**Федеральное агентство по образованию**

**ГАПОУ "Уфимский топливно-энергетический колледж"**

# Электротехника: Трансформатор

**Учебное пособие**

**В.С. Проскуряков, С.В. Соболев, Н.В. Хрулькова**

**Кафедра "Электротехника и электротехнологические системы"**

**УФА 2023**

# Оглавление

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

## 1. Основные понятия. Назначение, области применения трансформатора

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное 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 напряжением в ЛЭП:

P = *IлUл* . (6.2)

При относительно низком напряжении *Uл* ток в линии может быть весьма 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 электропередачи. Для этого напряжение в ЛЭП должно быть повышено. Эта задача решается 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 потребителей устанавливается понижающий трансформатор, который уменьшает напряжение до номинального напряжения потребителя.

В электротехнологии используются сварочные и печные трансформаторы.

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 различных областях электротехники, электроники, электротехнологии, в устройствах измерения и контроля, автоматического управления и др.

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

## 2. 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 трансформатора является магнитная цепь, которая представляет из себя магнитопровод 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 обмотки. Каждая из обмоток имеет определенное количество витков (w1 и w2), охватывающих стержни магнитопровода.

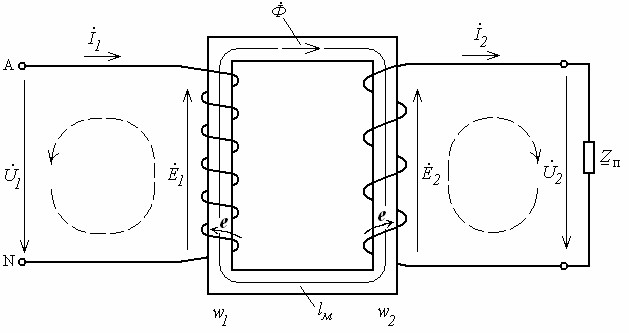


Рис.6.1. Электромагнитная схема идеального трансформатора

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 обмотки подключается приемник электроэнергии с сопротивлением *Zп* .

Под действием переменного напряжения *U*1источника в первичной обмотке возникает первичный ток *I*1. Этот ток, замыкаясь по виткам первичной обмотки, 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 индукции переменный магнитный поток *Ф*, пронизывая витки обмоток, индуктирует в каждом из них ЭДС индукции *е*. Положительное направление ЭДС одного витка ***е*** соотносится с направлением магнитного потока как обозначено на рис.6.1 . При этом ее величина определяется скоростью изменения магнитного потока:

*e*= *dФ* . (6.3) *dt*

Тогда в первичной обмотке с числом витков *w1* создается ЭДС индукции *E*1, пропорциональная числу витков *w1*:

*E*1 =*e**w*1 , (6.4)

а во вторичной обмотке с числом витков *w2* создается ЭДС *E*2 , пропорциональная числу витков *w2* :

*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 энергию.

Соотношение по величине между первичным и вторичным напряжениями называется 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, обозначенных 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 идеального трансформатора. Исходя из этих уравнений и с учетом (6.4) , (6.5), коэффициент 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)*, вторичное напряжение меньше первичного (*U2 < U1)* , коэффициент трансформации *kТ > 1*, и такой трансформатор называют понижающим трансформатором. Если число витков вторичной обмотки больше, чем в первичной (*w2 > w1)*, вторичное напряжение больше первичного (*U2 > U1)* , коэффициент трансформации *kТ < 1*, и такой трансформатор называют повышающим трансформатором. Трансформатор с одинаковым числом витков в обеих обмотках обладает коэффициентом трансформации *kТ =1*. Такой трансформатор называют разделительным.

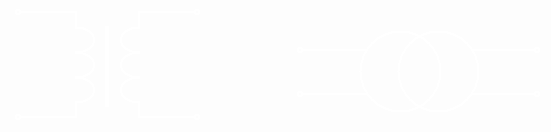
Таким образом, трансформатор посредством магнитной связи двух обмоток в магнитной цепи преобразует электрическую энергию источника с напряжением *U1* в электрическую энергию, отдаваемую приемнику с напряжением *U2*.

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 вторичной 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 условное графическое обозначение, показанное на рис.6.2 .



а б

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

## 3. 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. Например, 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 магнитопроводом, образующим магнитную цепь.

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

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

*H**lм* = *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* определяется 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 магнитного поля в магнитопроводе *H* также неизменны с изменением режима работы 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 отключенном 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 слагаемое определяется током холостого хода:

*H**lм* = *I*0*w*1 , (6.14)

Из равенств (6.11) и (6.14) следует:

*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(*ww*12), (6.16)

или *I*1 = *I*0 + *I*2 / *kТ* (6.17)

Полученное уравнение называют уравнением магнитного состояния трансформатора. Оно описывает соотношение между токами первичной и вторичной цепей трансформатора, объединенных магнитной цепью. С увеличением мощности приемника вторичный ток возрастает, при этом первичный ток также возрастает.

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.

## 4. 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 магнитопроводу и обеспечивает магнитную связь первичной и вторичной цепей трансформатора.

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 поток в отличие от основного магнитного потока не сцепляется с вторичной обмоткой и не обеспечивает их магнитную связь. Его называют потоком рассеяния первичной обмотки *Фрас1* . Вторичная обмотка также создает поток рассеяния вторичной обмотки *Фрас2* . Потоки рассеяния не обеспечивают магнитную связь первичной и вторичной обмоток, но индуцируют ЭДС самоиндукции каждый в своей обмотке, которые оказывают влияние на работу трансформатора и требуют их учета. Для учета этих явлений в электромагнитную схему трансформатора вводят индуктивные элементы с соответствующими индуктивными сопротивлениями рассеяния первичной и вторичной обмоток (*X1* и *X2*) (рис.6.3).

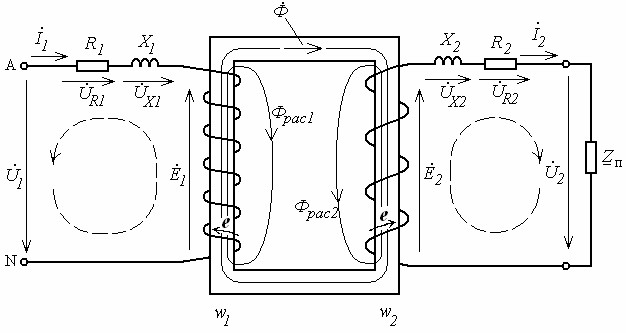


Рис.6.3. Электромагнитная схема реального трансформатора

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 проводника и обратнопропорциональным его сечению. Обмотки трансформатора могут иметь значительное число витков. При этом проводник, из которого они изготовлены может быть тонким и весьма протяженным, а его электрическое сопротивление существенным по сравнению с остальными параметрами трансформатора. Это электрическое сопротивление обуславливает дополнительное напряжение, определяемое законом Ома, и требует его учета при анализе работы 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 трансформатора с учетом его особенностей имеет вид, показанный на рис.6.3 .

Для учета указанных особенностей в уравнениях состояния трансформатора составим 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 напряжения на собственных активном и индуктивном сопротивлениях обмоток, которые 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 уравновешивается 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*2за вычетом падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях вторичной обмотки (*I*2*R*2 и *jI*2*X*2).

Таким образом уравнения электрического и магнитного состояния, описывающие 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)

## 5. Внешняя характеристика трансформатора

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

Нагрузку трансформатора создает приемник электрической энергии, подключенный к зажимам его вторичной обмотки. Т.е. под величиной нагрузки следует понимать мощность этого приемника, которая определяется его напряжением *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 (вторичный ток трансформатора).

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

Эта зависимость называется внешней характеристикой трансформатора.

Аналитическое выражение внешней характеристики трансформатора определяется 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 *I*2(*R*2 + *jX*2)*.* Графически эта зависимость показана на рис.6.4.

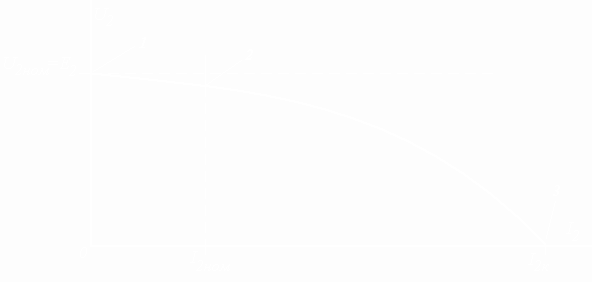


Рис. 6.4. Зависимость вторичного напряжения трансформатора от нагрузки

## 6. 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 положении).

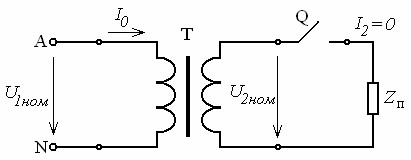


Рис.6.5 Холостой ход трансформатора

В этом режиме трансформатор не создает электрическую энергию, которая передавалась 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), вторичное напряжение в режиме холостого хода, когда *I2* = 0, оказывается максимальным и определяется только величиной вторичной ЭДС. Это значение принимают в качестве номинального вторичного напряжения трансформатора:

U2ном = Е2 . (6.30)

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

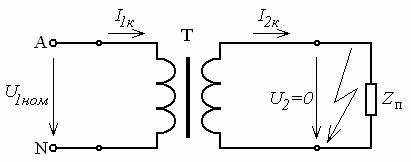


Рис.6.6. Короткое замыкание трансформатора

Этот режим называется короткое замыкание трансформатора.

При коротком замыкании можно принять сопротивление приемника Zп = 0.

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

Ток первичной обмотки в этом режиме *I1к* называется током короткого замыкания трансформатора. В соответствии с уравнением магнитного состояния трансформатора (6.27) ток короткого замыкания трансформатора также значительно превышает номинальный ток и приводит к перегреву трансформатора. Короткое замыкание – аварийный режим, возникающий вследствие неисправностей в электрической цепи приемника электроэнергии.

Номинальный режим работы трансформатора ограничивается допустимым нагревом 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 общепромышленного назначения в его рабочем диапазоне.

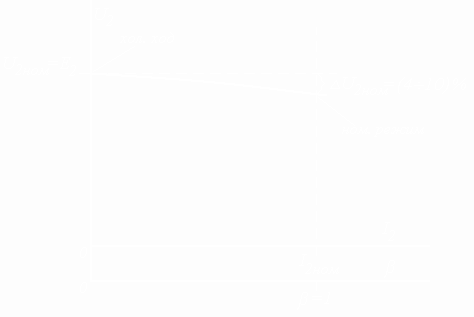


Рис.6.7. Внешняя характеристика трансформатора

Часто при анализе характеристик трансформатора для характеристики величины нагрузки используется относительный параметр, который называют коэффициентом нагрузки *β*. Его определяют как отношение вторичного тока в рассматриваемом режиме работы к его номинальному значению: *β = I2 / I2ном* . (6.31)

В режиме холостой ход, когда вторичный ток *I2* =0, коэффициент нагрузки *β* = 0. В номинальном режиме работы *β* = 1. Таким образом, изменение режима работы трансформатора от холостого хода до номинального режима соответствует 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 коэффициента 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 мощности трансформатора.

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

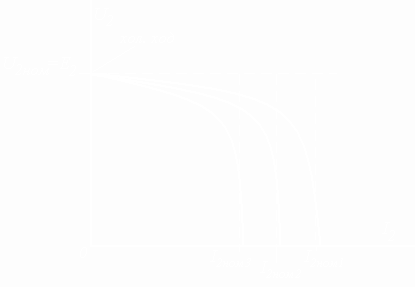


Рис. 6.8. Внешняя характеристика специального трансформатора

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

## 7. Потери энергии, КПД трансформатора

Как следует и определения трансформатора, он является устройством, преобразующим электрическую энергию. При таком преобразовании неизбежно возникают потери энергии, т.е. преобразование части энергии в тепло, которое нагревает устройство и рассеивается в окружающем пространстве. Величина этих потерь определяет коэффициент полезного действия трансформатора.

Потери энергии в трансформаторе складываются из двух основных составляющих, соответственно двум основным составляющим его конструкции: электрические потери в электрических обмотках трансформатора и магнитные потери в магнитопроводе.

На рис.6.9 показана энергетическая диаграмма трансформатора.

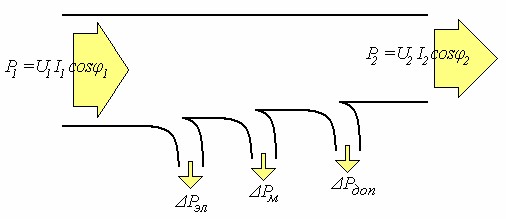


Рис.6.9. Энергетическая диаграмма трансформатора

Здесь *P1* – активная мощность, потребляемая трансформатором от источника; *P2* – активная мощность, отдаваемая трансформатором приемнику; *∆PЭл* – электрические потери в обмотках трансформатора; *∆Рм* – магнитные потери в магнитопроводе трансформатора; *∆Рдоп* – дополнительные потери в остальных элементах 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 энергии. Эти потери определяются величиной тока в проводнике и его сопротивлением.

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 трансформатора:

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

В соответствии с (6.27) соотношение первичного и вторичного токов трансформатора:

*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) преобразуется 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 потерь. Электрические потери в режиме холостой ход (*β = 0)* равны нулю. В номинальном режиме работы:

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

Тогда в общем случае для любого режима работы трансформатора электрические потери

*∆Pэл = ∆Pэл.ном β2* . (6.40)

Номинальные электрические потери могут быть определены исходя из паспортных данных, либо опытным путем по результатам испытаний трансформатора.

### 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 сердечника (потери на гистерезис) *∆РГ* . Величина этих потерь определяется свойствами ферромагнитного материала сердечника. В частности площадь петли гистерезиса 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 электроэнергии. 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* потери на гистерезис остаются неизменными при изменении режима работы трансформатора (изменении нагрузки).

Другая составляющая магнитных потерь обусловлена существованием в ферромагнитном 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 изменением 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 величина 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 определены 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 дополнительные потери, возникающие в других элементах конструкции. Они обусловлены в основном потоками рассеяния в стальных элементах конструкции. Дополнительные потери составляют до 10% суммарных потерь и анализе характеристик ими можно пренебречь.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется соотношением потерь и полезной мощности:

η= *P*2 = +∆*PPм*2 +∆*Pэл* , (6.46)

*P*1 *P*2

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(I2номβ)Cosφ2 = Sномβ Cosφ2* . (6.48) С учетом (6.40) и (6.48) выражение для η принимает вид:

η= *Sном*β*Cos*ϕ2 2 . (6.49) *Sном*β*Cos*ϕ2 +∆*Pм* +∆*Pэл*.*ном*β

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

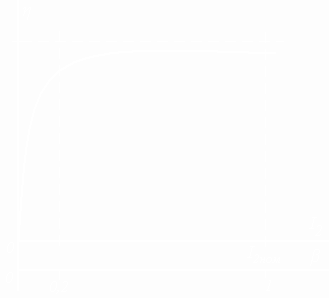


Рис. 6.10. Зависимость КПД от нагрузки

В режиме холостого хода КПД трансформатора *η* = 0. Мощность холостого хода *P0* , потребляемая трансформатором в этом режиме, расходуется на компенсацию магнитных потерь. С увеличением нагрузки в достаточно небольшом диапазоне (приблизительно *β* = 0,2) КПД достигает больших значений. В остальной части рабочего диапазона КПД трансформатора держится на высоком уровне. В режимах, близких к номинальному, КПД трансформатора *ηном = 0,9 – 0,98* .

## 8. Паспортные данные трансформатора

Паспортные данные трансформатора определяют его номинальный режим работы, позволяют рассчитывать характеристики, анализировать режимы его работы.

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 трансформатором от источника в режиме холостой ход.

Ток холостого хода *i0* – первичный ток трансформатора в режиме холостого хода, 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 процентах по отношению к номинальному первичному напряжению.

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

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

## 9. Экспериментальное определение паспортных данных трансформатора

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

### Опыт холостого хода трансформатора

Холостой ход трансформатора – это режим работы, при котором первичная обмотка 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 электрическую 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.

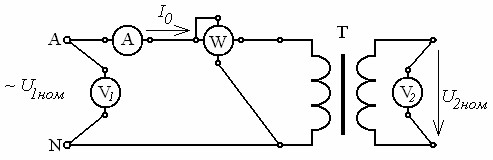


Рис. 6.11. Схема цепи в опыте холостого хода

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

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

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

*i*0 = *I*1*Iном*0 100%, (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 соответствует паспортному значению. В соответствии с (6.45) мощность холостого 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 неисправностей в электрической цепи приемника электроэнергии при номинальном напряжении 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 напряжения, который позволяет менять напряжение, уменьшая его до необходимой величины.

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

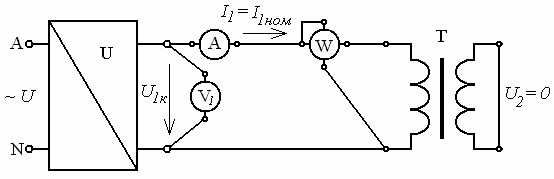


Рис. 6.12. Схема цепи в опыте короткого замыкания

Здесь Т – испытуемый трансформатор. **U** – регулятор напряжения. Зажимы вторичной обмотки замкнуты между собой.

Для выполнения измерений в электрическую цепь первичной обмотки включают измерительные приборы: вольтметр к зажимам регулятора для измерения первичного напряжения, амперметр для измерения тока, ваттметр для измерения 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 обмотки.

При этом нагрев трансформатора соответствует номинальному режиму и аварии не происходит.

При этом вольтметр V1 показывает первичное напряжение, которое в этом опыте называют напряжением короткого замыкания трансформатора *U1к* . Оно определяет паспортное значение *uк* : *uк* = *U*1*к* 100%. (6.56)

*U*1*ном*

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

Ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки, показывает активную мощность *Рк* , потребляемую трансформатором в опыте короткого замыкания. Очевидно, эта мощность определяется потерями трансформатора в это опыте.

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

Магнитные потери определяются величиной напряжения на первичной обмотке. Поскольку напряжение короткого замыкания невелико по сравнению с номинальным значением, то, очевидно, магнитные потери в этом опыте незначительны 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 трансформатора. Поэтому электрические потери в этом опыте равны номинальным электрическим 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 экспериментально определить паспортные данные трансформатора.

## 10. 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):

η= *Sном*β*Cos*ϕ2 2 . (6.60) *Sном*β*Cos*ϕ2 +∆*Pм* +∆*Pэл*.*ном*β

С учетом (6.54), (6.59):

η= *Sном*β*Cos*ϕ2 2 . (6.61)

*Sном*β*Cos*ϕ2 + *P*0 + *Pк*β

Выражение (6.61) позволяет по паспортным данным трансформатора рассчитать зависимость его КПД *η* от величины нагрузки *β* при заданном коэффициенте 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*β100*uк* (*Cos*ϕ*кCos*ϕ2 + *Sin*ϕ*кSin*ϕ2) (6.62)

*Примечание: выражение (6.62) приводится в качестве справочного материала.* Параметры, содержащиеся в выражении (6.62) могут быть определены по результатам опыта короткого замыкания или паспортным данным:

*Cos*ϕ*к* = 100*Pк* (6.63)

*uкSном*

*Cosφ2* – коэффициент мощности приемника определяется характером приемника.

## 11. 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 стягивают болтами. Такое устройство применяется для уменьшения вихревых токов, индуктируемых в стали переменным потоками и обуславливающих магнитные потери.

По форме магнитопровода различают два типа трансформатора: броневые 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

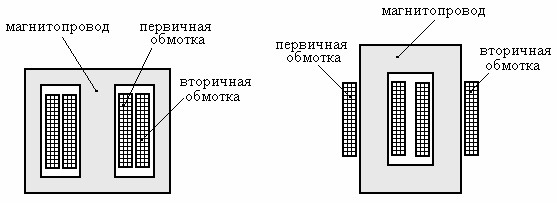


Рис. 6.13. Форма магнитопровода трансформатора.

а – Броневой трансформатор б – Стержневой трансформатор

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

В силовых трансформаторах большой мощности его электромагнитное ядро (магнитопровод с обмотками) помещают в масляный бак, заполненный специальным трансформаторным маслом (рис.6.14). Трансформаторное масло служит для отвода тепла, возникающего в результате потерь энергии в трансформаторе. Для интенсивного охлаждения бак может быть снабжен радиаторами, охладителями и т.п. Выводы обмоток крепятся к крышке бака посредством изоляторов.

  Рис. 6.14. Масляный трансформатор. Общий вид

Как видно по внешней характеристике (рис. 6.7), напряжение на выходе трансформатора меняется с изменением нагрузки. Для поддержания вторичного напряжения на необходимом уровне в обмотке трансформатора могут быть предусмотрены регулировочные витки с переключателем Q (рис. 6.15). Переключение числа витков позволяет регулировать напряжение трансформатора, поддерживая его на необходимом уровне.

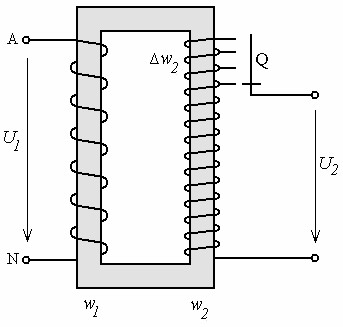


Рис. 6.15 . Трансформатор с регулированием напряжения

### **Специальные типы трансформаторов**

В электротехнических установках используются некоторые специальные типы трансформаторов: автотрансформаторы, многообмоточные трансформаторы, трехфазные трансформаторы.

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого имеется 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.

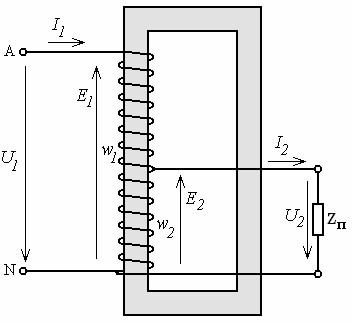


Рис. 6.16. Автотрансформатор

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 коэффициент трансформации близок к единице.

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

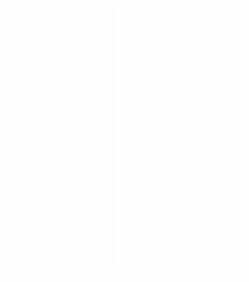


Рис.6.17. Многообмоточный трансформатор

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 получения нескольких напряжений.

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

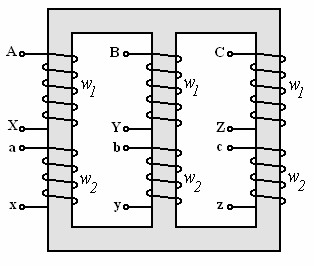
 

Рис.6.18. Устройство трехфазного трансформатора

В трехфазном трансформаторе с общим магнитопроводом магнитный поток любой из фаз может замыкаться через стержни, на которых расположены обмотки двух других фаз. Расход стали на трехфазный трансформатор значительно 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 показано условное обозначение трехфазного трансформатора с группой соедине-

ния

обмоток

"

звезда

/

звезда

с

нейтралью

" (



.

)

Общий

вид

трехфазного

масляного

трансформатора

показан

на

рис

. 6.14.

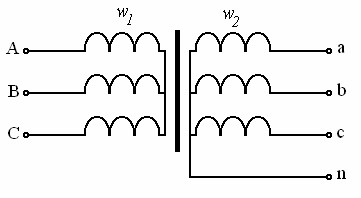


Рис. 6.19. Условное обозначение трехфазного трансформатора