

**И. И. Белополюский**

**Расчет трансформаторов и  
дросселей малой мощности**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
И11

И11 **И. И. Белопольский**  
Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И. И. Белопольский –  
М.: Книга по Требованию, 2013. – 270 с.

**ISBN 978-5-458-39443-7**

**ISBN 978-5-458-39443-7**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



---

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

#### 1-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

*Трансформаторами* называются статические электромагнитные устройства, используемые для преобразования электрической энергии и ее передачи из одних цепей в другие. С помощью трансформаторов можно преобразовывать основные параметры электрической энергии в цепях переменного тока: напряжение, силу тока и форму кривой. Каждое из этих преобразований обычно осуществляется одновременно с передачей энергии электромагнитным путем в другую электрическую цепь, не связанную непосредственно с той цепью, откуда эта энергия подводится. Однако передача энергии в трансформаторе возможна не только электромагнитным, но и комбинированным (электромагнитно-электрическим) путем. Такой тип трансформатора известен под названием *автотрансформатора*.

Трансформатор может быть использован также для передачи энергии электромагнитным путем из одной цепи в другую без ее преобразования. Такой тип трансформатора, применяемый для изоляции одной электрической цепи от другой, называется *изолирующим*.

Следует отметить, что в трансформаторах осуществляется одновременно преобразование не одного, а нескольких перечисленных выше параметров электрической энергии. Так, например, преобразование напряжения всегда происходит с изменением силы тока.

*Дросселями* называются статические электромагнитные устройства, используемые в электрических цепях в качестве индуктивных сопротивлений.

Различают следующие разновидности дросселей. *Дроссели переменного тока*, называемые также индуктивными катушками, *сглаживающие дроссели* электрических фильтров и *дроссели насыщения*.

Дроссели могут использоваться как в цепях переменного тока (индуктивные катушки и дроссели насыщения), так и в цепях, в которых, кроме переменной, имеется и постоянная составляющая напряжения или тока (сглаживающие дроссели).

В дросселях и трансформаторах имеют место различные по своему характеру электромагнитные процессы. Основное различие заключается в том, что магнитный поток в сердечнике трансформатора определяется приложенным напряжением и практически не зависит от тока нагрузки, в то время как магнитный поток в сердечнике дросселя определяется током нагрузки и практически не зависит от приложенного к цепи напряжения.

Электромагнитные процессы в сглаживающих дросселях и в дросселях насыщения существенно отличаются от аналогичных процессов в дросселях переменного тока наличием в их сердечниках как переменного, так и постоянного магнитного потока.

Следует, однако, отметить, что в сердечниках некоторых типов трансформаторов (например, выпрямительных) протекает также и постоянный (подмагничивающий) магнитный поток.

В основу классификации многочисленных разновидностей трансформаторов и дросселей могут быть положены разнообразные признаки, определяемые их электрическими параметрами и конструкцией.

Трансформаторы питания малой мощности обычно делятся:

а) по напряжению — на низковольтные, высоковольтные и высокопотенциальные;

б) по частоте питающей сети — на трансформаторы промышленной частоты (50 гц) и на трансформаторы повышенной частоты (400—2400 гц);

в) по числу фаз — на однофазные, трехфазные, шестифазные и т. д.;

г) по коэффициенту трансформации — на повышающие и понижающие;

д) по числу обмоток — на двухобмоточные и на многообмоточные;

е) по виду связи между обмотками — на трансформаторы с электромагнитной связью (с изолированными обмотками) и на автотрансформаторы с электромагнитной и электрической связью, т. е. со связанными обмотками;

ж) по конструкции магнитопровода — на стержневые, броневые и тороидальные;

з) по конструкции обмоток — на катушечные, галетные и тороидальные;

и) по конструкции всего трансформатора — на открытые и закрытые;

к) по назначению — на выпрямительные, накальные, анодно-накальные и т. д.

Некоторые из перечисленных выше видов классификации трансформаторов (пп. «а», «б», «ж», «з», «и») могут быть также использованы и для классификации дросселей. Кроме того они подразделяются:

а) по виду вольт-амперной характеристики — на линейные (ненасыщенные) и нелинейные (насыщенные);

б) по возможности изменения величины индуктивности — на регулируемые и нерегулируемые;

в) по виду регулировки — на дроссели регулируемые путем изменения величины воздушного зазора или путем изменения тока подмагничивания;

г) по назначению — на балластные, токоограничивающие (реакторы), сглаживающие и регулирующие.

## **1-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ**

Простейший трансформатор, принципиальная схема которого приведена на рис. 1-1, состоит из замкнутого магнитопровода и двух обмоток. Одна из обмоток (первичная) подключается к источнику переменного напряжения; другая обмотка (вторичная) соединяется с нагрузкой.

Рассмотрим вначале режим *холостого хода трансформатора*, т. е. такой режим, при котором вторичная обмотка отключена от нагрузки (рис. 1-2). Если первичную обмотку соединить с источником переменного напряжения  $U_1$ , то по этой обмотке будет проходить переменный ток  $I_0$ , называемый током холостого хода. Этот ток со-

здает переменный магнитный поток  $\Phi_0$ , который, замыкаясь по магнитопроводу, пронизывает одновременно первичную и вторичную обмотки и индуцирует в них э. д. с. При синусоидальной форме кривой питающего

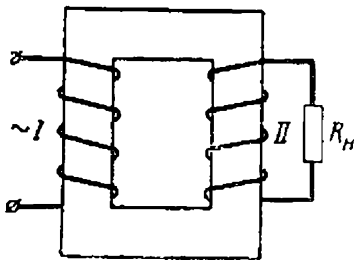


Рис. 1-1 Схема простейшего трансформатора.

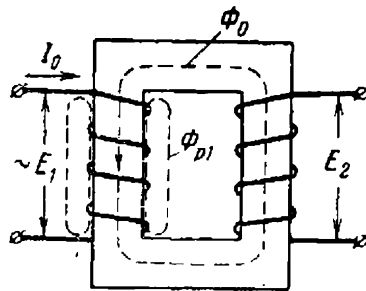


Рис. 1-2. Режим холостого хода трансформатора.

напряжения эффективные значения этих э. д. с. будут на основе закона электромагнитной индукции равны:

$$E_1 = 4kf\omega_1\Phi_{\text{макс}}10^{-8}; \quad (1-1)$$

$$E_2 = 4kf\omega_2\Phi_{\text{макс}} \cdot 10^{-8}, \quad (1-2)$$

где  $k$  — коэффициент формы кривой напряжения; для синусоидальной кривой  $k = 1,11$ ;

$f$  — частота источника переменного напряжения;

$\omega_1, \omega_2$  — числа витков обмоток;

$\Phi_{\text{макс}}$  — амплитудное значение магнитного потока.

Из выражений (1-1) и (1-2) видно, что индуцируемые в обмотках э. д. с. прямо пропорциональны числам витков этих обмоток.

Разделив (1-1) на (1-2), получим;

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_T, \quad (1-3)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформации.

Если пренебречь потерями энергии в первичной обмотке и в магнитопроводе, а также считать, что весь магнитный поток замыкается только по магнитопроводу, то э. д. с., индуцированная потоком  $\Phi_0$  в первичной обмотке, будет на основании закона Ленца противо-

ложна по знаку приложенному напряжению  $U_1$ , а по абсолютной величине — равна ему, т. е.

$$U_1 = -E_1. \quad (1-4)$$

В реальном трансформаторе ток холостого хода, кроме намагничивающей (реактивной) составляющей  $I_{0p}$ , создающей в сердечнике трансформатора магнитный поток  $\Phi_0$ , содержит также и активную составляющую этого тока  $I_{0a}$ , обусловленную потерями энергии в сердечнике.

Поэтому

$$I_0 = I_{0a} + I_{0p}. \quad (1-5)$$

Первичная обмотка реального трансформатора обладает активным сопротивлением  $r_1$ , и в ней имеет место активное падение напряжения

$$I_0 r_1 = -E_{a1}, \quad (1-6)$$

где  $E_{a1}$  — фиктивная э. д. с., компенсирующая падение напряжения в первичной обмотке.

При прохождении тока по первичной обмотке создается не только основной магнитный поток  $\Phi_0$ , замыкающийся по магнитопроводу, но и магнитный поток рассеяния  $\Phi_{p1}$ , замыкающийся в основном по воздуху (рис. 1-2). Этот поток индуцирует в первичной обмотке э. д. с. рассеяния

$$E_{p1} = I_0 x_1, \quad (1-7)$$

где  $x_1$  — фиктивное сопротивление, называемое индуктивным сопротивлением рассеяния первичной обмотки.

На основании закона равновесия э. д. с. приложенное напряжение  $U_1$  должно уравниваться геометрической суммой  $E_1$ ,  $E_{a1}$  и  $E_{p1}$ , т. е.

$$U_1 + (E_1 + E_{a1} + E_{p1}) = 0. \quad (1-8)$$

Подставив в (1-8) значения  $E_{a1}$  и  $E_{p1}$  из (1-6) и (1-7), получим:

$$U_1 = -E_1 + I_0 r_1 + I_0 x_1, \quad (1-9)$$

На рис. 1-3 приведена векторная диаграмма трансформатора, работающего в режиме холостого хода. Из диаграммы видно, что в этом режиме векторы э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$  сдвинуты по отношению к приложенному напряжению на угол, близкий к  $180^\circ$ . Так как при холостом ходе падение напряжения в первичной обмотке обычно относительно невелико, то векторы  $U_1$  и  $E_1$  лишь незначительно отличаются по величине друг от друга. Поэтому коэффициент трансформации можно приблизительно определить как отношение напряжений обмоток при холостом ходе, т. е.

$$k_T \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (1-10)$$

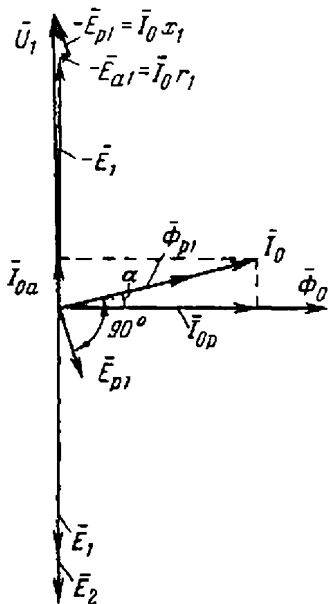


Рис. 1-3. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

Рассмотрим теперь физические процессы, имеющие место во время работы трансформатора под нагрузкой.

Если к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение  $U_1$ , а вторичную обмотку соединить с нагрузкой, то в первичной и вторичной обмотках появятся токи  $I_1$  и  $I_2$  (рис. 1-4), а в его магнитопроводе — магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Так как причиной появления потока  $\Phi_2$  является

поток  $\Phi_1$ , то оба потока на основании закона Ленца направлены встречно. При увеличении тока нагрузки  $I_2$  поток  $\Phi_2$  увеличивается, а суммарный магнитный поток в магнитопроводе  $\Phi_1 - \Phi_2$  уменьшается. Вследствие этого индуцированные суммарным потоком э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$  уменьшаются. Уменьшение  $E_1$  вызывает увеличение тока первичной обмотки  $I_1$  и потока  $\Phi_1$ , а также суммарного магнитного потока  $\Phi_1 - \Phi_2$ . Уменьшение  $E_2$  уменьшает величину тока  $I_2$  и потока  $\Phi_2$  и поэтому приводит к увеличению суммарного магнитного потока.

Таким образом, изменения суммарного магнитного

потока, вызванные увеличением тока  $I_2$ , взаимно компенсируются, в результате чего суммарный поток остается практически неизменным.

Совершенно очевидно, что и при постепенном уменьшении тока  $I_2$  от некоторого значения до нуля суммарный поток останется неизменным. Отсюда следует, что суммарный поток равен потоку при холостом ходе трансформатора, т. е.

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0. \quad (1-11)$$

Величину тока  $I_1$  можно найти на основании закона сохранения энергии. Если пренебречь потерями мощности в обмотках и в магнитопроводе, то мощность первичной обмотки равна мощности вторичной обмотки, т. е.

$$E_1 I_1 = E_2 I_2, \quad (1-12)$$

откуда

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1-13)$$

Сравнивая (1-3) и (1-13), получаем:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{I_2}{I_1} = k_T, \quad (1-14)$$

откуда

$$I_1 = \frac{1}{k_T} I_2. \quad (1-15)$$

Выше мы установили, что магнитный поток в сердечнике трансформатора остается неизменным при различных значениях тока нагрузки. Поэтому не изменяется и магнитодвижущая сила (м. д. с.), создающая этот поток. На основании этого

$$(\mathbf{Aw})_0 = (\mathbf{aw})_n, \quad (1-16)$$

где  $(\mathbf{Aw})_0$  — ампер-витки холостого хода;

$(\mathbf{Aw})_n$  — ампер-витки нагруженного трансформатора.

При холостом ходе м. д. с. равна:

$$(\mathbf{Aw})_0 = I_0 \omega_1, \quad (1-17)$$

Если трансформатор работает под нагрузкой, то на магнитопровод действует сумма м. д. с. первичной и вторичной обмоток, т. е.

$$(\mathbf{Aw})_n = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2. \quad (1-18)$$

Подставив в (1-16) значения  $(Aw)_0$  и  $(Aw)_{II}$  из (1-17) и (1-18), получим:

$$I_0 \omega_1 = I \omega_1 + I_2 \omega_2. \quad (1-19)$$

Уравнение (1-19) называется *уравнением равновесия магнитодвижущих сил*. Разделив правую и левую часть уравнения (1-19) на  $\omega_1$ , получим:

$$I_0 = I_1 + I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I_1 + \frac{I_2}{k_T}. \quad (1-20)$$

В нагруженном трансформаторе, кроме основного магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу,

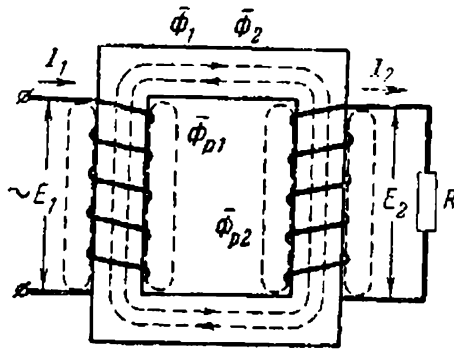


Рис 1-4 Работа трансформатора под нагрузкой.

имеются потоки рассеяния  $\Phi_{p1}$  и  $\Phi_{p2}$ , замыкающиеся в основном по воздуху (рис. 1-4). Эти потоки индуктируют в первичной и вторичной обмотках э. д. с. рассеяния:

$$E_{p1} = - I_1 x_1; \quad (1-21)$$

$$E_{p2} = - I_2 x_2. \quad (1-22)$$

Для замкнутого контура, образованного источником напряжения и первичной обмоткой трансформатора, по аналогии с (1-9) имеем:

$$U_1 = - E_1 + I_1 r_1 + I_1 x_1. \quad (1-23)$$

Вторичная обмотка трансформатора (являющаяся источником э. д. с.  $E_2$ ) и нагрузка образуют второй замкну-

тый контур, для которого на основании закона равновесия э. д. с. имеем:

$$E_2 = U_2 - E_{a2} - E_{1,2} = U_2 + I_2 r_2 + I_2 x_2. \quad (1.24)$$

На рис. 1-5 приведена векторная диаграмма трансформатора, работающего при активно-индуктивной нагрузке.

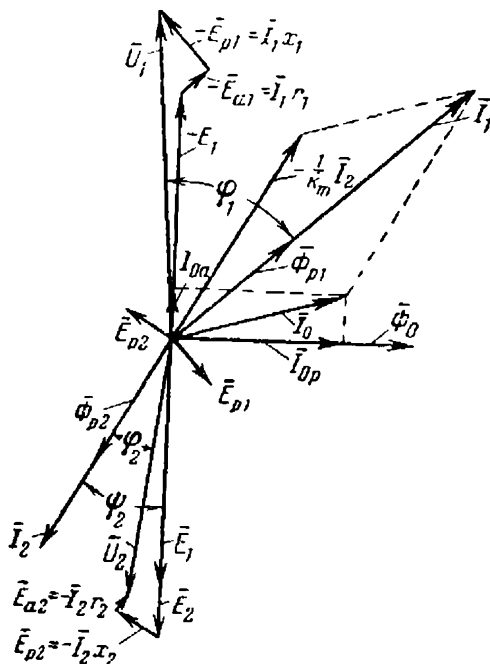


Рис. 1-5 Векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

### 1-3. ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Основным параметром трансформатора является его мощность. Различают электромагнитную, полезную, расчетную и типовую мощности трансформатора.

*Электромагнитной мощностью* трансформатора называется мощность, передаваемая из первичной обмотки во вторичную электромагнитным путем; она равна про-

изведению  $\varepsilon$  д. с этой обмотки на величину тока нагрузки, т. е.

$$P_{\text{эм}} = E_2 I_2. \quad (1-25)$$

*Полезной, или отдаваемой, мощностью* трансформатора называется произведение эффективного напряжения на зажимах вторичной обмотки на величину ее нагрузочного тока

$$P_2 = U_2 I_2. \quad (1-26)$$

*Расчетной мощностью* трансформатора называется произведение эффективного тока, протекающего по обмотке, на величину напряжения на ее зажимах. Эта мощность характеризует собой габаритные размеры обмотки, так как число витков обмотки определяется напряжением на ее зажимах, а сечение провода — эффективным током. Расчетная мощность первичной обмотки равна произведению напряжения на ее зажимах и тока, потребляемого трансформатором из сети, т. е.

$$P_1 = U_1 I_1. \quad (1-27)$$

В том случае, когда трансформатор работает на чисто активную нагрузку, отдаваемая им мощность равна расчетной мощности вторичной обмотки и может быть найдена по формуле (1-26). В трансформаторах же, работающих на выпрямительные схемы, кривые токов первичной и вторичной обмоток являются, как правило, несинусоидальными. Кроме того, в некоторых схемах выпрямления через вторичную обмотку протекает постоянная составляющая выпрямленного тока, в результате чего значительно возрастает намагничивающий ток трансформатора. Поэтому в выпрямительных трансформаторах расчетные мощности обмоток всегда больше, чем величина активной мощности, отдаваемой нагрузке [Л. 1, 2].

*Типовой, или габаритной, мощностью* называется мощность, определяющая размеры всего трансформатора. Ее величину определяют по формуле

$$P_{\text{тип}} = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad (1-28)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — расчетные мощности обмоток трансформатора.