ДИСЦИПЛИНА

«ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Тема «Трансформаторы»

**Учебное пособие**

Оглавление

# Основные понятия. Назначение, области применения трансформатора

1. **Устройство, принцип действия трансформатора**
2. **Уравнения состояния трансформатора**
3. **Особенности реального трансформатора**
4. **Внешняя характеристика трансформатора**
5. **Режимы работы трансформатора**
6. **Потери энергии, КПД трансформатора**
7. **Паспортные данные трансформатора**
8. **Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора**
9. **Построение характеристик трансформатора по пас- портным данным**
10. **Особенности конструкции трансформаторов**
    1. **Основные понятия. Назначение, области применения трансформатора**

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, пред- назначенное для преобразования электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

Такое преобразование необходимо во всех отраслях промышленности. В частности в энергетике применение трансформаторов обеспечивает основное преимущество электрической энергии – возможность передачи ее на большие расстояния с минимальными потерями. При передаче электроэнергии в линии электропередачи возникают потери энергии. Эти потери определяются током *Iл* в линии передачи и сопротивлением ее проводов *Rл*:

*∆Pл = Iл 2 Rл* . (6.1)

Мощность, передаваемая в линии передачи, определяется током и на- пряжением в ЛЭП:

P = *IлUл* . (6.2)

При относительно низком напряжении *Uл* ток в линии может быть весь- ма большим. Большой ток в проводах линии электропередачи в соответствии с (6.1) обусловливает значительные потери. Для уменьшении этих потерь при той же передаваемой мощности необходимо уменьшить ток в линии электропере- дачи. Для этого напряжение в ЛЭП должно быть повышено. Эта задача решает- ся с помощью трансформатора. Поэтому силовые трансформаторы являются необходимым элементом промышленных электрических сетей. В начале линии передачи со стороны генератора устанавливается повышающий трансформатор, который увеличивает напряжение в десятки раз, а в конце ЛЭП со стороны по- требителей устанавливается понижающий трансформатор, который уменьшает напряжение до номинального напряжения потребителя.

В электротехнологии используются сварочные и печные трансформато-

ры.

Печные трансформаторы обеспечивают напряжение, необходимое для

питания электродуговых и индукционных печей; сварочный трансформатор создает напряжение, необходимое для горения электрической дуги в процессе электрической сварки.

Кроме того, трансформаторы разных типов широко применяются в раз- личных областях электротехники, электроники, электротехнологии, в устройст- вах измерения и контроля, автоматического управления и др.

Трансформаторы разных типов имеет разные особенности конструкции и обладают разными характеристиками. Однако в основе работы всех транс- форматоров лежит один принцип – индукционное действие магнитного поля (явление электромагнитной индукции).

# Устройство, принцип действия трансформатора

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Это явление предполагает наличие переменного магнитного поля. Для создания магнитного поля служит магнитная цепь. Поэтому основой устройства транс- форматора является магнитная цепь, которая представляет из себя магнитопро- вод с электрическими обмотками.

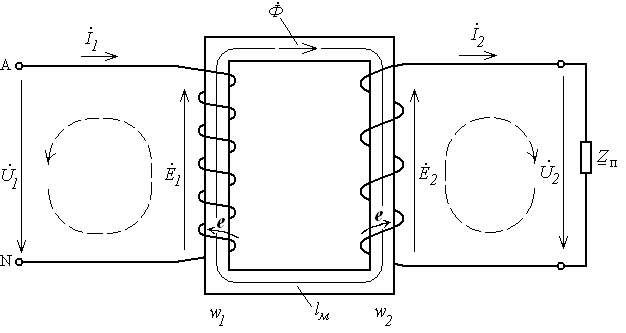
Электромагнитная схема простейшего идеального трансформатора показана на рис.6.1. В таком трансформаторе магнитопроводом может быть прямоугольный ферромагнитный сердечник, на котором размещены две электрические обмот- ки. Каждая из обмоток имеет определенное количество витков (w1 и w2), охва- тывающих стержни магнитопровода.

Рис.6.1. Электромагнитная схема идеального трансформатора

Обмотка с числом витков *w1* называется первичной обмоткой и подключается к зажимам A-N источника электроэнергии переменного напряжения *U*&1.

Обмотка с числом витков *w2* называется вторичной. К зажимам вторичной об-

мотки подключается приемник электроэнергии с сопротивлением

*Zп* .

Под действием переменного напряжения *U*&1 источника в первичной обмотке

возникает первичный ток

*I*&1. Этот ток, замыкаясь по виткам первичной обмот-

ки, создает переменную магнитодвижущую силу (МДС) в магнитной цепи

трансформатора. Под действием МДС возникает переменное магнитное поле.

При этом магнитный поток *Ф*& , замыкаясь по ферромагнитному сердечнику, пронизывает все витки обеих обмоток. Согласно закону электромагнитной ин- дукции переменный магнитный поток *Ф*& , пронизывая витки обмоток, индукти- рует в каждом из них ЭДС индукции *е*. Положительное направление ЭДС одно- го витка ***е*** соотносится с направлением магнитного потока как обозначено на рис.6.1 . При этом ее величина определяется скоростью изменения магнитного потока:

*e*  *dФ*& *dt*

&

. (6.3)

Тогда в первичной обмотке с числом витков *w1* создается ЭДС индукции пропорциональная числу витков *w1*:

*E*&1,

*E*&1  *e*&*w*1 , (6.4)

а во вторичной обмотке с числом витков *w2* создается ЭДС нальная числу витков *w2* :

*E*& 2 , пропорцио-

*E*& 2

 *e*&*w*2

. (6.5)

Вторичная ЭДС

*E*& 2

определяет напряжение на зажимах вторичной обмотки

*U*& 2 , к которой подключен приемник, и ток приемника (вторичный ток) *I*&2 .

Таким образом, приемник потребляет от трансформатора электрическую энер- гию.

Соотношение по величине между первичным и вторичным напряжениями на- зывается коэффициентом трансформации:

*kТ = U1/U2* . (6.6)

Для того, чтобы определить это соотношение запишем уравнения по II закону Кирхгофа для электрических контуров первичной и вторичной цепей, обозна- ченных на рис.6.1 пунктиром .

*U*&1  *E*&1 , (6.7)

*U*& 2

 *E*& 2 . (6.8)

Уравнения (6.7) , (6.8) называют уравнениями электрического состояния иде- ального трансформатора. Исходя из этих уравнений и с учетом (6.4) , (6.5), ко- эффициент трансформации

*kТ = U1/U2 = E1 / E2* = *е w1 / е w2 = w1 / w2 ,* (6.9)

т.е. коэффициент трансформации определяется соотношением числа витков первичной и вторичной обмоток.

Если число витков вторичной обмотки меньше, чем в первичной (*w2< w1)*, вто- ричное напряжение меньше первичного (*U2 < U1)* , коэффициент трансформа- ции *kТ > 1*, и такой трансформатор называют понижающим трансформатором.

Если число витков вторичной обмотки больше, чем в первичной (*w2 > w1)*, вто- ричное напряжение больше первичного (*U2 > U1)* , коэффициент трансформа- ции *kТ < 1*, и такой трансформатор называют повышающим трансформатором.

Трансформатор с одинаковым числом витков в обеих обмотках обладает коэф- фициентом трансформации *kТ =1*. Такой трансформатор называют разделитель- ным.

Таким образом, трансформатор посредством магнитной связи двух обмоток в магнитной цепи преобразует электрическую энергию источника с напряжением *U1* в электрическую энергию, отдаваемую приемнику с напряжением *U2*.

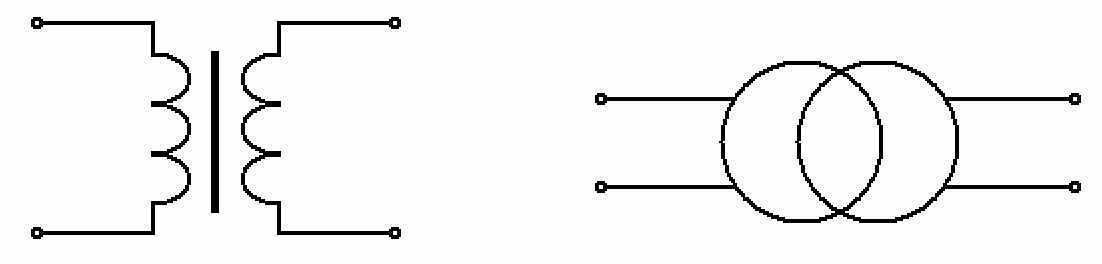
При этом вторичное напряжение

*U2 = U1 / kТ .* (6.10)

Например, трансформатор, имеющий номинальное первичное напряжение U1ном

= 220В, число витков первичной обмотки w1 = 1300 витков и число витков вто- ричной обмотки w2 = 213 витков, обладает коэффициентом трансформации kТ = 1300 / 213 = 6,1 (понижающий трансформатор) и создает вторичное напряжение U2 = 220 / 6,1 = 36В.

Для обозначения трансформатора в электрических схемах используют его ус- ловное графическое обозначение, показанное на рис.6.2 .



а б

Рис.6.2. Условное графическое обозначение трансформатора в схемах электри- ческих цепей (а – развернутое, б – упрощенное)

# Уравнения состояния трансформатора

Для математического описания режимов работы трансформатора используют уравнения электрического и магнитного состояния.

Уравнения электрического состояния записываются по II закону Кирхгофа для электрических контуров первичной и вторичной цепей трансформатора. На- пример, для идеального трансформатора они имеют вид (6.7), (6.8):

*U*&1  *E*&1 ,

*U*&2

 *E*&2 .

Уравнение магнитного состояния составляется при анализе магнитной цепи трансформатора.

При этом следует подчеркнуть, что электрические цепи первичной и вторичной обмоток не соединены между собой. Они объединены общим магнитопрово- дом, образующим магнитную цепь.

Связь между первичной и вторичной цепями описывается уравнением магнит- ного состояния, составленным по закону полного тока (см. раздел "Магнитные цепи").

В рассматриваемой электромагнитной схеме идеального трансформатора в ка- честве контура магнитного поля следует принять среднюю линию магнитопро- вода, по которому замыкается магнитный поток *Ф*. В качестве проводников, пронизывающих этот контур, следует принять все витки первичной и вторич- ной обмоток с соответствующими направлениями токов в них. С учетом взаим- ного направления магнитного потока и токов в обмотках уравнение по закону полного тока имеет вид:

*H*&*l м*

 *I*&1*w*1  *I*&2 *w*2

, (6.11)

где *H* – напряженность магнитного поля в магнитопроводе;

*lм* – длина средней линии магнитопровода (контур магнитной цепи). Длина средней линии магнитопровода определяется его конструкцией. Напряженность магнитного поля

*H = Ф/Sм ,* (6.12)

где Sм – сечение магнитопровода.

Из теории магнитных цепей (см. раздел "Магнитные цепи") известно, что в магнитной цепи с переменной МДС величина магнитного потока *Ф* определя- ется величиной напряжения источника *U1*, приложенного к обмотке:

*Ф = U1 / (*4,44 *f w1)*. (6.13)

При достаточной мощности источника можно считать величину напряжения *U1* неизменной. При этом величина магнитного потока *Ф* и напряженность маг- нитного поля в магнитопроводе *H* также неизменны с изменением режима ра-

боты трансформатора. Поэтому в уравнении (6.11) левая часть не меняется с изменением режима работы.

Правая часть уравнения (6.11) зависит от режима работы. В частности при от- ключенном приемнике возникает режим холостого хода, когда ток приемника (вторичный ток трансформатора) *I2* равен нулю (*I2* = 0). Первичный ток в этом режиме называют током холостого хода (*I0*). При этом в уравнении по закону полного тока (6.11) второе слагаемое в правой части равно нулю, а первое сла- гаемое определяется током холостого хода:

*H*&*l м*

Из равенств (6.11) и (6.14) следует:

 *I*&0 *w*1 , (6.14)

*I*&1*w*1  *I*&2 *w*2  *I*&0 *w*1. (6.15)

Преобразуя это уравнение, можно записать:

*I*&1  *I*&0

 *I*&2 ( *w*2 ) , (6.16)

*w*1

или

*I*&1  *I*&0

* *I*&2 / *kТ*

(6.17)

Полученное уравнение называют уравнением магнитного состояния трансфор- матора. Оно описывает соотношение между токами первичной и вторичной це- пей трансформатора, объединенных магнитной цепью. С увеличением мощно- сти приемника вторичный ток возрастает, при этом первичный ток также воз- растает.

Таким образом, Система уравнений электрического и магнитного состояния для идеального трансформатора имеет вид:

*U*&1  *E*&1 ; (6.18)

*U*&2

 *E*&2 ; (6.19)

*I*&1  *I*&0  *I*&2 / *kТ .* (6.20)

Уравнения состояния трансформатора позволяют анализировать режимы его работы и его характеристики.

# Особенности реального трансформатора

Для анализа реального трансформатора следует учитывать дополнительные особенности его работы, существенно влияющие на его характеристики.

Первая особенность состоит в следующем.

Как было показано ранее, обмотки трансформатора при совместном действии создают рабочий магнитный поток *Ф*. Этот поток замыкается по магнитопрово- ду и обеспечивает магнитную связь первичной и вторичной цепей трансформа- тора.

В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока возникают дополнительные магнитные потоки. В частности, первичная обмотка создает дополнительный магнитный поток, который замыкается внутри обмотки по магнитопроводу и снаружи по воздушным путям (рис.6.3) . Этот магнитный по- ток в отличие от основного магнитного потока не сцепляется с вторичной об- моткой и не обеспечивает их магнитную связь. Его называют потоком рассея- ния первичной обмотки *Фрас1* . Вторичная обмотка также создает поток рассея- ния вторичной обмотки *Фрас2* . Потоки рассеяния не обеспечивают магнитную связь первичной и вторичной обмоток, но индуцируют ЭДС самоиндукции ка- ждый в своей обмотке, которые оказывают влияние на работу трансформатора и требуют их учета. Для учета этих явлений в электромагнитную схему транс- форматора вводят индуктивные элементы с соответствующими индуктивными сопротивлениями рассеяния первичной и вторичной обмоток (*X1* и *X2*) (рис.6.3).

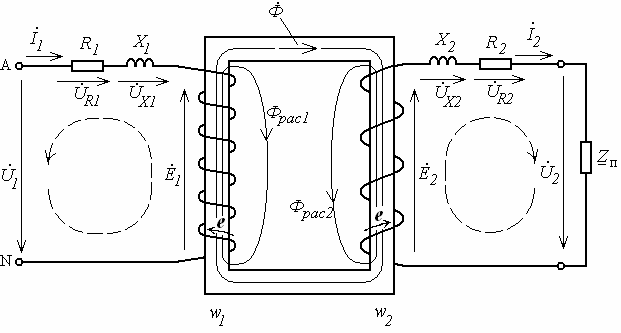


Рис.6.3. Электромагнитная схема реального трансформатора

Вторая особенность реального трансформатора состоит в следующем.

Обмотки трансформатора выполнены из реального электрического проводника, который имеет определенные диаметр и длину. Как известно такой проводник

обладает электрическим сопротивлением, пропорциональным длине проводни- ка и обратнопропорциональным его сечению. Обмотки трансформатора могут иметь значительное число витков. При этом проводник, из которого они изго- товлены может быть тонким и весьма протяженным, а его электрическое со- противление существенным по сравнению с остальными параметрами транс- форматора. Это электрическое сопротивление обуславливает дополнительное напряжение, определяемое законом Ома, и требует его учета при анализе рабо- ты трансформатора. Для учета этой особенности в электромагнитную схему вводят резисторы с сопротивлениями первичной и вторичной обмоток (*R1* и *R2*).

Таким образом, окончательно электромагнитная схема реального трансформа- тора с учетом его особенностей имеет вид, показанный на рис.6.3 .

Для учета указанных особенностей в уравнениях состояния трансформатора со- ставим уравнения по II закону Кирхгофа для контуров первичной и вторичной обмоток в электромагнитной схеме на рис.6.3 .

Для первичного контура:

*U*&1  *E*&1  *U*& *R*1  *U*& *X* 1

(6.21)

Для вторичного контура:

*U*& 2

 *E*& 2

* *U*& *R*2
* *U*& *X* 2

(6.22)

В этих уравнениях слагаемые *U*& *R*1,*U*& *X*1,*U*& *R*2,*U*& *X* 2

определяют падение напря-

жения на собственных активном и индуктивном сопротивлениях обмоток, ко- торые отражают особенности реального трансформатора.

С учетом соотношений по закону Ома на элементах выражения (6.21), (6.22)

принимают вид:

*U*&1  *E*&1  *I*&1*R*1 

*jI*&1 *X*1  *E*&1  *I*&1 (*R*1 

*jX*1 )

(6.23)

*U*& 2

 *E*& 2

 *I*&2 *R*2 

*jI*&2 *X* 2

 *E*& 2

 *I*&2 (*R*2 

*jX* 2)

(6.24)

Уравнения (6.23), (6.24) описывают процессы в электрических цепях трансформатора.

Как следует из уравнений (6.23), (6.24), напряжение источника *U*&1 уравновеши-

вается противоЭДС самоиндукции

*E*&1 и падением напряжения на собственном

активном и индуктивном сопротивлениях первичной обмотки ( *I*&1*R*1 *и jI*&1 *X*1).

Напряжение вторичной обмотки

*U*& 2

определяется величиной ЭДС индукции

вторичной обмотки

*E*& 2

за вычетом падения напряжения на активном и индук-

тивном сопротивлениях вторичной обмотки ( *I*&2 *R*2 и *jI*&2 *X* 2 ).

Таким образом уравнения электрического и магнитного состояния, описываю- щие процессы в электрических и магнитной цепи реального трансформатора имеют вид (6.17), (6.23), (6.24):

*U*&1  *E*&1  *I*&1 (*R*1 

*jX*1 )

(6.25)

*U*& 2

 *E*& 2

 *I*&2 (*R*2 

*jX* 2)

(6.26)

*I*&1  *I*&0  *I*&2 / *kТ .* (6.27)

# Внешняя характеристика трансформатора

Как показано выше (6.10), номинальное вторичное напряжение трансформатора определяется номинальным первичным напряжением и коэффициентом транс- формации. Однако это напряжение меняется с изменением режима работы трансформатора в определенных пределах. Режим работы трансформатора оп- ределяется величиной его нагрузки. Таким образом, вторичное напряжение трансформатора зависит от величины его нагрузки.

Нагрузку трансформатора создает приемник электрической энергии, подклю- ченный к зажимам его вторичной обмотки. Т.е. под величиной нагрузки следу- ет понимать мощность этого приемника, которая определяется его напряжени- ем *U2* и током *I2* :

*P2 = U2 I2 cosφ2* , (6.28)

где *cosφ2* – коэффициент мощности приемника.

При определенных допущениях можно пренебречь изменением напряжения U2.

При этом можно считать, что мощность приемника пропорциональна току I2. Тогда под величиной нагрузки можно понимать величину тока приемника (вто- ричный ток трансформатора).

Таким образом, изменение вторичного напряжения трансформатора при изме- нении режима его работы формально выражается зависимостью вторичного на- пряжения от вторичного тока *U2 = f(I2).*

Эта зависимость называется внешней характеристикой трансформатора.

Аналитическое выражение внешней характеристики трансформатора определя- ется уравнением электрического состояния для вторичной цепи (6.26):

*U*& 2

 *E*& 2

 *I*&2 (*R*2 

*jX* 2)

(6.29)

Из этого выражения следует, что с увеличением вторичного тока (увеличением нагрузки трансформатора) вторичное напряжение уменьшается. Это изменение вторичного напряжения определяется падением напряжения на собственном

активном и индуктивном сопротивлениях обмотки эта зависимость показана на рис.6.4.

*I*&2 (*R*2 

*jX* 2) *.* Графически

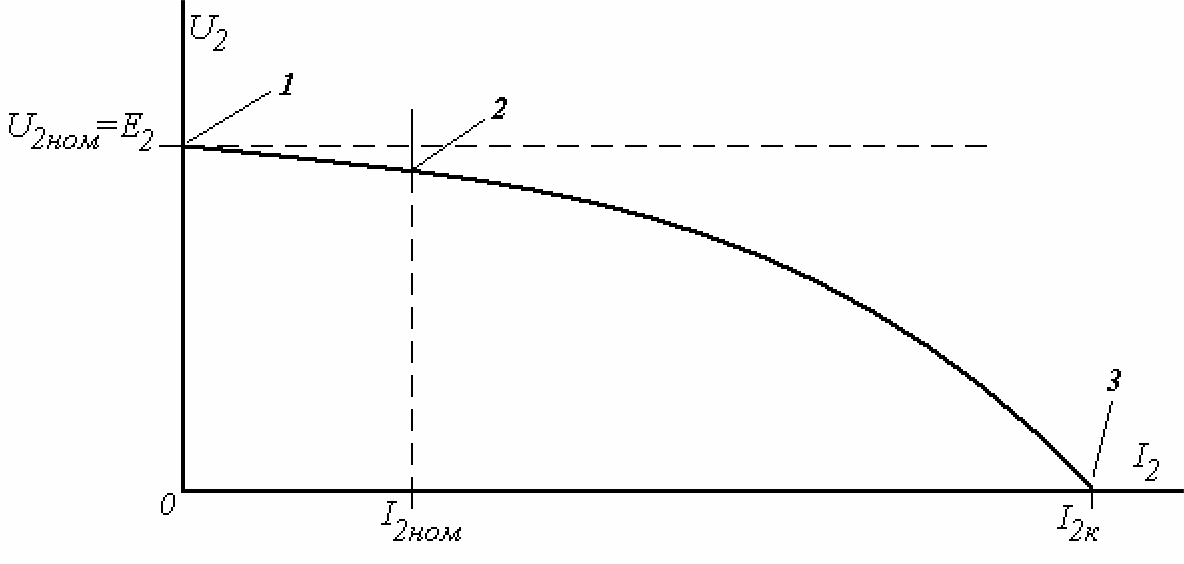


Рис. 6.4. Зависимость вторичного напряжения трансформатора от нагрузки

# Режимы работы трансформатора

На рис.6.4 показана зависимость вторичного напряжения трансформатора от величины нагрузки, охватывающая все возможные режимы его работы.

Точка 1 этой кривой соответствует режиму при *I2 =* 0. Такой режим называется холостой ход трансформатора. Он возникает, когда приемник электроэнергии отключен от вторичной обмотки (На рис.6.5 выключатель в разомкнутом поло- жении).

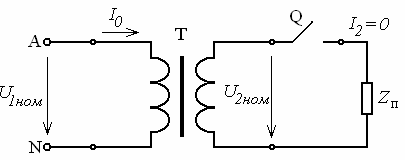


Рис.6.5 Холостой ход трансформатора

В этом режиме трансформатор не создает электрическую энергию, которая пе- редавалась бы приемнику. При этом электрическая энергия, потребляемая трансформатором от источника, невелика и расходуется на покрытие потерь холостого хода трансформатора. Ток, потребляемый первичной обмоткой от источника в этом режиме, называют ток холостого хода трансформатора *I0* . Его величина составляет от 2 до 5 % по отношению к номинальному первичному току.

Как следует из уравнения внешней характеристики трансформатора (6.29), вто- ричное напряжение в режиме холостого хода, когда *I2* = 0, оказывается макси- мальным и определяется только величиной вторичной ЭДС. Это значение при- нимают в качестве номинального вторичного напряжения трансформатора:

U2ном = Е2 . (6.30)

Точка 3 кривой на рис.6.4 соответствует режиму, когда напряжение между за- жимами вторичной обмотки *U2* = 0. Такой режим возникает, когда зажимы вто- ричной обмотки замкнуты между собой (рис.6.6).

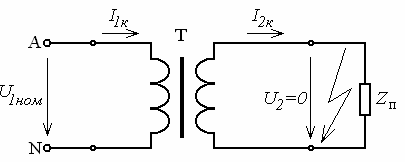


Рис.6.6. Короткое замыкание трансформатора

Этот режим называется короткое замыкание трансформатора.

При коротком замыкании можно принять сопротивление приемника Zп = 0.

При этом вторичный ток ограничивается только небольшим собственным ак- тивным и индуктивным сопротивлениями вторичной обмотки. Поэтому вто- ричный ток короткого замыкания *I2к* оказывается очень большим, во много раз превышающим номинальный ток. Такой большой ток обусловливает значи- тельный перегрев обмотки и выход из строя трансформатора.

Ток первичной обмотки в этом режиме *I1к* называется током короткого замыка- ния трансформатора. В соответствии с уравнением магнитного состояния трансформатора (6.27) ток короткого замыкания трансформатора также значи- тельно превышает номинальный ток и приводит к перегреву трансформатора.

Короткое замыкание – аварийный режим, возникающий вследствие неисправ- ностей в электрической цепи приемника электроэнергии.

Номинальный режим работы трансформатора ограничивается допустимым на- гревом его обмоток при номинальных токах. На рис. 6.4 номинальному режиму работы соответствует точка 2. При этом вторичный ток *I2 = I2ном* .

Рабочий диапазон режимов работы трансформатора определяется участком 1–2

на рис.6.4.

На рис.6.7. показана внешняя характеристика силового трансформатора обще- промышленного назначения в его рабочем диапазоне.

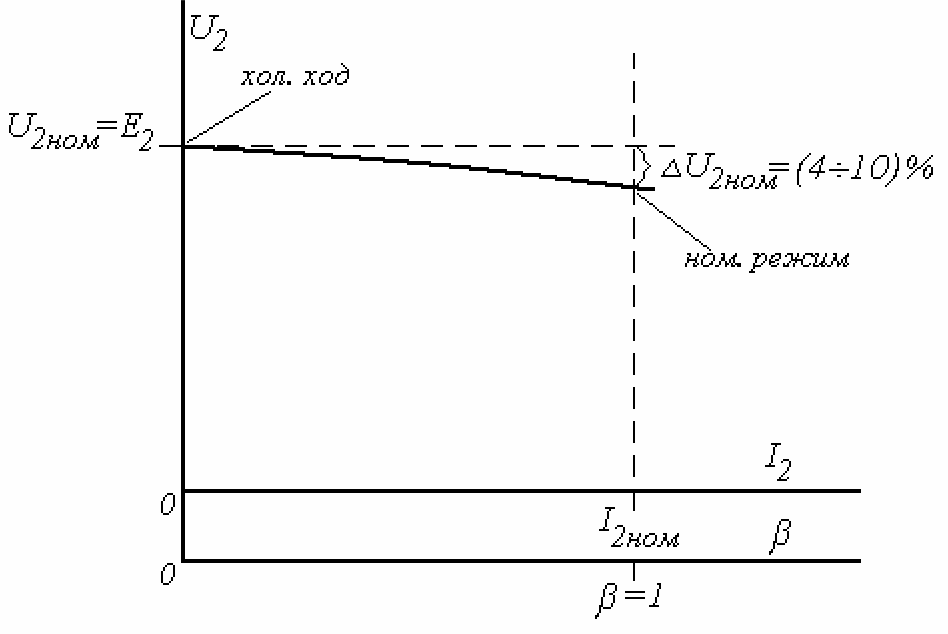


Рис.6.7. Внешняя характеристика трансформатора

Часто при анализе характеристик трансформатора для характеристики величи- ны нагрузки используется относительный параметр, который называют коэф- фициентом нагрузки *β*. Его определяют как отношение вторичного тока в рас- сматриваемом режиме работы к его номинальному значению:

*β = I2 / I2ном* . (6.31)

В режиме холостой ход, когда вторичный ток *I2* =0, коэффициент нагрузки *β* =

1. В номинальном режиме работы *β* = 1. Таким образом, изменение режима ра- боты трансформатора от холостого хода до номинального режима соответству- ет изменению коэффициента нагрузки от 0 до 1. Поэтому в некоторых случаях внешнюю характеристику определяют как зависимость вторичного напряжения от коэффициента нагрузки трансформатора *U2 = f(β).* На рис.6.7 значения ко- эффициента нагрузки обозначены на дополнительной оси *β*.

Как видно на рис.6.7, при изменении режима работы в диапазоне от холостого хода до номинального режима напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора уменьшается на *∆U2* . Изменение напряжения в номинальном режиме работы *∆U2ном* составляет от 4 до 10 % в зависимости от типа и мощно- сти трансформатора.

Специальные трансформаторы могут иметь внешнюю характеристику другого вида. Например, сварочный и печной трансформаторы, предназначенные для питания электротехнологического оборудования, рассчитаны на работу в ре- жимах, близких к короткому замыканию. Их внешняя характеристика может иметь вид, показанный на рис. 6.8.

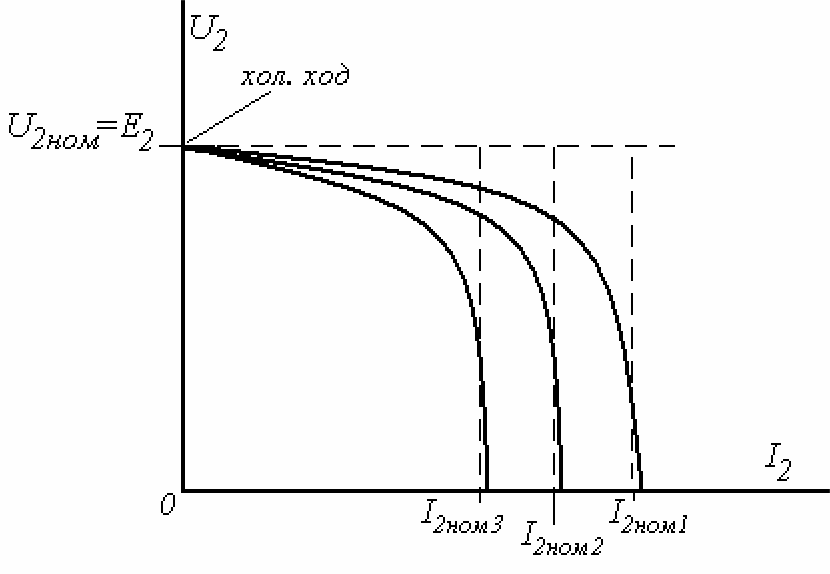


Рис. 6.8. Внешняя характеристика специального трансформатора

Здесь номинальный ток близок к току короткого замыкания. При этом в конст- рукции предусматривается возможность изменения режима работы изменением внешней характеристики.

# Потери энергии, КПД трансформатора

Как следует и определения трансформатора, он является устройством, преобра- зующим электрическую энергию. При таком преобразовании неизбежно возни- кают потери энергии, т.е. преобразование части энергии в тепло, которое нагре- вает устройство и рассеивается в окружающем пространстве. Величина этих потерь определяет коэффициент полезного действия трансформатора.

Потери энергии в трансформаторе складываются из двух основных составляю- щих, соответственно двум основным составляющим его конструкции: электри- ческие потери в электрических обмотках трансформатора и магнитные потери в магнитопроводе.

На рис.6.9 показана энергетическая диаграмма трансформатора.

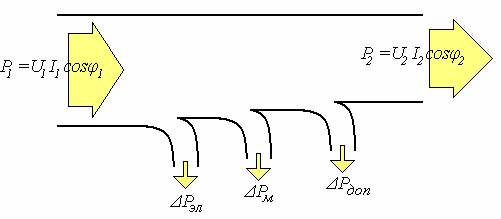


Рис.6.9. Энергетическая диаграмма трансформатора

Здесь *P1* – активная мощность, потребляемая трансформатором от источника; *P2* – активная мощность, отдаваемая трансформатором приемнику; *∆PЭл* – элек- трические потери в обмотках трансформатора; *∆Рм* – магнитные потери в маг- нитопроводе трансформатора; *∆Рдоп* – дополнительные потери в остальных эле- ментах конструкции, которые составляют до 10% всех потерь.

Электрические потери

Как было отмечено выше, обмотки трансформатора, выполненные из реального проводника, обладают сопротивлениями *R1* и *R2* . Известно, что при замыкании электрического тока по проводнику в нем создаются потери энер-

гии. Эти потери определяются величиной тока в проводнике и его сопротивле- нием.

В частности в первичной обмотке трансформатора с сопротивлением *R1*

и током *I1* создаются потери:

*∆Pэл1 = I1 2 R1* . (6.32)

Во вторичной обмотке трансформатора с сопротивлением *R2* и током *I2*

создаются потери:

*∆Pэл2 = I2 2 R2* . (6.33)

Эти две составляющие (6.32) и (6.33) определяют электрические потери транс- форматора:

*∆Pэл = ∆Pэл1 + ∆Pэл2 = I1 2 R1 + I2 2 R2* . (6.34)

В соответствии с (6.27) соотношение первичного и вторичного токов транс- форматора:

*I1 = I0*. *+ I2 / kТ* . (6.35)

Поскольку ток холостого хода составляет до 5% от номинального первичного тока, в этом соотношении им можно пренебречь. Тогда

*I1 = I2 / kТ* . (6.36)

С учетом этого соотношения выражение для электрических потерь (6.34) пре- образуется к виду:

*∆Pэл = I1 2 R1 + I2 2 R2 = I2 2 R1 / kТ + I2 2 R2 = I2 2 (R1 / kТ + R2).* (6.37)

Выражая вторичный ток через коэффициент нагрузки (6.31), получаем:

*∆Pэл = I2ном 2 (R1 / kТ + R2) β2.* (6.38)

Как видно из (6.37), (6.38), электрические потери зависят от величины нагрузки трансформатора, поэтому часто их называют переменной составляющей по- терь. Электрические потери в режиме холостой ход (*β = 0)* равны нулю. В но- минальном режиме работы:

*∆Pэл.ном = I2ном 2 (R1 / kТ + R2).* (6.39)

Тогда в общем случае для любого режима работы трансформатора электриче- ские потери

*∆Pэл = ∆Pэл.ном β2* . (6.40)

Номинальные электрические потери могут быть определены исходя из пас- портных данных, либо опытным путем по результатам испытаний трансформа- тора.

Магнитные потери

Магнитные потери обусловлены переменным магнитным потоком в магнитной цепи трансформатора.

Известно (см. раздел "Магнитные цепи"), что ферромагнитном сердечнике при переменном магнитном потоке возникают потери на перемагничивание сердеч- ника (потери на гистерезис) *∆РГ* . Величина этих потерь определяется свойства- ми ферромагнитного материала сердечника. В частности площадь петли гисте- резиса определяет потери за один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнитного материала. Ширина петли гистерезиса зависит от величины переменного магнитного потока *Ф*

Следовательно потери на гистерезис зависят от величины магнитного потока *Ф*

и его частоты *f*.

*∆РГ ~ Фf* . (6.41)

Частота изменения магнитного потока определяется источником электроэнер- гии. Как правило, в силовых трансформаторах частота стандартная *f* = 50Гц. С изменением режима работы частота *f* не меняется.

Величина магнитного потока *Ф* определяется величиной напряжения источника

*U1*, приложенного к обмотке (см. раздел "Магнитные цепи"):

*Ф = U1 / (*4,44 *f w1)*. (6.42)

При неизменном напряжении источника величина магнитного потока *Ф* тоже не меняется с изменением режима работы трансформатора.

Таким образом, при неизменной величине магнитного потока *Ф* и частоте *f* по- тери на гистерезис остаются неизменными при изменении режима работы трансформатора (изменении нагрузки).

Другая составляющая магнитных потерь обусловлена существованием в фер- ромагнитном сердечнике вихревых токов. При этом, как показано в разделе "Магнитные цепи", возникают потери от вихревых токов в магнитопроводе

*∆РВТ*. Эти потери определяют вторую составляющую магнитных потерь в трансформаторе. Величина этих потерь также зависит от величины магнитного потока *Ф* и его частоты *f*.

*∆РВТ ~ Фf* . (6.43)

Поскольку частота *f* и величина магнитного потока *Ф* не меняются с изменени- ем режима работы, то и потери от вихревых токов остаются неизменными при изменении режима работы трансформатора (изменении нагрузки).

Таким образом, магнитные потери в трансформаторе *∆Рм* складываются из двух составляющих – потерь на гистерезис *∆РГ* и потерь от вихревых токов *∆РВТ*:

*∆Рм = ∆РГ + ∆РВТ* . (6.44)

Обе составляющие не зависят от режима работы трансформатора. Поэтому их называют постоянными потерями. Т.е. в номинальном режиме работы их вели- чина такая же, как и в режиме холостого хода и, следовательно определяются мощностью холостого хода трансформатора:

*∆Рм = P0* . (6.45)

Мощность холостого хода и, следовательно, магнитные потери могут быть оп- ределены исходя из паспортных данных, либо опытным путем по результатам испытаний трансформатора.

Для уменьшения магнитных потерь сердечник магнитопровода изготавливают из специальной электротехнической стали с низкими удельными потерями на гистерезис. При этом конструктивно он состоит из тонких листов, электрически изолированных друг от друга для исключения потерь от вихревых токов.

Кроме основных составляющих потерь в трансформаторе существуют допол- нительные потери, возникающие в других элементах конструкции. Они обу- словлены в основном потоками рассеяния в стальных элементах конструкции. Дополнительные потери составляют до 10% суммарных потерь и анализе ха- рактеристик ими можно пренебречь.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется соотношением потерь и полезной мощности:

**  *P*2

*P*1

 *P*2

*P*2  *Pм*

* *Pэл*

, (6.46)

Полезная мощность трансформатора *P2* определяется напряжением и током приемника:

*P2 = U2I2Cosφ2* . (6.47)

Пренебрегая изменением вторичного напряжения, можно принять *U2 = U2ном*.

С учетом коэффициента нагрузки *β* выражение (6.47) запишется в виде:

*P2 = U2ном( I2ном β)Cosφ2 = Sном β Cosφ2* . (6.48)

С учетом (6.40) и (6.48) выражение для η принимает вид:

**  *S ном Cos*2

. (6.49)

*Sном Cos* 2

* *Pм*
* *Pэл*.*ном * 2

График зависимости КПД силового трансформатора от нагрузки показан на рис. 6.10.

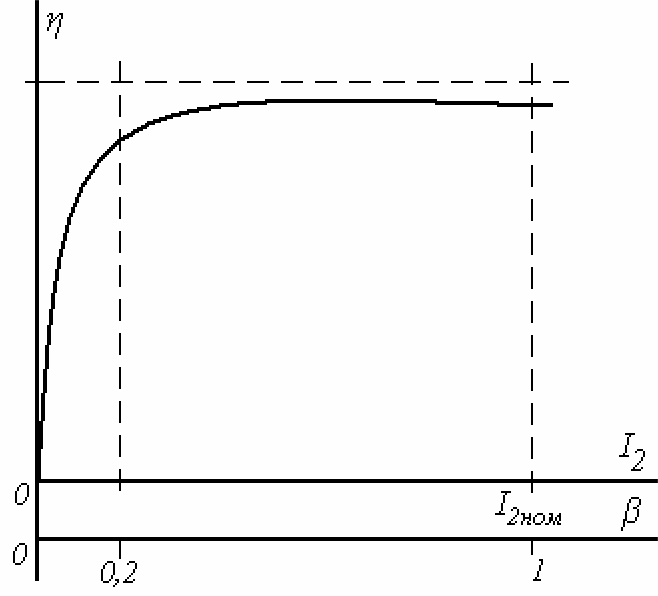


Рис. 6.10. Зависимость КПД от нагрузки

В режиме холостого хода КПД трансформатора *η* = 0. Мощность холостого хо- да *P0* , потребляемая трансформатором в этом режиме, расходуется на компен- сацию магнитных потерь. С увеличением нагрузки в достаточно небольшом диапазоне (приблизительно *β* = 0,2) КПД достигает больших значений. В ос- тальной части рабочего диапазона КПД трансформатора держится на высоком уровне. В режимах, близких к номинальному, КПД трансформатора

*ηном = 0,9 – 0,98* .

# Паспортные данные трансформатора

Паспортные данные трансформатора определяют его номинальный режим ра- боты, позволяют рассчитывать характеристики, анализировать режимы его ра- боты.

В табл.1 приведен перечень параметров трансформатора, составляющих его паспортные данные.

Номинальная мощность трансформатора *Sном* – электрическая полная мощность, определяемая произведением величин номинального первичного напряжения и номинального первичного тока, или произведением номинального вторичного напряжения и номинального вторичного тока:

*Sном = U1номI1ном = U2номI2ном* . (6.50)

Табл. 1

Паспортные данные трансформатора

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование | Обозначение |
| 1 | Номинальная мощность трансформатора | *Sном*, кВА |
| 2 | Номинальное первичное напряжение | *U1ном*, кВ |
| 3 | Номинальное вторичное напряжение | *U2ном*, кВ |
| 4 | Мощность холостого хода | *P0*, кВт |
| 7 | Ток холостого хода | *i0*, % |
| 5 | Мощность короткого замыкания | *PК*, кВт |
| 6 | Напряжение короткого замыкания | *uК*, % |

Номинальное первичное напряжение *U1ном* – напряжение источника, к которому подключается трансформатор.

Номинальное вторичное напряжение *U2ном* – напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостой ход при номинальном первичном напряжении.

Соотношение номинальных первичного и вторичного напряжений определяет коэффициент трансформации:

*kТ* = *U1ном / U2ном .* (6.51)

Мощность холостого хода *P0* – активная мощность, потребляемая трансформа- тором от источника в режиме холостой ход.

Ток холостого хода *i0* – первичный ток трансформатора в режиме холостого хо- да, выраженный в процентах по отношению к номинальному первичному току.

Напряжение короткого замыкания *uк* – напряжение на первичной обмотке трансформатора в опыте короткого замыкания (см. далее), выраженное в про- центах по отношению к номинальному первичному напряжению.

Мощность короткого замыкания *Pк* – активная мощность, потребляемая транс- форматором в опыте короткого замыкания (см. далее).

Паспортные данные трансформатора определяются при его проектировании и разработке, уточняются при контрольных испытаниях и указываются в техни- ческом паспорте трансформатора. Для типовых трансформаторов серийного производства паспортные данные указываются в каталогах оборудования.

# Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора

Кроме того, паспортные данные могут быть определены экспериментально по результатам опыта холостого хода и опыта короткого замыкания трансформа- тора.

Опыт холостого хода трансформатора

Холостой ход трансформатора – это режим работы, при котором первичная об- мотка подключена к источнику электроэнергии с номинальным напряжением *U1ном* , а приемник отключен от трансформатора (зажимы вторичной обмотки разомкнуты).

Схема цепи для проведения опыта холостого хода показана на рис. 6.11.

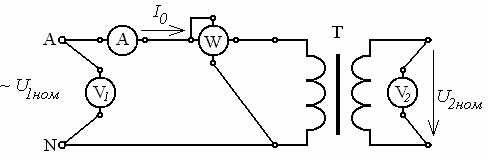
Здесь Т – испытуемый трансформатор. Для выполнения измерений в электри- ческую цепь первичной обмотки включают измерительные приборы: вольтметр к зажимам источника для измерения первичного напряжения, амперметр для измерения тока холостого хода, ваттметр для измерения мощности холостого хода. К вторичной обмотке подсоединяют вольтметр для измерения вторичного номинального напряжения.

Рис. 6.11. Схема цепи в опыте холостого хода

Вольтметр V1 контролирует напряжение источника, которое устанавливают равным номинальному напряжению *U1ном* .

При этом вольтметр V2 показывает вторичное напряжение холостого хода, ко- торое принято за номинальное *U2ном* (см. (6.30)).

Амперметр показывает ток холостого хода *I0* , который определяет паспортное значение *i0* :

*i*0 

*I* 0

*I*1*ном*

100% , (6.52)

где *I1ном* – номинальный первичный ток трансформатора, определяемый, исходя из (6.50):

*I1ном = Sном / U1ном* . (6.53)

Ваттметр показывает мощность холостого хода трансформатора *P0*, которая со- ответствует паспортному значению. В соответствии с (6.45) мощность холосто- го хода определяет магнитные потери в трансформаторе:

*∆Рм = P0* . (6.54)

Опыт короткого замыкания трансформатора

Режим короткого замыкания возникает, когда зажимы вторичной обмотки трансформатора замкнуты между собой (см. рис.6.6).

Короткое замыкание – аварийный режим, возникающий вследствие неисправ- ностей в электрической цепи приемника электроэнергии при номинальном на- пряжении на зажимах первичной обмотки. Токи трансформатора в этом режиме ограничиваются лишь небольшим собственным сопротивлением (активным и индуктивным) обмоток и значительно превышают номинальные значения. Это приводит к перегреву трансформатора и его разрушению.

Такой режим в работе трансформатора недопустим!

Чтобы не допускать аварийного режима опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении на зажимах первичной обмотки. Для этого трансформатор подключается к источнику электроэнергии через регулятор на- пряжения, который позволяет менять напряжение, уменьшая его до необходи- мой величины.

Схема цепи для проведения опыта короткого замыкания показана на рис. 6.12.

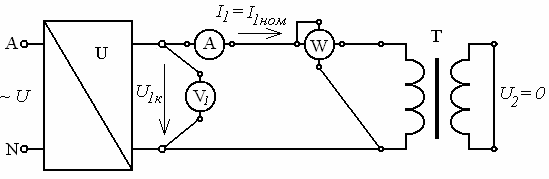


Рис. 6.12. Схема цепи в опыте короткого замыкания

Здесь Т – испытуемый трансформатор. **U** – регулятор напряжения. Зажимы вто- ричной обмотки замкнуты между собой.

Для выполнения измерений в электрическую цепь первичной обмотки включа- ют измерительные приборы: вольтметр к зажимам регулятора для измерения

первичного напряжения, амперметр для измерения тока, ваттметр для измере- ния мощности короткого замыкания.

Регулируя напряжение на первичной обмотке трансформатора, устанавливают такую его величину, при которой первичный ток равен номинальному:

*I1 = I1ном* . (6.55)

Величину тока контролируют амперметром, включенным в цепь первичной об- мотки.

При этом нагрев трансформатора соответствует номинальному режиму и ава- рии не происходит.

При этом вольтметр V1 показывает первичное напряжение, которое в этом опы- те называют напряжением короткого замыкания трансформатора *U1к* . Оно оп- ределяет паспортное значение *uк* :

*uк* 

*U*1*к U*1*ном*

100% . (6.56)

Величина напряжения короткого замыкания силового трансформатора значи- тельно меньше номинального значения и составляет от 4 до 10 % в зависимости от типа и мощности трансформатора.

Ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки, показывает активную мощ- ность *Рк* , потребляемую трансформатором в опыте короткого замыкания. Оче- видно, эта мощность определяется потерями трансформатора в это опыте.

Потери трансформатора, как было показано ранее, складываются из двух со- ставляющих: электрические потери *∆PЭл* и магнитные потери *∆Рм* .

Магнитные потери определяются величиной напряжения на первичной обмот- ке. Поскольку напряжение короткого замыкания невелико по сравнению с но- минальным значением, то, очевидно, магнитные потери в этом опыте незначи- тельны и ими можно пренебречь.

Электрические потери в соответствии с (6.37) определяются величиной тока:

*∆Pэл = I1 2 R1 + I2 2 R2 .* (6.57)

В опыте короткого замыкания устанавливается номинальный ток трансформа- тора. Поэтому электрические потери в этом опыте равны номинальным элек- трическим потерям:

*∆Pэл = ∆Pэл.ном* . (6.58)

Таким образом, мощность короткого замыкания *Рк* определяет номинальные электрические потери *∆Pэл.ном* :

*∆Pэл.ном* = *Рк* . (6.59)

Таким образом, опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют экс- периментально определить паспортные данные трансформатора.

# Построение характеристик трансформатора по паспортным данным

Паспортные данные трансформатора позволяют строить его характеристики, анализировать режимы его работы.

В частности, зависимость КПД от нагрузки трансформатора в соответствии с

(6.49):

**  *Sном Cos* 2

. (6.60)

С учетом (6.54), (6.59):

*Sном Cos*2

* *Pм*
* *Pэл*.*ном * 2

**  *Sном Cos*2

. (6.61)

*Sном Cos*2  *P*0  *Pк * 2

Выражение (6.61) позволяет по паспортным данным трансформатора рассчи- тать зависимость его КПД *η* от величины нагрузки *β* при заданном коэффици- енте мощности приемника *Cosφ2* .

Также по паспортным данным может быть рассчитана внешняя характеристика трансформатора *U2(I2 ) или U2(β).* Для этого может использоваться следующее аналитическое выражение, полученное при анализе уравнений электрического состояния трансформатора:

*U* 2  *U* 2*ном*

* *U* 2*ном *

*uк*

100

(*Cos к Cos* 2

* *Sin к Sin*2 )

(6.62)

*Примечание: выражение (6.62) приводится в качестве справочного материала.*

Параметры, содержащиеся в выражении (6.62) могут быть определены по ре- зультатам опыта короткого замыкания или паспортным данным:

*Cos к*

 100*Pк*

*uк S ном*

(6.63)

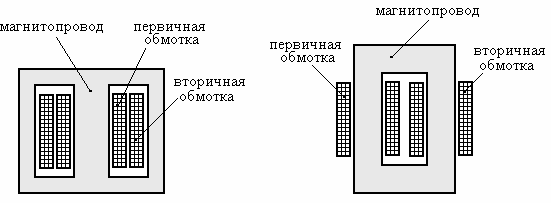
*Cosφ2* – коэффициент мощности приемника определяется характером приемни- ка.

# Особенности конструкции трансформаторов

Сердечник (магнитопровод) трансформатора изготавливают из листовой электротехнической стали, имеющей малые потери на перемагничивание и на

вихревые токи. Отдельные листы стали изолируют слоем лака, после чего стя- гивают болтами. Такое устройство применяется для уменьшения вихревых то- ков, индуктируемых в стали переменным потоками и обуславливающих маг- нитные потери.

По форме магнитопровода различают два типа трансформатора: броне- вые и стержневые. На рис. 6.13а изображен *броневой* трансформатор, или трансформатор с ***Ш***-образным сердечником, а на рис. 6.13б - *стержневой* трансформатор с ***П***-образным сердечником.



а б

Рис. 6.13. Форма магнитопровода трансформатора.

а – Броневой трансформатор б – Стержневой трансформатор

Обмотки трансформатора могут располагаться на разных стержнях магнито- провода (рис. 6.13б), либо на одном стержне (рис. 6.13а). В последнем случае обмотка низкого напряжения располагается ближе к сердечнику, а обмотка вы- сокого напряжения располагается поверх обмотки низкого напряжения.

В силовых трансформаторах большой мощности его электромагнитное ядро (магнитопровод с обмотками) помещают в масляный бак, заполненный специ- альным трансформаторным маслом (рис.6.14). Трансформаторное масло слу- жит для отвода тепла, возникающего в результате потерь энергии в трансфор- маторе. Для интенсивного охлаждения бак может быть снабжен радиаторами, охладителями и т.п. Выводы обмоток крепятся к крышке бака посредством изо- ляторов.

Рис. 6.14. Масляный трансформатор. Общий вид

Как видно по внешней характеристике (рис. 6.7), напряжение на выходе транс- форматора меняется с изменением нагрузки. Для поддержания вторичного на- пряжения на необходимом уровне в обмотке трансформатора могут быть пре- дусмотрены регулировочные витки с переключателем Q (рис. 6.15). Переклю- чение числа витков позволяет регулировать напряжение трансформатора, под- держивая его на необходимом уровне.

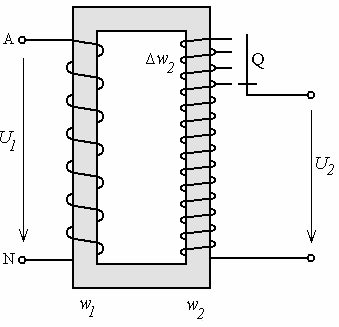


Рис. 6.15 . Трансформатор с регулированием напряжения

## Специальные типы трансформаторов

В электротехнических установках используются некоторые специаль- ные типы трансформаторов: автотрансформаторы, многообмоточные транс- форматоры, трехфазные трансформаторы.

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого име- ется только одна обмотка с числом витков *w1* . Часть этой обмотки с числом витков *w2* принадлежит одновременно первичной и вторичной цепям. Схема такого автотрансформатора изображена на рис. 6.16.



Рис. 6.16. Автотрансформатор

Напряжение источника *U1* приложено ко всем виткам обмотки *w1* .

Вторичное напряжение U2 определяется частью обмотки с числом витков *w2* .

При этом коэффициент трансформации:

*kТ = U1/U2 = w1 / w2 .*

Автотрансформаторы выгодно использовать в тех случаях, когда коэф- фициент трансформации близок к единице.

Многообмоточные трансформаторы имеют одну первичную обмотку и несколько вторичных обмоток с разными числами витков (рис.6.17).

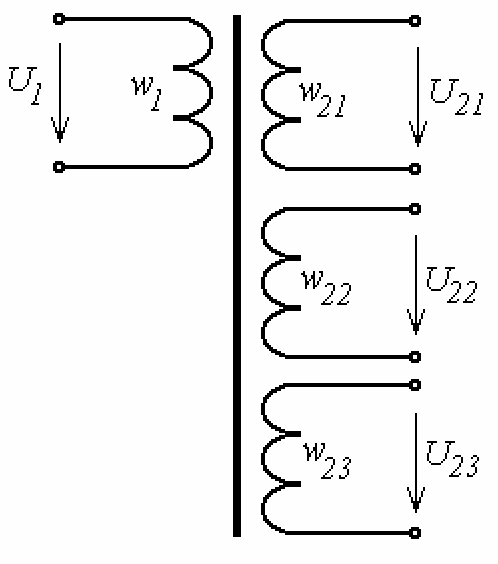


Рис.6.17. Многообмоточный трансформатор

Все обмотки располагаются на одном магнитопроводе. Разные вторичные обмотки обеспечивают разный коэффициент трансформации и создают разное по величине напряжение.

Такие трансформаторы используются в радиотехнических схемах для по- лучения нескольких напряжений.

В трехфазной сети переменного тока изменение напряжений осуществля- ется с помощью трехфазного силового трансформатора с общим для трех фаз сердечником (рис.6.18).

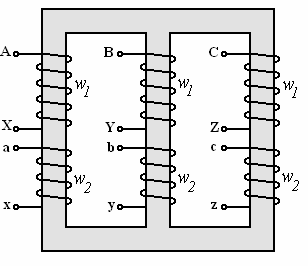


Рис.6.18. Устройство трехфазного трансформатора

В трехфазном трансформаторе с общим магнитопроводом магнитный по- ток любой из фаз может замыкаться через стержни, на которых расположены обмотки двух других фаз. Расход стали на трехфазный трансформатор значи- тельно меньше, чем на три однофазных трансформатора. Это делает его легче, дешевле, эффективней. Первичные и вторичные обмотки трех фаз соединяют между собой способами "звезда" или "треугольник". Например, на рис.6.19 по- казано условное обозначение трехфазного трансформатора с группой соедине- ния обмоток "звезда / звезда с нейтралью" ( ). Общий вид трехфазного масляного трансформатора показан на рис. 6.14.

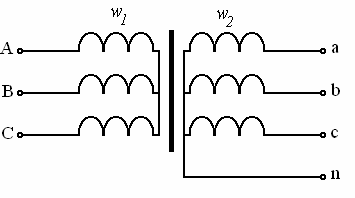


Рис. 6.19. Условное обозначение трехфазного трансформатора