов, так как большое рассеяние связано со значительным увеличением расхода активных материалов и низким коэффициентом мощности.

Сравнительно недавно в Горьковском политехническом институте под руководством проф. А. М. Бамдаса был создан ряд оригинальных конструкций ТРПШ, в которых магнитные шунты вместе с подмагничивающими обмотками располагаются в развитом скне первичной или вторичной обмотки [1]. Эти трансформаторы имеют значительные преимущества по сравнению с ранними конструкциями, их к. п. д. и коэффициент мощности мало отличаются от этих же параметров обычных трансформаторов. Сейчас ТРПШ новой конструкции успешно опробуются в промышленных системах регулирования.

Основные теоретические положения о трансформаторах, регулируемых подмагничиванием шунта, разработаны в ГПИ и изложены в [1, 2, 3].

Интересна и работа [7], где автор для объяснения основных закономерностей, характеризующих работу ТРПШ, предлагает теорию магнитных усилителей. Однако ряд вопросов существующей теории ТРПШ требует дальнейшего развития.

Три разновидности ТРПШ

В литературе известно уже большое количество различных вариантов конструктивного исполнения как однофазных, так и трехфазных трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунта—ТРПШ. Однако применение ТРПШ, как регуляторов в системах автоматического регулирования, затруднено тем, что до сих пор нет достаточно полной характеристики этих аппаратов. Подойти с одной меркой ко всем ТРПШ невозможно. Это видно уже из того, что не все они обладают одинаковыми свойствами. Например, для ТРПШ на рис. 1, *в* и 1, 2 выполнимы три условия:

1) Общий переменный магнитный поток в стали с изменением нагрузки в номинальных пределах остается практически постоянным, независимо от того, подмагничиваем ли мы шунт или основной магнитопровод. В зависимости от степени подмагничивания этот поток лишь перераспределяется между основным магнитопроводом и магнитопроводами шунта.

2) Вторичное напряжение регулируется на холстом ходу.

3) Аппарат обладает свойством обратимости, то есть если поменять первичную и вторичную обмотки ролями, то принцип работы от этого не изменится.

Для аппаратов же на рис. 1, *а* выполнимы лишь первые два условия, а на рис. 1, *б*—ни одно из них.

Но не только в этом обнаруживается различие между трансформаторами с подмагничиваемыми шунтами. Как будет показано ниже, ТРПШ представляют собой оригинальные конструкции, которые в зависимости от их исполнения обладают свойствами тех или иных комбинаций обычного трансформатора и последовательно включенных регулируемых дросселей насыщения. Это приводит к тому, что существующие ТРПШ отличаются друг от друга не только конструктивными формами, режимами работы и экономическими показателями, а имеют и серьезные принципиальные отличия, не позволяющие описать их общими уравнениями, составить для них общую схему замещения и рассчитывать на одинаковые регулировочные возможности. Необходимо все ТРПШ по каким-то родственным признакам привести в такую систему, которая позволяла бы для определенных групп этих аппаратов выработать единую методику расчета их параметров, характеристик и производить необходимые анализы и синтезы.

На наш взгляд, это можно сделать, если принципиальное различие подмагничиваемых трансформаторов с магнитными шунтами искать в способах создания потоков вторичного рассеяния, то есть потоков, замыкающихся через магнитопроводы шунта.

В теории трансформаторов хорошо известно явление двойного магнитного рассеяния, то есть когда к разряду потоков рассеяния относятся не только потоки, замыкающиеся по воздуху (первичное рассеяние), но и потоки, замыкающиеся по магнитному шунту (вторичное рассеяние) [6]. ТРПШ являются ярким примером практического постоянного потоком магнитный шунт, можно управлять величиной использования такого явления. В этих аппаратах, подмагничивая постоянным потоком магнитный шунт, можно управлять величиной потока вторичного рассеяния и тем самым осуществлять регулирование вторичного напряжения. Но характер потока вторичного рассеяния не для всех ТРПШ одинаков; он определяется принадлежностью к рабочим обмоткам аппарата и может создаваться за счет первичной, вторичной или за счет обеих сразу рабочих обмоток.

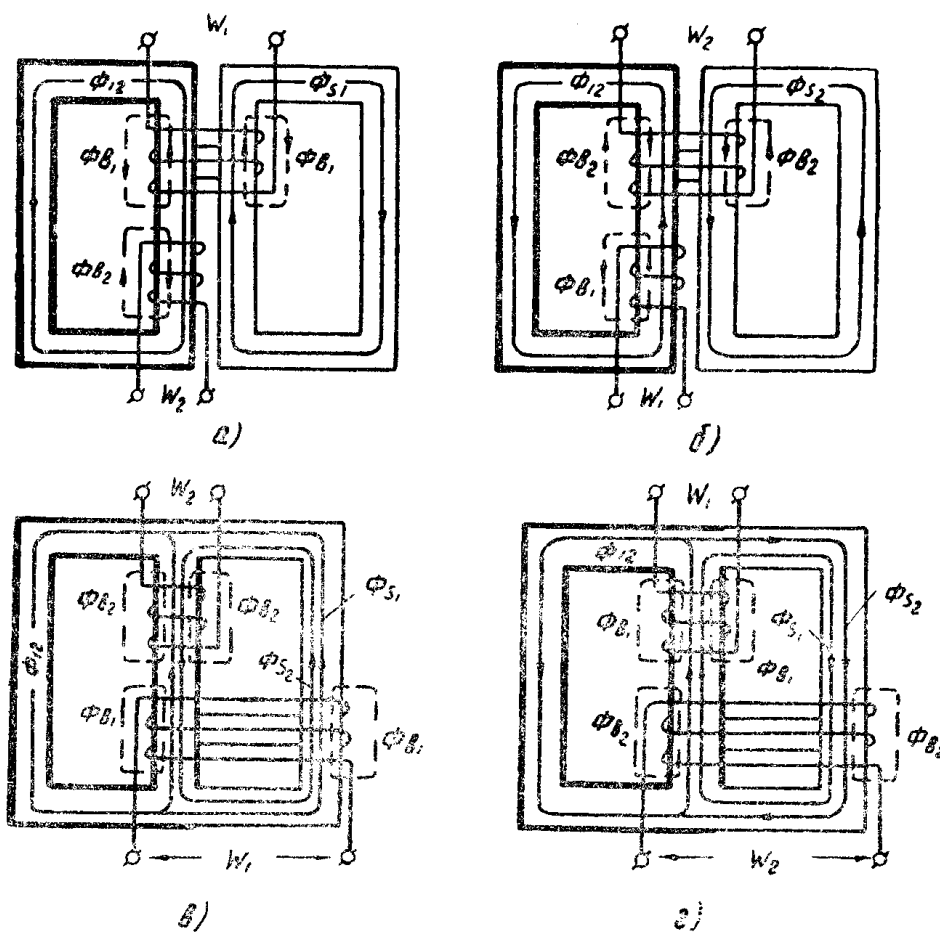


Рис. 1.

На рис. 1, а, б, в, г эти три возможных способа создания потоков вторичного рассеяния показаны на примере упрощенно изображенных однофазных ТРПШ с расположением магнитных шунтов в развитах окне их рабочих обмоток. На рисунках обозначены ¹⁾:

¹⁾ Для простоты на рисунках не показаны подмагничивающие обмотки и не расщеплены магнитопроводы шунтов (они изображены тонкими линиями), что делается в реальных конструкциях для обеспечения возможности подавления нечетных гармоник в подмагничивающих обмотках.

Φ_{12} — поток взаимной индукции,
 Φ_{B_1} и Φ_{B_2} — потоки рассеяния по воздуху,
 Φ_{S_1} и Φ_{S_2} — потоки первичной и вторичной обмоток ТРПШ, замыкающиеся по магнитному шунту.

Характер потоков вторичного рассеяния в ТРПШ определяет их основные характеристики и регулировочные возможности. Если все ТРПШ разбить на отдельные группы, имеющие одинаковый характер потоков вторичного рассеяния, то в этих группах все аппараты будут иметь одинаковые режимы работы, схемы замещения, основные уравнения напряжений, регулировочные возможности и при прочих равных условиях будут отличаться между собой лишь конструктивными формами и экономическими показателями.

Соответственно способам создания потоков вторичного рассеяния таких групп будет три:

- а) ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки (рис. 1 а),
- б) ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки (рис. 1 б),
- в) ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток (рис. 1, в и 1, г).

При расчетах и исследованиях трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунта, и систем автоматического регулирования с их применением необходимо учитывать существование перечисленных трех разновидностей этих аппаратов, имеющих между собой существенные принципиальные отличия.

ТРПШ и комбинации обычного трансформатора с регулируемыми дросселями насыщения

Регулируемые трансформаторы с подмагничиваемыми шунтами можно представить, как комбинации обычного трансформатора с последовательно включенными регулируемыми дросселями насыщения — магнитными усилителями. Каждой разновидности ТРПШ будет соответствовать своя комбинация обычного трансформатора и регулируемых дросселей насыщения. Для сокращения в дальнейшем эти комбинации будем называть „ТР—РДН“.

ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки будет соответствовать комбинация обычного трансформатора с РДН, последовательно включенным в первичную цепь (рис. 1, а и 2, а), ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки будет соответствовать комбинация обычного трансформатора с РДН, последовательно включенным во вторичную цепь (рис. 1, б и 2, б) и ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток будет соответствовать комбинация обычного трансформатора с регулируемыми дросселями насыщения, включенными последовательно в цепь каждой обмотки трансформатора (рис. 1, в, г и 2, в). Принципиальная сторона такого сравнения очевидна и не требует особых доказательств. Сравнение ТРПШ, изображенных на рис. 1, с соответствующими им комбинациями на рис. 2, показывает, что ТРПШ являются оригинальными конструкциями, позволяющими компактно совместить эти комбинации в одном аппарате.

Трансформатор, регулируемый подмагничиванием шунта, всегда можно разложить на эквивалентную ему комбинацию „ТР—РДН“ и, наоборот, по параметрам этой комбинации можно выполнить ТРПШ. Условия таких переходов довольно просты. Прежде всего, магнитопровод трансформатора в комбинации ТР—РДН и основной магнитопровод ТРПШ, а также рабочие обмотки этих аппаратов должны иметь одинаковые параметры.

Параметры регулируемого дросселя в комбинации и параметры магнитопровода шунта замещаемого ТРПШ нужно связать равенством

$$\frac{W_T^2 \cdot S_{\text{ш}}}{L_{\text{ш}}} \cdot \mu_{\sim \text{ш}} = \frac{W_d^2 \cdot S_d}{L_d} \cdot \mu_{\sim d},$$

где W_T — число витков обмотки ТРПШ, создающей поток вторичного рассеяния,
 $S_{\text{ш}}, L_{\text{ш}}, \mu_{\sim \text{ш}}$ — сечение, длина силовой линии и магнитная проницаемость магнитопровода шунта в ТРПШ;
 W_d — число витков рабочей обмотки РДН;
 $S_d, L_d, \mu_{\sim d}$ — сечение, длина силовой линии и магнитная проницаемость дросселя.

Это равенство составлено исходя из условия, что реактивные сопротивления регулируемых дросселей насыщения в комбинации

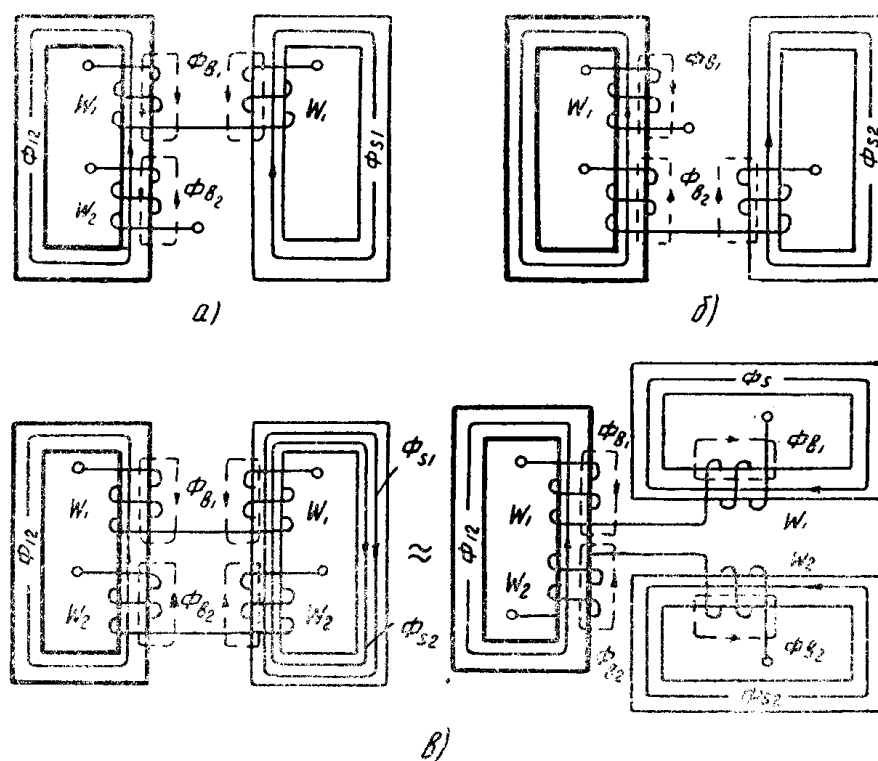


Рис. 2.

ях ТР-РДН должны быть равны сопротивлениям вторичного рассеяния в замещаемых ТРПШ.

Параметры подмагничивающих обмоток постоянного тока подсчитываются по закону равенства намагничивающих сил, а если ТРПШ имеет внутреннюю или внешнюю обратную связь по току, то и дроссели в эквивалентных комбинациях должны иметь эти же обратные связи.

Полученные таким образом комбинации ТР-РДН будут иметь с эквивалентными им ТРПШ практически равные регулировочные возможности. Разница между теми и другими, если говорить о реально выполненных по приведенным выше условиям регуляторах, будет

определяться лишь экономическими показателями расходом активных материалов, активными потерями и потерями на рассеяние по воздуху, то есть номинальными коэффициентами мощности и к. п. д., разными будут габариты и т. д.

Подтверждением сказанного могут служить характеристики, данные на рис. 3, *а*, *б*, *в*.

Здесь сплошными кривыми представлены внешние характеристики, снятые экспериментально на однофазных ТРПШ трех разновидностей, но имеющих одинаковые параметры, одинаковую мощность (200 *ва*) и одинаковое сечение шунтов, равное сечению основного магнитопровода. На рис. 3, *а* приведены характеристики для ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки, на рис. 3, *б*—для ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки и на рис. 3, *в*—для ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток. Пунктирными кривыми на этих же рисунках даны экспериментальные внешние характеристики комбинаций ТР-РДН, эквивалентных испытуемым ТРПШ. Чтобы наиболее приблизить комбинации ТР-РДН к испытуемым ТРПШ, они были выполнены по самым простым условиям взаимного приведения $I_d = I_{ш}$, $S_d = S_{ш}$, $W_{д1} = W_{т1}$, $W_{д2} = W_{т2}$, $\mu_{\sim d} = \mu_{\sim ш}$ (марка стали всех магнитопроводов взята одинаковой — Э-42).

Сравнение сплошных и пунктирных кривых на рисунках показывает, что внешние характеристики ТРПШ и эквивалентных им систем ТР-РДН качественно не отличаются друг от друга, то есть регулировочные возможности этих регуляторов одинаковы. Но заметно количественное отличие характеристик, и это вполне естественно, так как активные сопротивления и сопротивления рассеяния по воздуху рабочих обмоток у ТРПШ и систем ТР-РДН не могут быть одинаковыми. Компактность ТРПШ обеспечивает ему как ощутимо меньшие расходы меди, то есть меньшие активные сопротивления обмоток, так и резкое уменьшение потерь на рассеяние по воздуху. В этом отношении ТРПШ является лучшим аппаратом, чем комбинации ТР-РДН.

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов, являются самостоятельными, очень оригинальными аппаратами с рядом присущих им особенностей и равенства, в буквальном смысле этого слова, между ними и комбинациями ТР-РДН ставить нельзя. Все же приведение ТРПШ к комбинациям ТР-РДН может быть очень полезным в теоретическом отношении.

Во-первых, это позволяет удобно производить предварительный анализ и синтез параметров ТРПШ.

Во-вторых, когда имеется рассчитанный и выполненный ТРПШ, предназначенный для работы в той или иной системе регулирования, то условно представив его в виде эквивалентной ему комбинации ТР-РДН, можно уже известными методами в электротехнике вести расчет, анализ и синтез его статических и динамических характеристик как в разомкнутой, так и в замкнутой системах регулирования. Условная комбинация ТР-РДН будет абсолютным принципиальным двойником ТРПШ, если считать, что в ней обмотки регулируемых дросселей насыщения не имеют активного сопротивления и сопротивления рассеяния по воздуху, а для обмоток трансформатора эти параметры перенесены с обмоток ТРПШ.

Схема замещения и ее параметры для такой условной комбинации ТР-РДН будут справедливы и для замещенного ею ТРПШ.

В-третьих, приведение ТРПШ к эквивалентной ему комбинации ТР-РДН и наоборот—расчет ТРПШ взамен имеющейся такой комбинации позволяет удобным и единственно равноправным способом

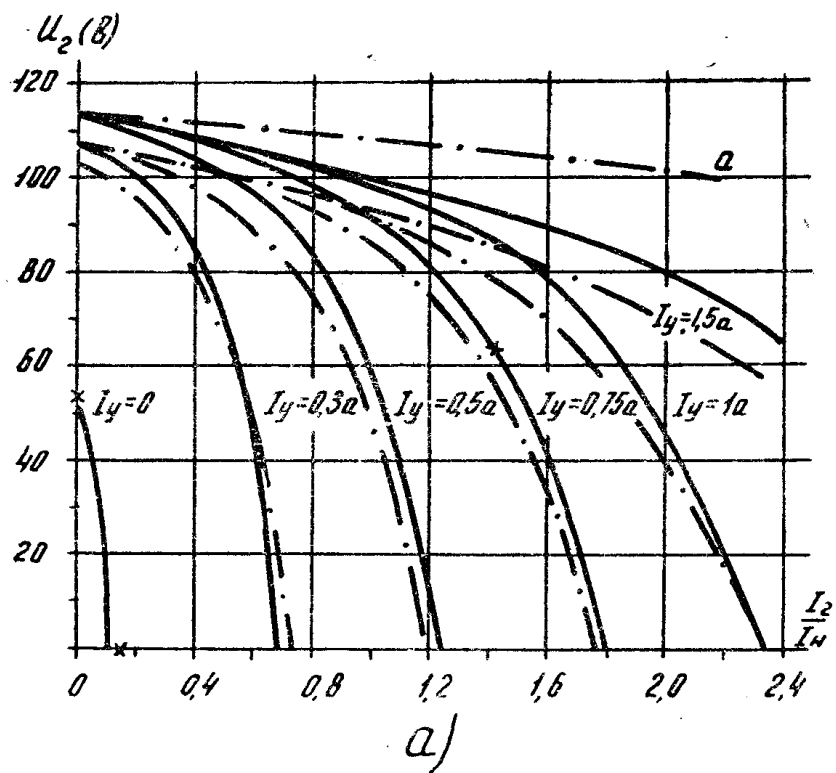


Рис. 3.

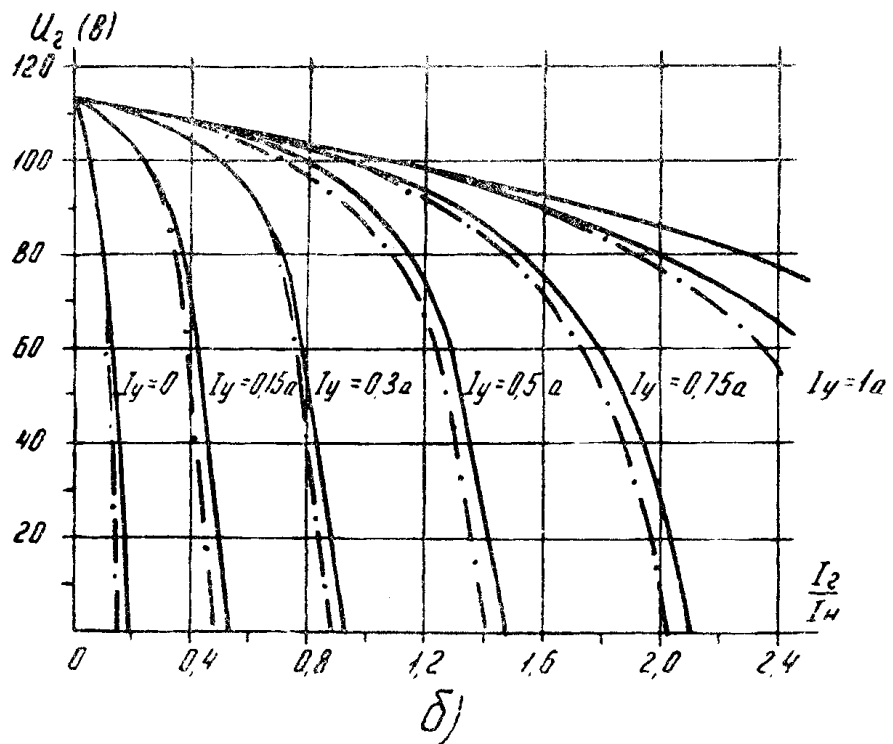


Рис. 3.

сравнить эти два магнитных регулятора. Это очень важно, так как прежде чем применить ТРПШ в системе регулирования, нужно обоснованно доказать достаточные преимущества этого аппарата перед возможными комбинациями ТР-РДН, как имеющими почти равные регулировочные возможности.

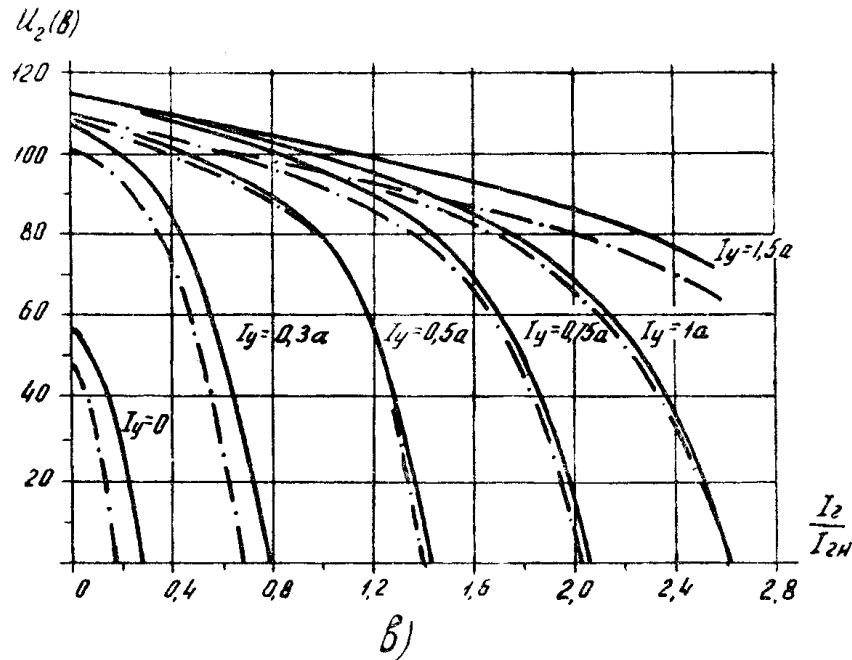


Рис. 3

Схемы замещения ТРПШ

Ранее было указано на три разновидности ТРПШ. Для каждой из этих разновидностей существует своя схема замещения. Эти схемы представлены на рис. 4, а, б, в: для ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки — рис. 4, а, для ТРПШ со вторичным рассеянием вторичной обмотки — рис. 4, б и для ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток — рис. 4, в.

Для этих схем замещения можно записать уравнения напряжений:

$$а) \dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1\sigma}) + \dot{I}_1 \cdot Z_{1s} + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \cdot Z_{12},$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2\sigma}) + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \cdot Z_{12};$$

$$б) \dot{U}_1 = \dot{I}_1 [r_1 + jx_{1\sigma}] + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \cdot Z_{12},$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}_2 (r'_2 + jx'_{2\sigma}) + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \cdot Z_{12} + \dot{I}'_2 \cdot Z'_{2s};$$

$$в) \dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1\sigma}) + \dot{I}_1 \cdot Z_{1s} + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \cdot Z_{12},$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2\sigma}) + \dot{I}'_2 \cdot Z'_{2s} + (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \cdot Z_{12}.$$

Остановимся на параметрах приведенных схем и уравнений.

Отметим сразу, что все параметры с индексом 1 мы будем относить к первичной цепи, а с индексом 2 — ко вторичной цепи. Параметры вторичной цепи считаем приведенными к первичной: r_1 и r'_2 — активные сопротивления рабочих обмоток.

$x_{1в}$ и $x'_{2в}$ — реактивные сопротивления рассеяния по воздуху. Методика определения этих сопротивлений изложена в [1, 3].

$Z_{12} = \frac{r_{12} + jx_{12}}{r_{12} + jx_{12}}$ — сопротивление намагничивающего контура рабочего потока Φ_{12} .

Строго говоря, это не постоянная величина, она зависит от магнитного состояния шунтов и при перераспределении общего потока между основным магнитопроводом и шунтом будет несколько меняться. Но так как поток Φ_{12} протекает по участку магнитопровода, не подвергающемуся подмагничиванию постоянным током, а максимальное значение этого потока не может превышать величину, выбираемую заранее в пределах колена кривой памагничивания основного

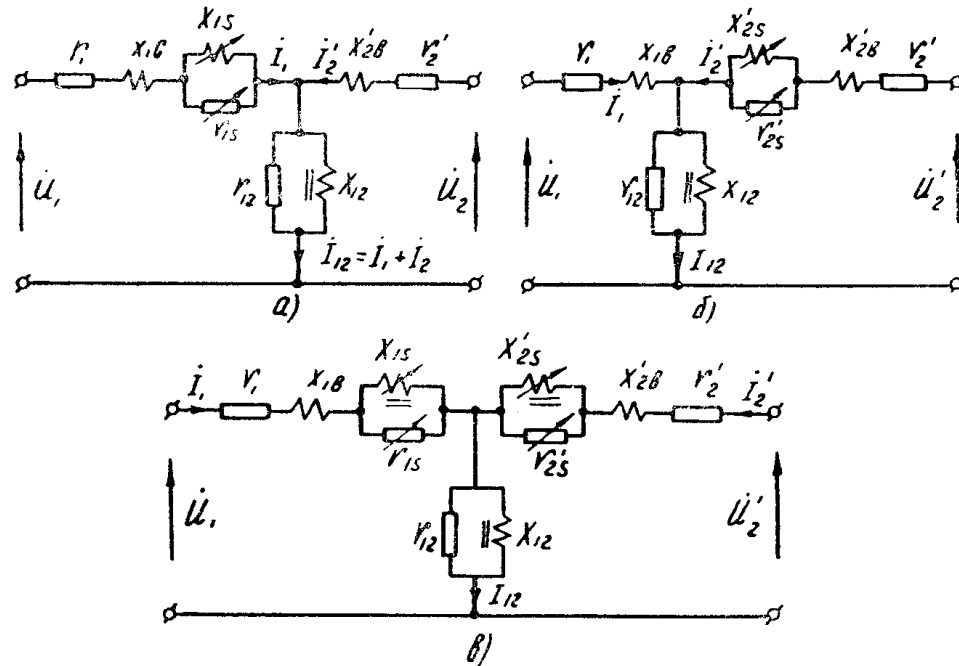


Рис. 4.

магнитопровода (то есть в пределах ее практически линейной части), то величину Z_{12} без особой погрешности можно считать постоянным параметром, равно как и эффективную магнитную проницаемость для потока Φ_{12} .

При таком допущении составляющие параметра Z_{12} — r_{12} и x_{12} определяются как активное и реактивное сопротивления стали основного магнитопровода ТРПШ при максимальном значении потока Φ_{12} , т. е. при полностью насыщенных шунтах.

В ТРПШ для более глубокого регулирования вторичного напряжения на холостом ходу можно предусмотреть подмагничивание основного магнитопровода постоянным током. В этом режиме сопротивление Z_{12} нельзя принять за постоянную величину, так как оно уже будет выражаться сложной переменнo-нелинейной функцией. Мы не будем останавливаться на этом случае, ибо подмагничивание постоянным полем основного магнитопровода пока практически не используется.

Особо важными параметрами ТРПШ являются сопротивления вторичного рассеяния — $Z_{1с}$ и $Z'_{2с}$, где

$$Z_{1s} = \frac{r_{1s} \cdot jx_{1s}}{r_{1s} + jx_{1s}} \quad \text{и} \quad Z'_{2s} = \frac{r'_{2s} \cdot jx'_{2s}}{r'_{2s} + jx'_{2s}}$$

(r_s и x_s — активное и реактивное сопротивления стали магнитопровода шунта).

Z_{1s} и Z'_{2s} даже при заданной конструкции и параметрах ТРПШ представляют собой сложную нелинейно-переменную функцию от токов нагрузки и тока подмагничивания и не поддаются достаточно точному аналитическому выражению в общих случаях.

Если ТРПШ заменить эквивалентной ему комбинацией обычного трансформатора с регулируемыми дросселями насыщения, то Z_{1s} и Z'_{2s} как раз и будут реактивными сопротивлениями дросселей в этой комбинации. Следовательно, в схемах замещения ТРПШ сопротивления Z_{1s} и Z'_{2s} следует характеризовать, как нелинейно-переменные сопротивления условных регулируемых подмагничиванием дросселей насыщения, имеющих параметры магнитопровода, равные параметрам магнитопровода шунта ТРПШ и числа витков переменного тока равные W_1 для Z_{1s} и W_2 для Z'_{2s} , но не имеющих активного сопротивления и сопротивления рассеяния этих обмоток. Значения Z_{1s} и Z'_{2s} можно определить настолько же точно, насколько можно определить реактивное сопротивление регулируемого дросселя насыщения. Если даны кривые одновременного намагничивания и кривые потерь в стали магнитопровода шунта, то функции $Z_{1s} = f(I_1; I'_y)$ и $Z'_{2s} = \varphi(I'_2; I_y)$ можно выразить графически.

В итоге мы видим, что схемы замещения ТРПШ являются простыми, Т-образными, но содержащими нелинейные звенья. Все параметры этих схем с достаточной точностью могут быть определены известными в электротехнике методами, что позволит рассчитывать и характеристики ТРПШ. Проведенные графо-аналитическим методом расчеты внешних характеристик для целого ряда ТРПШ, когда для определения Z_{1s} и Z'_{2s} использовались кривые одновременного намагничивания шунта, снятые на выполненных конструкциях ТРПШ, дали хорошее совпадение с экспериментами.

О применении ТРПШ

В настоящее время в системах автоматического регулирования широко применяются магнитные усилители, достоинства которых общеизвестны. Часто магнитные усилители используются совместно с регулируемыми трансформаторами, которые служат для согласования напряжения на нагрузке с напряжением сети. Такие комбинации обычного трансформатора с магнитными усилителями можно заменить, как было показано выше, трансформаторами, регулируемыми подмагничиванием шунта. При равных регулировочных возможностях ТРПШ по сравнению с комбинациями ТР-РДН будет иметь ряд серьезных преимуществ.

Прежде всего, очень ценно то, что ТРПШ представляет собой одну конструктивную единицу. В сравнении с комбинациями ТР-РДН это делает его компактным, меньшим по габаритам и более удобным при монтаже. Кроме того, здесь уже напряжение рабочих обмоток, а в конструкциях подобных рис. 1, в, г и потоки, не перераспределяются между двумя единицами, что можно отнести к основным принципиальным отличиям ТРПШ.

То обстоятельство, что рабочие обмотки этого аппарата не размещены на разных стержнях, а шунты помещены в развитом окне одной из этих обмоток, приводит к тому, что резко сокращаются потери на рассеяние по воздуху. Эти потери намного, иногда в несколько раз, меньше не только по отношению к ТРПШ ранних конструкций, но и по отношению к комбинациям ТР-РДН.

Компактность конструкций ТРПШ уменьшает также расход меди (в среднем на 15 ÷ 20 %), а в некоторых конструкциях и расход стали, что уменьшает активные потери, то есть повышает к. п. д. Если номинальное напряжение на нагрузке не намного отличается от напряжения сети, то можно использовать подмагничиваемые автотрансформаторы, которые дадут еще большую экономию активных материалов.

Компактность, меньшие затраты активных материалов, более высокие номинальные к. п. д. и $\cos \varphi$ уже позволяют считать ТРПШ серьезными конкурентами комбинаций ТР-РДН. Правда, конструктивное исполнение ТРПШ сложнее, чем у магнитного усилителя или обычного трансформатора и изготовление его связано с рядом неудобств, особенно когда ТРПШ имеет малое сечение шунтов. Применение здесь магнитно мягких материалов хотя бы для шунтов вызывает намного большие трудности, чем для магнитных усилителей. Поэтому в установках малой мощности, где основные требования предъявляются к чувствительности и регулировочным возможностям регулятора, а экономические показатели не являются решающими, применение ТРПШ будет неэффективным. Но в установках большой мощности, где магнитные регуляторы могут быть выполнены из обычных электротехнических сталей, а экономические показатели относятся к числу решающих, было бы вполне целесообразно применять вместо магнитных усилителей с согласующими трансформаторами объединяющий их конструктивно трансформатор, регулируемый подмагничиванием шунта.

Особое внимание привлекают ТРПШ со вторичным рассеянием первичной и вторичной рабочих обмоток (см. рис. 1, в, г), так как он при прочих равных условиях в сравнении с другими разновидностями этих аппаратов обладает большей чувствительностью. Если у ТРПШ двух других разновидностей управляющий сигнал управляет реактивным сопротивлением рассеяния одной из рабочих обмоток, то здесь этот же сигнал будет одновременно управлять реактивным сопротивлением рассеяния обеих обмоток.

На рис. 5 даны для сравнения внешние характеристики двух регуляторов одинаковой мощности, когда сечение шунтов равно сечению основного магнитопровода: 1 — характеристики ТРПШ со вторичным рассеянием первичной обмотки, 2 — характеристики ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток.

Основные параметры этих регуляторов были выполнены одинаковыми.

Очевидно, наиболее желательными из представленных характеристик будут характеристики — 2. Чтобы получить такие же характеристики у регулятора — 1, нужно было бы или использовать для шунтов более высококачественную сталь или увеличить сечение шунта. Эти обстоятельства заставляют для конструкций ТРПШ с малым рассеянием наибольшее предпочтение отдавать ТРПШ со вторичным рассеянием обеих рабочих обмоток.

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунта, можно рекомендовать для широкого перечня систем автоматического регулирования. Большой практический интерес будет иметь применение

ТРПШ в системах регулирования скорости двигателей постоянного тока привода электровазов, системах регулирования мощности электроплавильных печей, температуры в соляных ваннах нагрева, тока нагрева в установках отжига медной проволоки при непрерывном волочении, напряжения на электродах ванн электролитного нагрева и др.

На кафедре электрификации промышленных предприятий Томского политехнического института выполнен ряд установок, где для сравнения регуляторами использовались ТРПШ и различные комбинации ТР-РДН. Чаще всего здесь предпочтение приходилось отдавать ТРПШ.

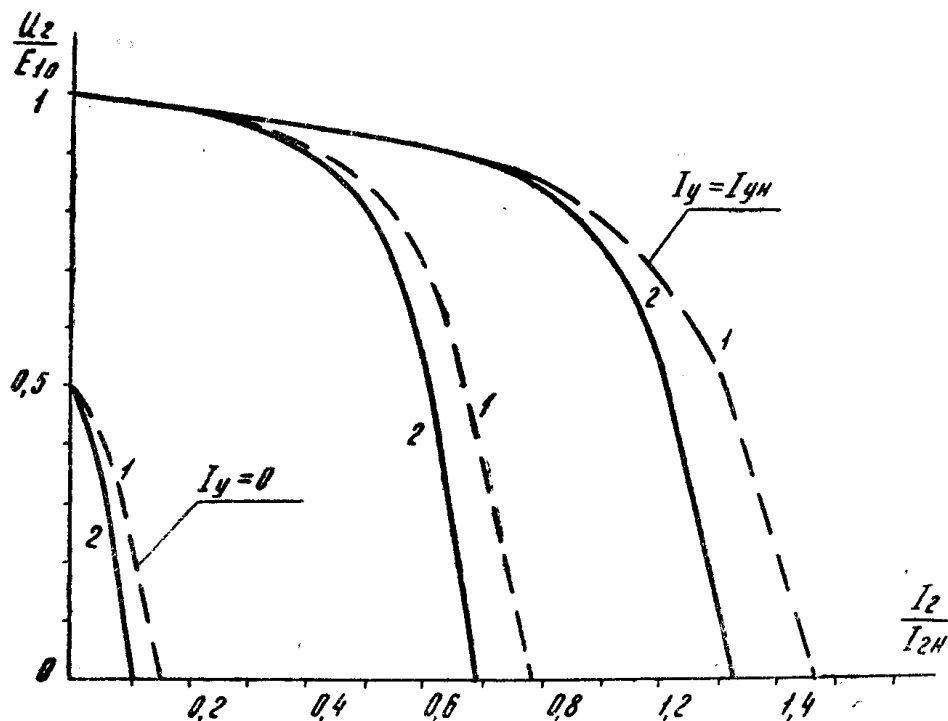


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, В. А. Сомов и О. А. Шмидт. Трансформаторы и стабилизаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов. Госэнергоиздат, 1959.
2. В. А. Сомов. Элементы теории трансформатора, регулируемого подмагничиванием шунта. Труды ТПИ, т. XIII, вып. 2, 1957.
3. А. О. Шмидт, М. П. Шваков. Расчеты трансформаторов и автотрансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунта. Труды ГПИ, т. XIII, вып. 2, 1957.
4. Г. Н. Петров, Б. Л. Крайз. Плавное бесконтактное регулирование трансформатора под нагрузкой. Вестник электропромышленности, № 3, 1958.
5. А. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.
6. Г. Н. Петров. Трансформаторы. Энергоиздат, 1934.
7. В. И. Шаров. О теории работы трансформатора с подмагничиванием шунта. Электричество, № 11, 1961.

Поступила в редакцию
в июне 1962 г.