Лекция 10

**Трансформаторы**

**10.1. Общие сведения.**

*Трансформатор представляет собой статическое (неподвижное)электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.*

Первые трансформаторы с разомкнутыми магнитопроводом предложил в 1876 г. П.Н. Яблочков, который применил их для питания электрической «свечи». В 1885 г. венгерские ученые разработали однофазные промышленные трансформаторы с замкнутым магнитопроводом. Трехфазные трансформаторы появились в 1889-1891 гг. (Доливо-Добровольский, Н.Тесла).

По особенностям конструкции трансформаторы можно разделить на

* Силовые,
* Сварочные
* Измерительные
* Специальные.

Наибольшее применение получили силовые трансформаторы, которые являются необходимым элементом промышленной электрической цепи (см. рис. предыдущей лекции). Генераторы на электростанции вырабатывают электрическую энергию при напряжении не более 24 кВ, так как при более высоких напряжениях возникают трудности создания достаточной изоляции в генераторах. Передача электрической энергии на большие расстояния при таких относительно низких напряжениях экономически невыгодна из-за за больших тепловых потерь в линии. Действительно, передаваемая мощность определяется формулой



Чтобы повысить передаваемую мощность надо увеличивать либо напряжение U, либо ток I. При повышении тока выделяется тепло пропорционально квадрату тока



Что приводит к необходимости к уменьшению сопротивления проводов, т.е. увеличению их сечения. Поэтому экономически выгоднее увеличивать напряжение, устанавливая на электрических станциях силовые трансформаторы повышающие напряжение до 110 – 1150 кВ. У потребителей напряжение при помощи трансформаторов понижается несколькими ступенями: на районных до 35 (10) кВ, на подстанциях предприятий до 10 (6) кВ и, наконец, на подстанциях цехов и жилых районов до 380/220 В.

**10.2. Устройство трансформатора.**

ВН

НН

Рис. 10.1

Схема трансформатора с катушкой низкого напряжения (НН) и высокого напряжения (ВН).

У трансформатора две основные части – магнитопровод и обмотки. Трансформаторы большой мощности, кроме того, имеют систему охлаждения. Магнитопровод выполняется из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

Часть магнитопровода, на котором размещены обмотки, называется стержнем, а остальная часть, замыкающая магнитопровод – ярмом. Для уменьшения воздушных зазоров магнитопровод выполняется шихтованным. Сборка листов в этом случае выполняется, как показано на рис.10.2. Вначале листы выкладываются по эскизу рис. 10.2, а, а затем по рис.10.2, б и т.д.

б)

а)

Рис. 10.2.

Шихтованный магнитопровод – когда собирают из пластин «вразбежку» для уменьшения воздушных зазоров.

У трансформаторов малой мощности поперечное сечение магнитопровода имеет квадратную или прямоугольную форму, у трансформаторов средней и особенно большой мощности приближается к окружности; этим, при заданной сечении магнитопровода достигается меньшая длина каждого витка обмотки, и, следовательно, экономия материала.

*Обмотки трансформатора* чаще всего выполняются в виде цилиндрических катушек из медных или алюминиевых изолированных друг от друга проводов круглого или прямоугольного сечения.

Первичная и вторичная обмотки обычно располагаются на одном стержне (рис.10.1). Обмотки низкого напряжения НН помещают ближе к стержню, а обмотки высшего напряжения ВН – снаружи, Между обмотками находится изолирующий цилиндр.

Под *номинальной мощностью трансформатора * понимают его полную мощность при номинальном напряжении и номинальном токе

.

При расчетах потерями в трансформаторе обычно пренебрегают и считают, что полая мощность во вторичной цепи равна полной мощности первичной цепи,



Чем больше мощность трансформатора, тем больше его тепловые потери, тем эффективнее должно быть его охлаждение. По способу охлаждения трансформаторы делятся на

* Сухие
* Масленые

Трансформаторы малой мощности (до 20 кВА) изготовляются сухими. Они либо естественно охлаждаются воздухом, либо обдуваются при помощи вентиляторов. Трансформаторы средней и большой мощности выполняются маслеными. В этом случае магнитопровод с обмотками располагаются в баке с трансформаторным маслом. Масло, помимо отвода тепла, предохраняет обмотки от соприкосновения с воздухом, что замедляет старение изоляции и увеличивает ее пробивную прочность.

**10.3. Режим холостого хода трансформатора**.

Режимом холостого хода называется режим работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке (рис. 10.3). При питании первичной обмотки от источника синусоидального напряжения  ток первичной обмотки  вызывает в магнитопроводе синусоидальный магнитный поток Ф который, пронизывая обмотки с числом витков, наводит в них согласно закону электромагнитной индукции ЭДС , пропорциональные числу витков. ЭДС  уравновешивается напряжением , а ЭДС  является источником напряжения .

*Коэффициентом трансформации* называется отношение номинального высшего напряжения трансформации к номинальному низшему напряжению:

 (10.1)

Ф















Рис. 10.3.

Режим холостого хода трансформатора

Всегда  и

 (10.2)

*Работа трансформатора под нагрузкой*

*Рабочий режим* – это работа трансформатора под нагрузкой ( под нагрузкой понимается ток в вторичной цепи – чем он больше, тем больше нагрузка). Потребители обычно различные (освещение, электрические двигатели и т.п.). Значит, нагрузка имеет активно-индуктивно-емкостный характер (см. рис. 10.4.). В этом случае:

 (10.3)

Из (10.3) следует, что в обмотке с большим числом витков ток меньше.

**10.4. Опыт холостого хода.**

Опыт холостого хода и короткого замыкания проводятся для определения коэффициентов трансформации, потерь в трансформаторе и параметров схемы замещения.

Для однофазного трансформатора опыт холостого хода выполняется по схеме рис. 10.5. К первичной обмотке подводится номинальное напряжение , к вторичной – подключен вольтметр , имеющий достаточно большое сопротивление. Практически можно считать, что ток .



Ф















Рис. 10.4.

Трансформатор под нагрузкой









Рис. 10.5.

Опыт холостого хода.

В схему включены амперметр , вольтметр  и ваттметр W. Амперметр показывает ток холостого хода , вольтметр  - номинальное напряжение первичной обмотки , вольтметр - напряжение  и ваттметр W – мощность потерь при холостом ходе . По этим показаниям можно определить коэффициент трансформации



для понижающего трансформатора или для повышающего трансформатора. Так как нагрузка отсутствует (, то мощность, показываемая ваттметром, - это мощность потерь в стали трансформатора (магнитопроводе). Мощностью потерь в проводах обмоток можно пренебречь, так как при опыте холостого хода ток вторичной обмотки равен нулю, а ток в первичной обмотке – ток холостого хода составляет примерно 5 % номинального.

Можно так же найти

 (10.4)

и полное сопротивление цепи



Активное сопротивление цепи



и индуктивное сопротивление цепи



* 1. **Опыт короткого замыкания.**

Опыт короткого замыкания выполняется по схеме, представленной на рис. 10.6, при условии, что первичной обмотке подводится пониженное напряжение , составляющее 5-10 % , а точнее такое напряжение, при котором токи  и  в обмотках равны номинальным. Вторичная обмотка трансформатора замыкается накоротко.











Рис. 10.6

Схема опыта короткого замыкания.

При этом опыте вольтметр показывает напряжение первичной обмотки , ваттметр W – мощность короткого замыкания , амперметр  - ток в первичной обмотке. По этим показаниям можно определить мощность потерь в проводах обмотки, так как потери в магнитопроводе составляют лишь 0,005 – 0,1 потерь при номинальном режиме из-за пониженного напряжения . Мощность потерь при коротком замыкании и номинальных токах

 (10.5)

Кроме того, по данным этого опыта можно найти параметры упрощенной схемы замещения (рис. 10.7).







Рис. 10.7.

Упрощенная схема замещения трансформатора.

Полное сопротивление



Суммарное активное сопротивление обеих обмоток



И реактивное сопротивление



* 1. **Напряжение короткого замыкания.**

Как следует из схемы замещения (рис.10.7)

 (10.6)

Обычно  составляет 5-8% 



Значение указано на щитке трансформатора. Активная составляющая напряжения короткого замыкания находится по формуле

 (10.7)

а реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

 (10.8)

* 1. **Вторичное напряжение трансформатора.**

Важное значение имеет напряжение на вторичных выводах трансформатора, так как к этой обмотке присоединяются потребители.

Например, если напряжение на осветительных лампах мало, то они горят тускло; если напряжения питания асинхронных двигателей меньше номинального на 10 %, то вращающий момент двигателя уменьшается на 19 % и такой момент может быть недостаточным для рабочей машины.

Изменение вторичного напряжения определяется в процентах относительно номинального

.100 (10.9)

Или

 (10.10)

Здесь - коэффициент нагрузки трансформатора.

С учетом (10.7), (10.8) будем иметь

 (10.11)

Если значение  найдено, то вторичное напряжение

 (10.12)

Значение  (при номинальной нагрузке) может быть найдено по каталожным данным, где приводится значения .

* 1. **Внешняя характеристика трансформатора.**

Она представляет собой зависимость между вторичным напряжением  и током нагрузки при заданном напряжении на входе трансформатора . Она может быть рассчитана по каталожным данным. Внешние характеристики при активной и активно-индуктивных нагрузках представлены на рис. 10.8. Чем больше нагрузка, т.е. чем больше ток , тем меньше напряжение . В пределах от холостого хода до номинальной нагрузки, т.е от до  напряжение  изменяется лишь на несколько процентов. Чем больше нагрузка, тем больше токи ,, а значит больше и падение напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора и, следовательно, тем меньше напряжение .





0





Рис. 10.8.

Внешние характеристики трансформатора при активной и активно-индуктивной нагрузке.

* 1. **Мощность потерь и КПД трансформатора.**

Уравнение баланса мощности в цепи с трансформатором



где  - активная мощность, поступающая из сети питания (от источника); - активная мощность потребителей; - суммарная мощность потерь в трансформаторе; мощность потерь в стали; - мощность потерь в проводах обмоток.

Мощность потерь в стали магнитопровода из-за гистерезиса и вихревых токов зависит от амплитуды магнитного потока, а так как амплитуда постоянная, то мощность потерь в стали не изменяется, т.е. не зависит от нагрузки при постоянном значении напряжения питания , поэтому находится из опыта холостого хода. Эти потери составляют 1-2% номинальной мощности. Мощность потерь в проводах обмоток зависит от нагрузки, так как .

Зависимость потерь в стали и меди от коэффициента нагрузки  показана на рис. 10.8.

0,6





1.0

0.5







Рис. 10.8.

Зависимость потерь в стали и меди от коэффициента нагрузки .

* 1. **Коэффициент полезного действия трансформатора.**

КПД трансформатора можно рассчитать по формуле



Так как коэффициент нагрузки  и в опытах холостого хода и короткого замыкания было получено, что ,а , то КПД

 (10.13)

Из (10.23) можно найти значение коэффициента нагрузки , при котором КПД максимален. Приравняв нулю производную , получим



Обычно для трансформатора =0.5 – 0.25 и, значит, = 0.7 – 0.5. Таким образом наибольшее значение КПД трансформатора будет при нагрузке 70 – 50 % номинальной. Зависимость КПД от нагрузки показана на рис. 10.8. Общая номинальная мощность установленных силовых трансформаторов в 4-6 превышает мощность генераторов, поэтому КПД трансформаторов имеет важное значение для рационального использования энергетических ресурсов. Максимальный коэффициент КПД силовых трансформаторов доходит до 99,5%.

**10. 11. Трехфазные трансформаторы.**

Трансформирование в трехфазной цепи может осуществятся либо группой, состоящих из трех однофазных трансформаторов, либо одним трехфазным трансформатором. В обеих случаях обмотки фаз высшего и низшего напряжений могут соединятся звездой или треугольником. Соединение звездой обозначается знаком Y , а треугольником - . Если обе обмотки соединены звездой, то такое соединение обозначается Y/Y. В числителе указывается способ соединения высшего напряжения, а в знаменателе низшего. Начала фаз высшего напряжения обозначаются буквами А, В, С, а концы обмоток – буквами X, Y, Z. Начала фаз низшего напряжения – буквами a, b, c, а их концы – буквами x, y, z. На рис. 10. 9 показана схема трех однофазных трансформаторов при соединении , т.е. фазы высшего напряжения соединены звездой, а фазы низшего напряжения – треугольником.

z

c

b

a

c

A

B

C

X

Y

Z

a

x

b

y

Рис. 10.9.

Соединение трансформаторов по схеме звезда-треугольник

На рис. 10.10 показано соединение обмоток трехфазного трансформатора по схеме .