

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Основные определения

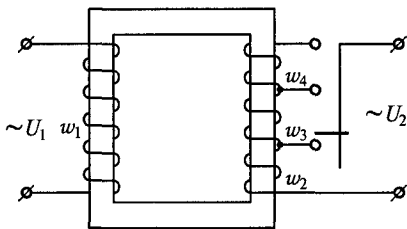
Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких первичных систем переменного тока в одну или несколько других, вторичных систем, имеющих в общем случае другие характеристики, в частности, другое напряжение и другой ток.

Трансформатор состоит из сердечника, набранного из листовой электротехнической стали, и обмоток, связанных между собой посредством электромагнитного поля.

Трансформатор, имеющий две обмотки, называется *двухобмоточным*; трансформатор с тремя или несколькими обмотками — *трехобмоточным* или *многообмоточным*. Соответственно роду тока различают трансформаторы *однофазные*, *трехфазные* и *многофазные*. Под обмоткой многофазного трансформатора понимают совокупность всех фазных обмоток одинакового напряжения, определенных образом соединенных между собой.

Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется *первичной обмоткой* w_1 , а обмотка, от которой энергия отводится, называется *вторичной* w_2 . Соответственно все величины, относящиеся к первичной обмотке, как, например, мощность, ток, сопротивление и т. д., тоже называются первичными, а относящиеся ко вторичной обмотке — вторичными.

Обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением U_1 , называется обмоткой высшего напряжения, а обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения U_2 , — обмоткой



низшего напряжения. Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется *понижающим*, а если больше — *повышающим*.

Трансформатором с *ответвлениями* называется трансформатор, обмотки которого имеют специальные ответвления w_3 и w_4 для изменения коэффициента трансформации (рис. 8.1).

Для предотвращения вредного влияния воздуха на изоляцию обмоток и улучшения условий охлаждения трансформатора, сердечник с находящимися на нем обмотками помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называются *масляными*. Трансформаторы, не погружаемые в масло, называются *сухими*.

По своему назначению трансформаторы подразделяются на следующие типы:

- силовые — для передачи и распределения электроэнергии (тяговых подстанций);
- силовые специального назначения: тяговые, печные, для выпрямительных установок, сварочные и т. д.;
- индукционные регуляторы — для регулирования напряжения в распределительных сетях;
- автотрансформаторы — для преобразования напряжения в небольших пределах, для пуска в ход двигателей переменного тока и т. д.;
- измерительные — для включения в схемы измерительных приборов;
- испытательные — для производства испытаний под высоким напряжением (испытательные станции);
- устройства специального назначения, использующие принцип работы трансформатора.

При изучении трансформаторов, будем рассматривать одно- и трехфазный двухобмоточные силовые трансформаторы.

Номинальные величины трансформатора — мощность, напряжение, ток, частота и т. д. — указываются на заводском щитке. Термин *номинальный* может применяться и к величинам, не указанным на щитке, но относящимся к номинальному режиму (например, номинальный КПД, номинальные температурные условия охлаждающей среды, номинальный $\cos\phi$ и номинальные коэффициенты перегрузки).

Номинальным режимом работы трансформатора называется режим, при котором трансформатор может работать длительный период времени без нарушения показателей надежности и отклонения параметров.

Номинальным вторичным напряжением называется напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и при номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Если вторичная обмотка имеет ответвления, то ее номинальное напряжение отмечается особо.

Номинальными токами трансформатора — первичным и вторичным — называются токи, вычисленные по соответствующим значениям номинальной мощности и номинальных напряжений. С учетом того, что трансформатор имеет КПД, равный 0,99, считают номинальные мощности обеих обмоток равными.

2. Устройство трансформаторов

Основные конструктивные элементы трансформатора — магнитная система, обмотки, системы изоляции и охлаждения, вводы.

Магнитная система. В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и тороидальные. *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. *Ярмом* называют часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют хорошие условия охлаждения.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28... 0,50 мм для частоты 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатаную сталь с ребровой структурой (марки 3412—3416) и содержанием кремния 2,8... 3,8 %.

По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы. В *стыковых* магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют отдельно, затем устанавливают встык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки.

В *шихтованных* магнитопроводах стержни и ярма собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Каждый слой состоит из двух-трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают так, что листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя. В результате существенно уменьшается магнитное сопротивление в месте сочленения.

При изготовлении магнитопроводов из холоднокатаной текстурованной стали листы в местах сочленения крайних стержней с ярмами скашивают примерно на 45°. В силовых трансформаторах широко применяют комбинированный способ шихтовки, при котором стыки листов ярма со средним стержнем делают прямыми, а с крайними стержнями — косыми, или первый слой листов выполняют с косыми стыками, а второй — с прямыми.

Стержни магнитопровода в силовых трансформаторах сравнительно небольшой мощности имеют прямоугольное или крестовидное сечение, а в более мощных — ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (их собирают из листов различной ширины). Такая форма обеспечивает получение требуемого поперечного сечения стержня при минимальном диаметре, что позволяет уменьшить длину витков обмоток и расход обмоточных проводов. При большом сечении стержней их собирают из отдельных стальных пакетов, между которыми располагают продольные каналы шириной 5...6 мм для циркуляции охлаждающей жидкости. В некоторых конструкциях имеется еще и поперечный канал.

В мощных трансформаторах с магнитопроводами из холоднокатаной анизотропной стали стержни стягивают бандажами из стеклоленты или стальной ленты. Чтобы стальные бандажи не образовали короткозамкнутых витков, их разрезают и стягивают с помощью изоляционных пряжек. Для получения равномерного сжатия стальных листов перед наложением бандажей стержень спрессовывают на сборочном стенде. Опрессовка стержней обеспечивает необходимую жесткость конструкции магнитопровода и предотвращает повышенную вибрацию его листов, сопровождающуюся шумом.

Существуют также конструкции магнитопроводов, в которых стержни стягивают стальными шпильками, изолированными относительно стержней трубками из изоляционного материала. Такой способ опрессовки для холоднокатаной стали недопустим, так как магнитные силовые линии огибают отверстия, пробитые в стальных листах для шпилек и, следовательно, отклоняются от направления проката стали.

Ярма, соединяющие стержни, выполняют обычно прямоугольного, Т-образного или ступенчатого сечения, на 2...5% больше, чем сечение стержней. Это уменьшает индукцию в стали ярма и потери мощности в ней. Магнитопровод вместе с опорными балками и другими прессующими деталями образует остов трансформатора. При работе силовых трансформаторов их магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они могут приобрести электрический заряд. Чтобы избежать этого, остов заземляют с помощью медных лент.

Обмотка. В трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить как можно ближе друг к другу для лучшей магнитной связи. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо концентрически — одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, либо чередующихся по высоте. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку низкого напряжения, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи — обмотку высокого напряжения.

В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные концентрические (расщепленные) обмотки, в которых обмотку низкого напряжения делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку высокого напряжения.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70% больше, чем при использовании меди, из-за большего удельного электрического со-

противления алюминия. В связи с этим габариты и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками. При сравнительно небольших мощностях и токах обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения, при больших мощностях и токах применяют провода прямоугольного сечения.

Изоляция силовых трансформаторов. В трансформаторах изоляцию обмоток подразделяют на главную (между обмотками низкого и высокого напряжения) и продольную (между витками, слоями и катушками каждой обмотки). Имеется также изоляция отводов от обмоток, переключателей и выводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется в основном электрической прочностью при частоте 50 Гц. Она обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов.

Чтобы предотвратить пробой изоляции при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений в высоковольтных трансформаторах, между обмотками дополнительно ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона. Во избежание электрического разряда по поверхности изоляционных цилиндров они должны иметь по высоте большие размеры, чем обмотки. Между обмотками высшего напряжения различных фаз устанавливают межфазную изоляционную перегородку. Необходимое расстояние между обмотками и ярмом обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. Между концевой изоляцией обмотки и ярмовыми балками магнитопровода в некоторых трансформаторах устанавливают металлические разрезные или неметаллические стягивающие кольца.

В трансформаторах, рассчитанных на напряжение свыше 35 кВ, для защиты от грозовых разрядов две начальные и две конечные катушки обмотки высшего напряжения выполняют с усиленной изоляцией. Такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большего поперечного сечения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки высшего напряжения и выравнивания электрического поля у концов обмотки применяют емкостную компенсацию в виде экранирующих витков и емкостных колец, которые служат электрическими экранами.

Изоляция между катушками, слоями и витками (продольная изоляция) обеспечивает электрическую прочность обмотки при частоте 50 Гц и воздействии импульсных перенапряжений.

В трансформаторах с воздушным охлаждением изоляцию выполняют, как и во вращающихся электрических машинах, по-

средством изоляционных пленок и пропиточных лаков. Высокая стоимость изоляционных материалов и трудоемкость выполнения изоляции повышают общую стоимость таких трансформаторов по сравнению с масляными.

Вводы трансформатора. Для вывода наружу концов обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или на стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют *вводом*.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность. Вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами, число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора. При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор пыли, масла и т. д. При напряжениях 110 кВ вводы часто выполняют составными — из двух фарфоровых изоляторов.

Конструктивное выполнение трансформатора определяется в значительной мере способом его охлаждения, который зависит от номинальной мощности. В силовых трансформаторах для отвода теплоты от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воздушное, масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика.

Трансформаторы с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы). При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому охлаждение их происходит путем конвекции воздуха и теплоизлучения. Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и пр.), при этом главным требованием является обеспечение пожарной безопасности. Воздух обладает меньшей диэлектрической проницаемостью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Из-за меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах должны быть меньше, чем в масляных, поэтому они имеют большие сечения проводов обмотки и магнитопровода. Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных. Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80 % во избежание чрезмерного увлажнения обмоток.

Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение. Трансформаторы типа СЗ закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ — герметическим кожухом. Сухие трансформаторы с охлаждением воздушным дутьем условно обозначают СД.

Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, с охлаждением типа С. В некоторых случаях их помещают в корпус, залитый терморезистивными компаундами на основе эпоксидных смол или других подобных материалов.

Трансформаторы с масляным охлаждением. В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (М) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный очищенным минеральным (трансформаторным) маслом. Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит теплоту от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем трансформатор. Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий. При правильной эксплуатации масляных трансформаторов, когда температура изоляции в наиболее нагретом месте не превышает 105°C , трансформатор может служить 20—25 лет. Повышение температуры выше нормы на 8°C приводит к сокращению срока службы изоляции трансформатора примерно в 2 раза.

В трансформаторах мощностью 20...30 кВ·А выделяется сравнительно небольшое количество теплоты, поэтому их баки имеют гладкие стенки. У более мощных трансформаторов (20...1800 кВ·А) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают, применяя ребристые или волнистые стенки либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции.

Масляные трансформаторы типа М применяют для мощностей 10...10 000 кВ·А.

Трансформаторы с охлаждением негорючим жидким диэлектриком. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД помещают в герметизированный бак, заполненный негорючим жидким диэлектриком. Обычно применяют синтетические изоляционные материалы, например совтол, которые имеют примерно такие же электроизоляционные свойства и теплопроводность, как и трансформаторное масло. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД пожаробезопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Во время работы масло в трансформаторе нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы мощностью 25 кВ·А и выше имеют небольшой допол-

нительный бак-расширитель, соединенный с внутренней полостью основного бака. При нагревании трансформатора изменяется объем масла, находящегося в расширителе. Объем его составляет около 10 % от объема масла в баке. Расширители имеют воздухоосушитель, заполненный сорбентом — веществом, которое поглощает влагу из воздуха, поступающего в расширитель. При мощности 160 кВ·А и выше на них устанавливают также термосифонный фильтр для непрерывного обезвоживания и очистки масла. Для более надежного предохранения от окисления трансформаторы большой мощности выполняют герметизированными с полной изоляцией масла, находящегося в расширителе, от атмосферного воздуха.

При повреждении изоляции обмотки высокого напряжения ее высокий потенциал может появиться на обмотке низкого напряжения. Чтобы предотвратить это, в трансформаторах, у которых обмотка низкого напряжения имеет напряжение до 0,69 кВ, между этой обмоткой и заземленным баком включают пробивной предохранитель, который пробивается при напряжении 1000 В.

3. Принцип работы и КПД трансформатора

Рассмотрим принцип действия трансформатора на примере однофазного двухобмоточного трансформатора, расчетная схема которого представлена на рис. 8.2. Этот трансформатор состоит из магнитопровода и двух расположенных на нем обмоток w_1 и w_2 . Одна из обмоток подключается к источнику переменного напряжения U_1 . Эта обмотка называется *первичной*. К другой обмотке с напряжением U_2 подключается потребитель $z_{н}$. Она называется *вторичной*.

Действие трансформатора основано на принципе электромагнитной индукции: при протекании по первичной обмотке тока I_1 в стальном стержне магнитопровода возникает переменный магнитный поток, пульсирующий соответственно с частотой напряжения, питающего первичную обмотку. Переменный магнитный поток наводит в обеих обмотках ЭДС. Если цепь вторичной обмот-

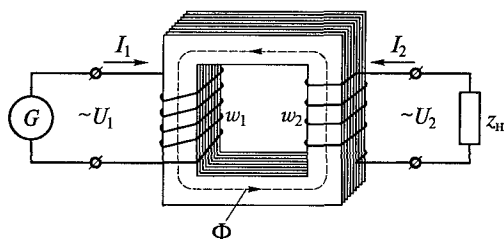


Рис. 8.2. Расчетная схема трансформатора

ки замкнута, ток в ней потечет — ток потребителя I_2 . При этом ЭДС первичной обмотки

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.1)$$

а ЭДС вторичной обмотки

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.2)$$

где w_1, w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

ЭДС, индуцируемые в обмотках трансформатора, прямо пропорциональны числу витков, а их отношение

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad (8.3)$$

называется *коэффициентом трансформации*.

В первичной обмотке ЭДС e_1 является ЭДС самоиндукции и направлена встречно первичному напряжению U_1 , т. е. находится с ним в противофазе. В связи с этим уравнение ЭДС для первичной обмотки имеет вид

$$U_1 = e_1 - e_{1p} - I_1 r_1, \quad (8.4)$$

где e_{1p} — ЭДС рассеяния; r_1 — активное сопротивление цепи первичной обмотки.

Обычно e_{1p} и $I_1 r_1$ невелики, поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное напряжение U_1 уравновешивается ЭДС e_1 .

Во вторичной обмотке ток I_2 замкнутой цепи зависит от величины ЭДС e_2 , которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки U_2 . Оставшаяся часть ЭДС e_2 идет на компенсацию ЭДС рассеяния e_{2p} и падение напряжения в проводниках вторичной обмотки $I_2 r_2$. Поэтому

$$U_2 = e_2 - e_{2p} - I_2 r_2. \quad (8.5)$$

Уравнение магнитодвижущих сил трансформатора имеет вид

$$I_{x_x} w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2. \quad (8.6)$$

Из этого уравнения следует, что сумма МДС первичной ($I_1 w_1$) и вторичной ($I_2 w_2$) обмоток равна постоянной величине — МДС холостого хода ($I_{x_x} w_1$). Физически это объясняется следующим образом.

Так как ЭДС вторичной обмотки e_2 является ЭДС взаимной индукции, то ток I_2 , созданный этой ЭДС при подключении нагрузки, в соответствии с правилом Ленца, оказывает размагни-

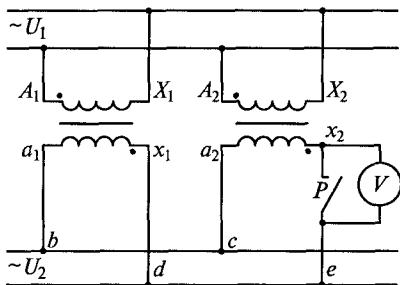


Рис. 8.3. Параллельное включение трансформаторов

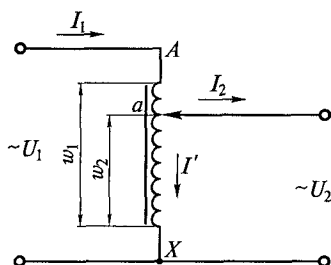


Рис. 8.4. Автотрансформатор

чивающее действие на магнитопровод трансформатора. Другими словами, ток I_2 создает МДС $I_2 w_2$, направленную встречно МДС $I_{xx} w_1$. Но поскольку основной магнитный поток в магнитопроводе остается практически неизменным, то размагничивающее действие вторичного тока компенсируется увеличением тока в первичной обмотке до значения I_1 . Так I_1 превышает ток I_{xx} на величину, необходимую для компенсации размагничивающего действия МДС вторичного тока. Таким образом, любое изменение величины тока во вторичной обмотке трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока.

В результате перемагничивания стали в магнитопроводе возникают потери энергии на гистерезис и вихревые токи. Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока холостого хода, которая не превышает 6... 8 % номинальной мощности трансформатора. Если пренебречь этими потерями, то можно считать, что $P_1 \approx P_2$, т.е. мощности обмоток равны.

Трансформаторы могут выполняться на любое число фаз, а также работать параллельно в зависимости от потребностей нагрузки. Параллельное включение трансформаторов (рис. 8.3) дает возможность при изменениях нагрузки включать или отключать один из трансформаторов, повышая тем самым коэффициент использования работающего трансформатора.

Для преобразования напряжения вовсе не обязательно иметь две обмотки на сердечнике. Вполне можно обойтись одной обмоткой, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной системам. Электрическая схема такого трансформатора, называемого *автотрансформатором* (рис. 8.4), широко распространена на подвижном составе.

Для автотрансформатора сохраняются соотношения для ЭДС

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = K \quad (8.7)$$

и для тока

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K}, \quad (8.8)$$

но поскольку I_1 и I_2 (токи первичной и вторичной обмоток) направлены противоположно, то в общей части обмотки результирующий ток равен их разности:

$$I = I_1 - I_2, \quad (8.9)$$

что дает возможность выполнять общую часть обмотки проводом меньшего сечения.

Трансформаторы нормируются не по активной (действительной), а по кажущейся мощности ($S_{\text{ном}}$), равной

$$S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}, \quad (8.10)$$

которая является основной паспортной характеристикой трансформатора.

Активная мощность

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi \quad (8.11)$$

зависит от $\cos \varphi$, т. е. от характера нагрузки (свойств потребителя мощности), и не может характеризовать трансформатор. С другой стороны, потери и КПД трансформатора зависят от активных мощностей первичной и вторичной обмоток. Итак, потери в трансформаторе определяются выражением

$$\sum P = P_1 - P_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (8.12)$$

а КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}. \quad (8.13)$$

За номинальное значение КПД принимается его величина при номинальных токах и напряжениях и при $\cos \varphi = 0,8$.

Потери в трансформаторе разделяются на постоянные и переменные. Постоянные — это магнитные потери в стали сердечника. Они связаны с его непрерывным перемагничиванием и являются функцией магнитного потока и частоты тока, но не зависят от нагрузки.

Переменные потери возникают в обмотках трансформатора: $\Delta P_1 = I_1^2 r_1$ и $\Delta P_2 = I_2^2 r_2$, где r_1 и r_2 — омическое сопротивление первичной и вторичной обмоток. На холостом ходу потери во вторичной обмотке отсутствуют, поэтому магнитные (постоянные) потери составляют потери холостого хода трансформатора. При малых полезных нагрузках трансформатора сильно сказывается влияние постоянных потерь.

Поскольку угол сдвига между током и напряжением зависит от параметров нагрузки, то в паспорте трансформатора нормируются не потери, а падение напряжения в обмотках при номинальном значении тока. При этом нормируется отношение полного падения напряжения, соответствующего номинальному току, $U_{zном}$ к номинальному первичному напряжению $U_{1ном}$, выраженное в процентах:

$$e_x = \frac{U_{zном}}{U_{1ном}} 100. \quad (8.14)$$

Для больших трансформаторов величина e_x не должна превышать 5... 6 %.

Величина

$$U_{zном} = \frac{e_x U_{1ном}}{100} \quad (8.15)$$

называется *напряжением короткого замыкания* трансформатора. Если замкнуть накоротко вторичную обмотку, то для получения номинальных токов $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ потребуется подвести к зажимам первичной обмотки напряжение $U_{zном}$. Зависимость напряжения вторичной обмотки U_2 от токов нагрузки $I_{2н}$ называется *рабочей характеристикой* трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Может ли трансформатор работать при несинусоидальном токе?
2. Почему сердечники трансформаторов изготавливают шихтованными?
3. Чем отличаются конструкции трансформаторов и магнитных усилителей?
4. В чем состоит отличие конструкций трансформатора и автотрансформатора?
5. Объясните необходимость параллельного включения трансформаторов.
6. Чем вызваны потери в трансформаторах?