

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
КОМБИНАТ

НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ
ИНСТИТУТ

КАФЕДРА: «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

ЭЛЕКТРО МЕХАНИКА

для студентов по направлению
5520200 «Электроэнергетика»,



Навои 2010 г.

Составили:

Шойматов Б.Х., канд. техн. наук, доцент. НГГИ

Сборник лекций содержит краткое изложение теоретического материала конспект лекции. Данные методические указания рекомендованы для обучающихся по направлению **5520200-** «Электроэнергетика» учащихся НГГИ.

Сборник лекций рассмотрены и одобрены на заседании кафедр «Электроснабжение» утверждены на заседании учебно-методического Совета НГГИ от «28» 2010 г.

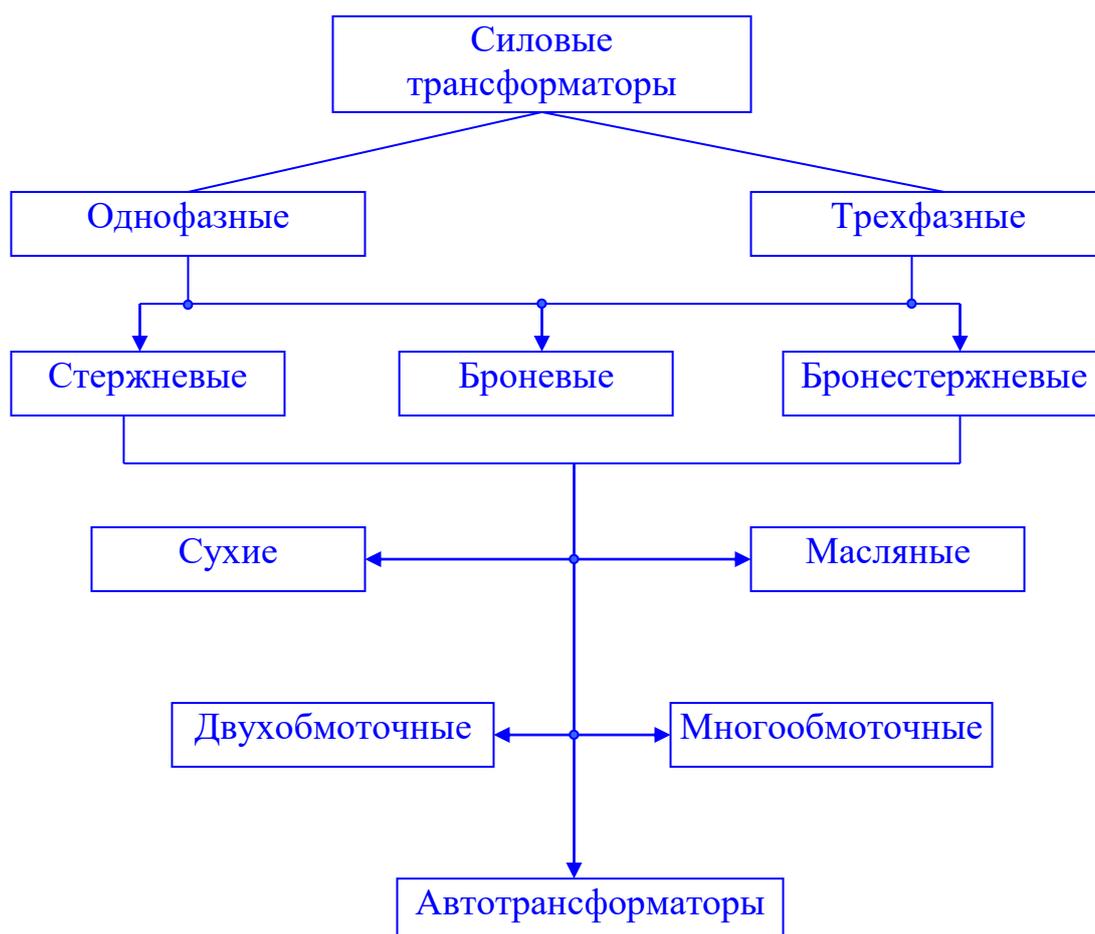
Лекция-1:

Введение. Понятие об электроприводах и электрических машинах.

Цель: Изучение, применение и место электромеханики в промышленности.

План:

1. Основные понятия трансформатора и электрических машин.
2. Основные понятия асинхронных машин.
3. Применение генераторов постоянного тока и синхронных машин.



Электрификация, являясь стержнем строительства экономики, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства. В арсенале электротехнических средств, применяемых при электрификации народного хозяйства, ведущее место занимают электрические машины, широко используемые как в процессе производства электрической энергии, так и процессе ее потребления.

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механическое и

электрической энергии. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами-генераторами, преобразующими механическую энергию в электрическую. Основная часть электроэнергии (до 80%) вырабатывается на тепловых электростанциях, где при сжигании химического топлива (уголь, торф, газ) нагревается вода и переводится в пар высокого давления. Последний подается в турбину, где, расширяясь, приводит ротор турбины во вращение (тепловая энергия в турбине преобразуется в механическую). Вращение ротора турбины передается на вал генератора (турбогенератора). В результате электромагнитных процессов, происходящих в генераторе, механическая энергия преобразуется в электрическую.

Процесс производства электроэнергии на атомных электростанциях аналогичен тепловым, с той лишь разницей, что вместо химического топлива используется ядерное.

Процесс выработки электроэнергии на гидравлических электростанциях состоит в следующем: вода, поднятая плотиной на определенный уровень, сбрасывается на рабочее колесо гидротурбины; получаемая при этом механическая энергия путем вращения колеса турбины передается на вал электрического генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую.

В процессе потребления электрической энергии происходит ее преобразование в другие виды энергий (тепловую, механическую, химическую). Около 70% электроэнергии используется для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т.е. для преобразования ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами-электродвигателями.

Электродвигатель – основной элемент электропривода рабочих машин. Хорошая управляемость электрической энергии, простота ее распределения позволили широко применить в промышленности многодвигательный электропривод рабочих машин, когда отдельные звенья рабочей машины приводятся в движение самостоятельными двигателями. Многодвигательный привод значительно упрощает механизм рабочей машины (уменьшается число механических передач, связывающих отдельные звенья машины) и создает большие возможности в автоматизации различных технологических процессов. Электродвигатели широко применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей, приводящих во вращение колесные пары электропоездов, электропоездов, троллейбусов и др. За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности- микромашин мощностью от долей до нескольких сотен ватт. Такие электрические машины используют в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Особый класс электрических машин составляют двигатели для бытовых электрических устройств- пылесосов, холодильников, вентиляторов и др. мощность этих двигателей невелика (от единиц до сотен ватт), конструкция проста и надежна, и изготавливают их в больших количествах.

Электрическую энергию, вырабатываемую на электростанциях, необходимо передать в места ее потребления, прежде всего в крупные

промышленные центры страны, которые удалены от мощных электростанций на многие сотни, а иногда и тысячи километров. Но электроэнергию недостаточно передать. Ее необходимо распределить среди множества разнообразных потребителей - промышленных предприятий, транспорта, жилых зданий и т.д. Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении (до 500 кВ и более), чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередачи. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых трансформаторами. Трансформатор не является электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую и наоборот; он преобразует лишь напряжение электрической энергии. Кроме того, трансформатор-это статическое устройство, и в нем нет никаких движущихся частей. Однако электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах, аналогичны процессам, происходящим при работе электрических машин. Более того, электрическим машинам и трансформаторам свойственна единая природа электромагнитных и энергетических процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током. По этим причинам трансформаторы составляют неотъемлемую часть курса электрических машин.

Отрасль науки и техники, занимающаяся развитием и производством электрических машин и трансформаторов, называется электромашиностроением. Теоретические основы электромашиностроения были заложены в 1821 г. М.Фарадеем, установившим возможность преобразования электрической энергии в механическую и создавшим первую модель электродвигателя. Важную роль в развитии электромашиностроения имели работы ученых Д.Максвелла и Э.Х.Ленца. Дальнейшее развитие идея взаимного преобразования электрической и механической энергий получила в работах выдающихся русских ученых Б.С.Якоби и М.О. Доливо-Добровольского, которыми были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, пригодные для практического использования. Большие заслуги в создании трансформаторов и их практическом применении принадлежат замечательному русскому изобретателю П.Н.Яблочкову.

При этом необходимо учитывать возрастающие экологические требования к источникам электроэнергии и наряду с традиционными способами развивать экологически чистые (альтернативные) способы производства электроэнергии с использованием энергии солнца, ветра, морских приливов, термальных источников. Широко внедряются автоматизированные системы в различные сферы народного хозяйства. Основным элементом этих систем является автоматизированный электропривод, поэтому требуется опережающими темпами наращивать выпуск автоматизированных электроприводов.

В условиях научно-технической революции большое значение

приобретают работы, связанные с повышением качества выпускаемых электрических машин и трансформаторов. Решение этой задачи является важным средством развития международного экономического сотрудничества. Соответствующие научные учреждения и промышленные предприятия нашей страны ведут работы по созданию новых видов электрических машин и трансформаторов, удовлетворяющих современным требованиям к качеству и технико-экономическим показателям выпускаемой продукции.

Лекция-2:

Роль и классификация электрических машин

Цель: Применение электрических машин в различных отраслях промышленности.

План:

1. Основная роль электрических машин в промышленности.
2. Виды электрических машин.
3. Основные физические и механические сущности электрических машин.

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным применением, так как связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий. Применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели. Так, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием переменного тока в постоянный или же с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты. Для этих целей применяют *электромашинные преобразователи*.

Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют *электромашинными усилителями*. Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют *синхронными компенсаторами*. Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют *индукционными регуляторами*.

Очень разнообразно применение микромашин в устройствах автоматики и вычислительной техники. Здесь электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и в качестве *тахогенераторов* (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), *сельсинов*, *вращающихся трансформаторов* (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. п.

Из приведенных примеров видно, сколь разнообразно разделение электрических машин по их назначению.

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины разделяются на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия,

так и конструкцией. Бесколлекторные машины — это машины переменного тока. Они разделяются на асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяются преимущественно в качестве двигателей, а синхронные — как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов. Коллекторные машины применяются главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного принципа действия могут различаться схемами включения либо другими признаками, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными (включаемыми в трехфазную сеть), конденсаторными или однофазными. Асинхронные машины в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяются на машины с короткозамкнутым ротором и машины с фазным ротором. Синхронные машины и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания, в них магнитного поля возбуждения разделяются на машины с обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами. На переднем форзаце данной книги представлена в виде диаграммы классификация электрических машин, содержащая основные виды электрических машин, получивших наибольшее применение в современном электроприводе. Эта же классификация электрических машин положена в основу изучения курса «Электрические машины».

Курс «Электрические машины» помимо собственно электрических машин предусматривает изучение трансформаторов. Трансформаторы являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Отсутствие каких-либо вращающихся частей придает трансформаторам конструкцию, принципиально отличающую их от электрических машин. Однако принцип действия трансформаторов, так же как и принцип действия электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, и поэтому многие положения теории трансформаторов составляют основу теории электрических машин переменного тока.

Электрические машины и трансформаторы — основные элементы любой энергетической системы или установки, поэтому для специалистов, работающих в сфере производства или эксплуатации электрических машин, необходимы знания теории и понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрических машинах и трансформаторах при их работе.

Лекция-3:

Назначение и область применения трансформаторов.

Цель: Изучение принципа работы трансформаторов и их применение.

План:

1. Понятие о трансформаторах.
2. Назначение и использование трансформаторов в промышленности.
3. Виды трансформаторов.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой. Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

В зависимости от назначения трансформаторы разделяют на силовые трансформаторы общего назначения и трансформаторы специального назначения. Силовые трансформаторы общего назначения применяются в линиях передачи и распределения электроэнергии, а также в различных электроустройствах для получения требуемого напряжения. Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного использования. К этим трансформаторам относятся печные и сварочные трансформаторы, трансформаторы для устройств автоматики (пик-трансформаторы, импульсные, умножители частоты и т.п.), испытательные и измерительные трансформаторы и т. д.

При изучении данного раздела будем иметь в виду силовые трансформаторы общего назначения, за исключением гл. 5, в которой рассмотрены некоторые виды трансформаторов специального назначения.

Лекция-4:

Устройства и принцип действия трансформатора

Цель: Ознакомить студентов с принципом работы трансформаторов.

План:

1. Принцип работы силового трансформатора.
2. Классификация и свойства трансформаторов.
3. Устройства трансформаторов.

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 4.1, а). Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока Γ на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой *вторичной*, подключен потребитель Z_H . Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

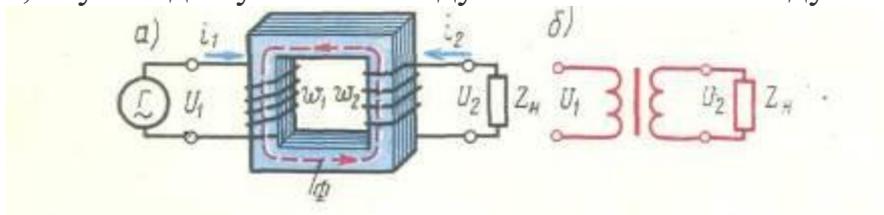


Рис. 4.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

в первичной обмотке ЭДС *самоиндукции*

$$e_1 = -\omega_1(d\Phi/dt), \quad (4.1)$$

во вторичной обмотке ЭДС *взаимоиндукции*

$$e_2 = -\omega_2(d\Phi/dt), \quad (4.2)$$

где ω_1 и ω_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора. При подключении нагрузки Z_2 к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

Из (4.1) и (4.2) видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков ω_1 и ω_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости, один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению ($d\Phi/dt=0$), поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи *не будет* передаваться во вторичную.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:
 по назначению — силовые общего назначения, силовые специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т. д.;
 по виду охлаждения — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;
 по числу трансформируемых фаз — однофазные и

трехфазные;

по форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;

по числу обмоток - на фазу — двухобмоточные, многообмоточные.

На заднем форзаце данной книги представлена диаграмма классификации силовых трансформаторов общего назначения.

Устройство трансформаторов.

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) *частями*. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод. Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

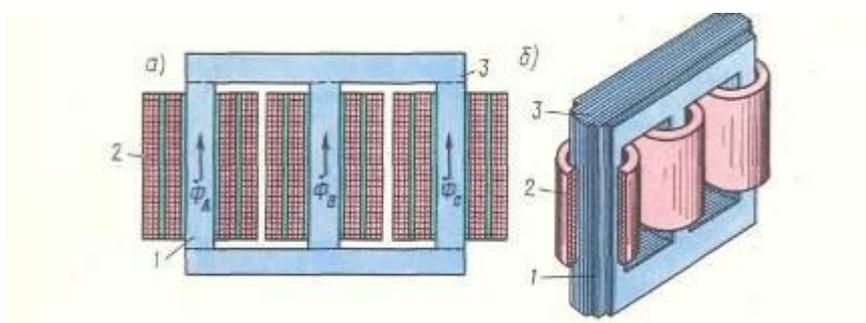


Рис.4.2. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневого и бронестержневого. В магнитопроводе стержневого типа (рис. 4.2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях — потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне — поток Φ_B . На рис. 4.2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d . (рис. 4.3). Стержни трансформаторов

большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее использование площади круга внутри обмотки.

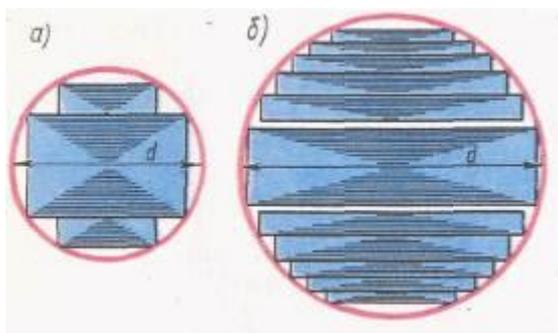


Рис. 4.3. Форма сечения стержней:

a — трансформаторов малой и средней мощности;

б — трансформаторов большой мощности

Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5—6 мм, служащие вентиляционными каналами.

Магнитопровод броневое типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярмами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 4.4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневое типа в два раза больше, чем в ярмах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневое типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

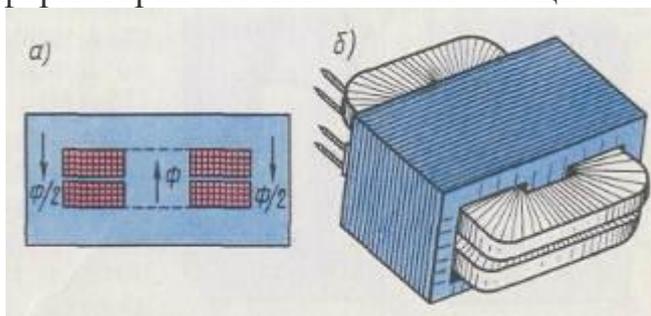
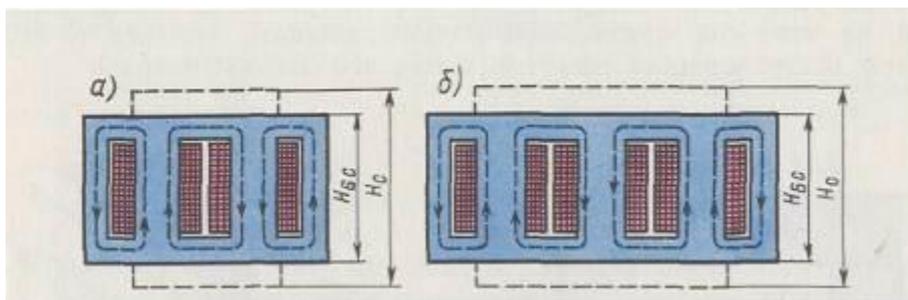


Рис. 4.4. Однофазный трансформатор броневое типа

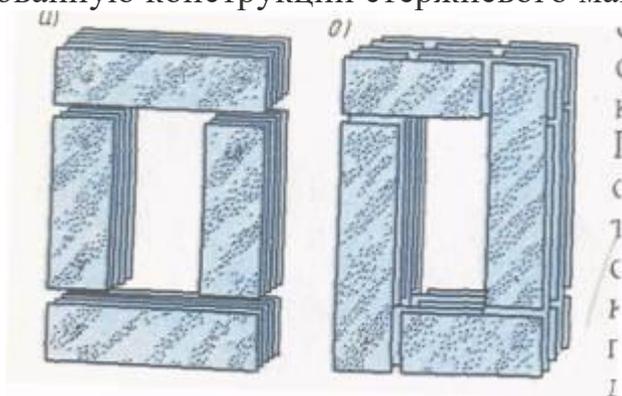
a — устройство; *б* — внешний вид

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 4.5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ($H_{BC} < H_C$), а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов по железной дороге.



**Рис. 4.5. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:
а — однофазного; б — трехфазного**

По способу сочленения стержней с ярмами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода (рис. 4.6).



**Рис. 4.6. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции
Магнитопроводов**

При стыковой конструкции (рис. 4.6, а) стержни и ярма собирают отдельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее ярма, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и ярм. После установки двух ярм всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рис. 1.6,б, когда стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2—3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления

применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка (рис. 4.7, а) получают косой стык (рис. 4.7, б), у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

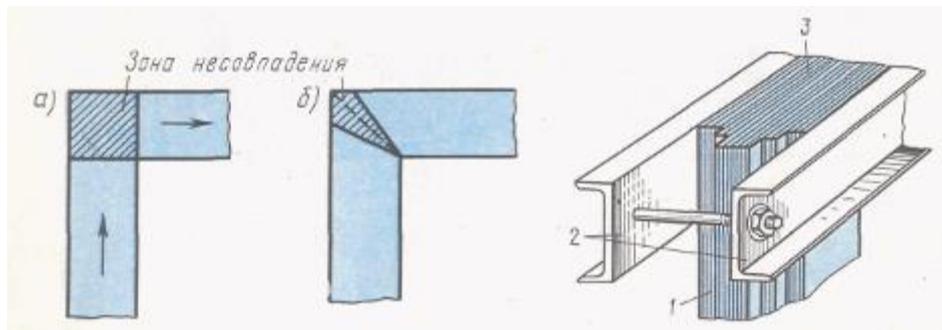


Рис. 4.7. «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б) стыках

Рис. 4.8. Опрессовка ярма

Стержни магнитопроводов во избежание распушения опрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни (рис. 1.8), стягивают шпильками.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления обязательно заземляют. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными (рис. 1.9), а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

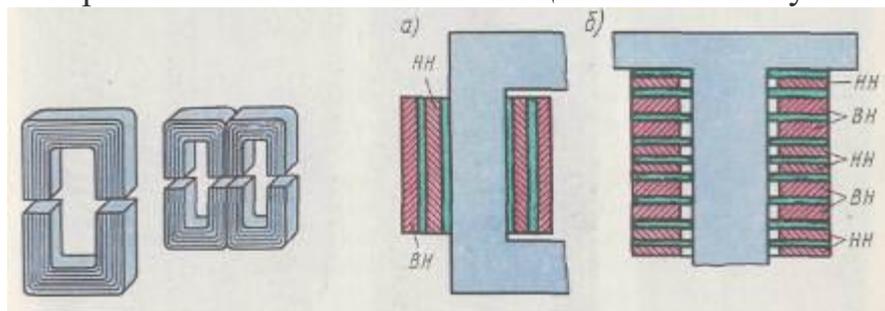


Рис. 4.9. Ленточные разрезные магнитопроводы

Рис. 4.10. Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки трансформаторов

Лекция-5:

Уравнения напряжений трансформатора

Цель: Рассмотреть и получить уравнение напряжений для первичной и вторичной цепей трансформатора.

План:

1. Действующее значение первичной ЭДС.
2. Коэффициент трансформации.
3. Уравнения напряжений для цепей трансформатора.

Основной переменный магнитный поток Φ в магнитопроводе трансформатора, сцепляясь с витками обмоток w_1 и w_2 (см. рис. 4.1), наводит в них ЭДС [см. (4.1) и (4.2)]

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt); \quad e_2 = -w_2(d\Phi/dt).$$

Предположим, что магнитный поток Φ является синусоидальной функцией времени, т. е.

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \quad (5.1)$$

где Φ_{\max} — максимальное значение потока.

Тогда, подставив (5.1.) в формулу ЭДС e_1 и дифференцируя, получим

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\max} \cos \omega t; \quad (5.2.)$$

Но так как $\cos \omega t = \sin(\omega t - \pi/2)$ то

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (5.3)$$

По аналогии,

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (5.4)$$

Из (5.3) и (5.4) следует, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на угол $\pi/2$. Максимальное значение ЭДС

$$E_{1\max} = \omega w_1 \Phi_{\max} \quad (5.5)$$

Разделив $E_{1\max}$ на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим действующее значение первичной ЭДС (В):

$$E_1 = E_{1\max}/\sqrt{2} = (2\pi/\sqrt{2}) w_1 f \Phi_{\max} = 4,44 w_1 f \Phi_{\max} \quad (5.6)$$

Аналогично, для вторичной ЭДС

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{\max} \quad (5.7)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называют *коэффициентом трансформации*:

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2 \quad (5.8)$$

При практических расчетах коэффициент трансформации с некоторым допущением принимают равным отношению номинальных напряжений обмоток ВН и НН: $k \approx U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$.

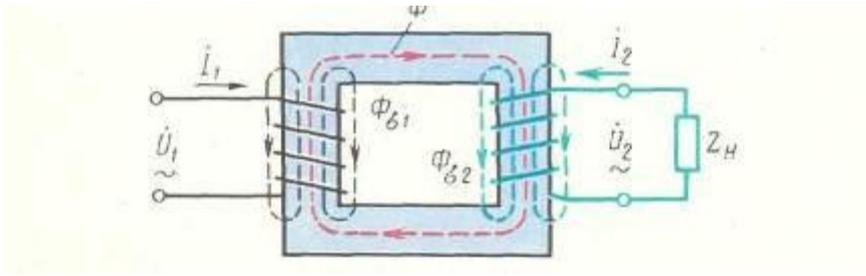


Рис. 5.1. Магнитные потоки в однофазном трансформаторе.

Токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора помимо основного магнитного потока Φ создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 5.1), каждый из которых сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуцирует в ней ЭДС рассеяния. Эти ЭДС в первичной и вторичной обмотках таковы:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} (di_1/dt); \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} (di_2/dt)$$

где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния.

Так как магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде (воздух, масло, медь), магнитная проницаемость которой постоянна, то и индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

Действующие значения ЭДС рассеяния пропорциональны токам в соответствующих обмотках:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\sigma 1} &= -j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_{\sigma 2} &= -j\dot{I}_2 x_2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно, Ом (знак минус в этих выражениях свидетельствует о реактивности ЭДС рассеяния). Таким образом, в каждой из обмоток трансформатора индуцируются по две ЭДС: ЭДС от основного потока Φ и ЭДС от потока рассеяния ($\Phi_{\sigma 1}$ в первичной обмотке и $\Phi_{\sigma 2}$ во вторичной обмотке).

Для первичной цепи трансформатора, включенной в сеть на напряжение U_1 , с учетом падения напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки r_1 можно записать уравнение напряжений по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1$$

или, перенеся ЭДС \dot{E}_1 и $\dot{E}_{\sigma 1}$ в правую часть уравнения и выразив ЭДС рассеяния через индуктивное сопротивление рассеяния x_1 , получим уравнение напряжений для первичной цепи трансформатора:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (5.10)$$

ЭДС первичной обмотки E_1 , наведенная основным магнитным потоком Φ , представляет собой ЭДС самоиндукции, а поэтому находится в противофазе с подведенным к первичной обмотке напряжением U_1 .

Обычно индуктивное $j\dot{I}_1 x_1$ и активное $\dot{I}_1 r_1$ падения напряжения невелики, а поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное к трансформатору напряжение U_1 уравновешивается ЭДС E_1 , т. е.

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1) \quad (5.11)$$

Для вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку с сопротивлением Z_n , уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n \quad (5.12)$$

т.е. сумма ЭДС, наведенных во вторичной обмотке ($\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2}$), уравновешивается суммой падений напряжений ($\dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n$). Здесь r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки. Падение напряжения на нагрузке $\dot{I}_2 Z_n$ представляет собой напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора:

$$\dot{I}_2 Z_n = U_2 \quad (5.13)$$

Приведем уравнение (5.12) к виду, аналогичному уравнению ЭДС для первичной цепи (5.10). При этом учтем выражения (5.9) и (5.13) и получим уравнение напряжений для вторичной цепи трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_n \quad (5.14)$$

Из этого уравнения следует, что напряжение на выходе нагруженного трансформатора отличается от ЭДС вторичной обмотки на значение падения напряжения во вторичной обмотке.

Лекция-6:

Уравнения магнитодвижущих сил трансформатора

Цель: Дать представление о режиме работы трансформаторов.

План:

1. Режимы холостого хода и нагрузки в однофазном трансформаторе.
2. Векторные диаграммы МДС трансформатора.
3. Уравнение МДС трансформатора.

Предположим, что трансформатор работает в режиме холостого хода (рис. 6.1, а), т. е. к зажимам его первичной обмотки подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$). Ток I_0 в первичной обмотке при этих условиях называют *током холостого хода*.

Магнитодвижущая сила (МДС) $I_0 w_1$ созданная этим током, наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2} I_0 w_1 / R_m \quad (6.1)$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитопровода.

При замыкании вторичной обмотки на нагрузку Z_n (рис. 6.1, б) в ней возникает ток I_2 . При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения I_1 .

Теперь поток Φ_{\max} создается действиями МДС $I_1 w_1$ и $I_2 w_2$

$$\Phi_{\max} = (\sqrt{2} / R_m) (I_1 w_1 + I_2 w_2) \quad (6.2)$$

Этот поток можно определить из (1.9):

$$\Phi_{max} = E_1 / (4,44 w_1 f) \quad (6.3)$$

или, принимая во внимание, что $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, получим

$$\Phi_{max} \approx U_1 / (4,44 f w_1) \quad (6.4)$$

Из (6.4) следует, что значение основного магнитного потока Φ практически не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 неизменно. Однако следует иметь в виду, что это положение является приближенным и относится к случаям нагрузки, не превышающим номинальную. Объясняется это тем, что положение о неизменности потока Φ принято на основании уравнения $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, которое не учитывает падений напряжения в первичной цепи.

Принятое положение $\Phi = \text{const}$ позволяет приравнять выражения (6.1) и (6.2):

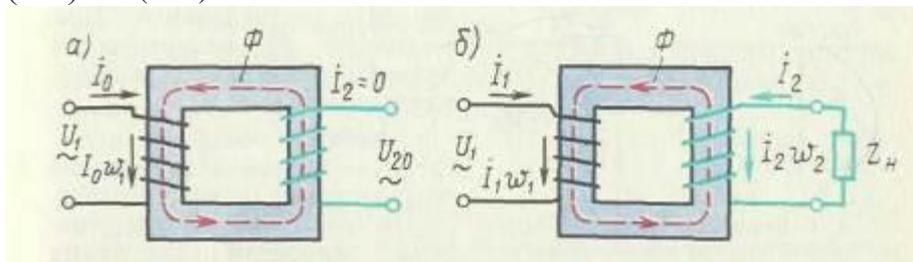


Рис. 6.1. Режимы холостого хода (а) и нагрузки (б) в однофазном трансформаторе

$$(\sqrt{2} / R_m) \dot{I}_0 w_1 = (\sqrt{2} / R_m) (\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2)$$

и получить уравнение МДС трансформатора:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 \quad (6.5)$$

Преобразуя (6.5), можно МДС первичной обмотки $\dot{I}_1 w_1$ представить в виде суммы двух составляющих:

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2)$$

Составляющая $\dot{I}_0 w_1$ наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток Φ , а составляющая $-\dot{I}_2 w_2$ уравнивает МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$.

Воздействие МДС вторичной обмотки трансформатора $\dot{I}_2 w_2$ на основной магнитный поток Φ можно объяснить с помощью правила Ленца. В соответствии с этим правилом наведенная в обмотке ЭДС создает в этой обмотке такой ток, который своим магнитным действием направлен против причины, вызвавшей появление этой ЭДС. Причиной наведения ЭДС E_2 во вторичной обмотке трансформатора является основной магнитный поток Φ , поэтому ток во вторичной обмотке I_2 создает МДС $I_2 w_2$, направленную встречно потоку Φ , т. е. находящуюся с ним в противофазе и стремящуюся ослабить этот поток. Если бы обмотка w_2 была замкнута накоротко или на чисто индуктивное сопротивление и при этом не обладала активным

сопротивлением, то ток I_2 отставал бы по фазе от ЭДС \dot{E}_2 на угол $\Psi_2=90^\circ$ и вся МДС $\dot{I}_2 w_2$ оказывала бы на магнитопровод размагничивающее действие. Но в реальных условиях вторичная обмотка замкнута на сопротивление нагрузки $Z_H = r_H \pm jx_H$ да к тому же она сама обладает активным сопротивлением r_2 . Поэтому фазовый сдвиг тока \dot{I}_2 от ЭДС \dot{E}_2 отличается от 90° и с основным магнитным потоком Φ взаимодействует не вся МДС $I_2 w_2$, а лишь ее реактивная составляющая.

При активно - индуктивной нагрузке, когда $Z_H = r_H + jx_H$ и ток нагрузки \dot{I}_2 отстает по фазе от ЭДС вторичной обмотки E_2 на угол Ψ_2 , МДС $I_2 w_2$ своей реактивной (индуктивной) составляющей $\dot{I}_{2p} w_2$ оказывает на магнитопровод трансформатора *размагничивающее* действие:

$$\dot{I}_{2p} w_2 = \dot{I}_2 w_2 \sin \psi_2$$

где $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_2 \sin \psi_2$ — реактивная составляющая тока нагрузки.

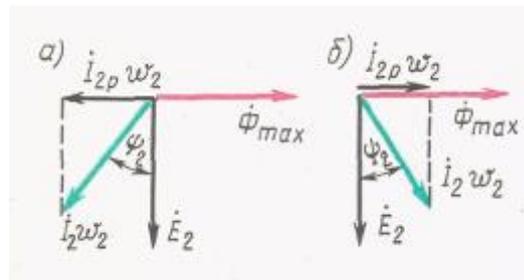


Рис. 6.2. Векторные диаграммы МДС трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

На рис.6.2, а представлена векторная диаграмма активно-индуктивной нагрузки трансформатора. На диаграмме вектор ЭДС вторичной обмотки \dot{E}_2 отстает по фазе от вектора основного магнитного потока на угол 90° , а вектор МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$ отстает по фазе от ЭДС \dot{E}_2 на угол Ψ_2 (рис. 6.2, а). Из выполненных на этой диаграмме построений видно, что реактивная (индуктивная) составляющая МДС вторичной обмотки $\dot{I}_{2p} w_2$ находится в противо-фазе с основным магнитным потоком Φ_{\max} т.е. оказывает на магнитопровод трансформатора размагничивающее действие. Анализируя работу трансформатора, необходимо отметить, что при нагрузке трансформатора в пределах номинального значения основной магнитный поток Φ изменяется весьма незначительно и принятое ранее положение $\Phi \approx \text{const}$ вполне допустимо. Происходит это потому, что МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$, реактивная составляющая которой оказывает на магнитопровод размагничивающее действие, компенсируется составляющей первичной МДС:

$$(-\dot{I}_2 w_2) = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_0 w_1 \quad (6.6)$$

При колебаниях нагрузки трансформатора I_2 изменяется МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$, а это вызывает соответствующие изменения МДС первичной обмотки $\dot{I}_1 w_1$ за счет ее составляющей $-\dot{I}_2 w_2$. Что же касается составляющей МДС холостого хода $\dot{I}_0 w_1$ то ее значение остается практически неизменным, достаточным для создания в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока $\Phi \approx \text{const}$.

При активно-емкостной нагрузке трансформатора, когда $Z_{\text{н}} = r_{\text{н}} - jx_{\text{н}}$ и ток нагрузки I_2 опережает по фазе ЭДС \dot{E}_2 на угол ψ_2 , реактивная (емкостная) составляющая МДС вторичной обмотки $\dot{I}_{2p} w_2$ совпадает по фазе с основным магнитным потоком $\Phi_{\text{тах}}$ и подмагничивает магнитопровод трансформатора (рис. 6.2, б). В этом случае, так же как и при активно-индуктивной нагрузке, составляющая первичной МДС $-\dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_0 w_1$ компенсирует действие вторичной МДС $\dot{I}_2 w_2$.

Разделив уравнение МДС (6.5) на число витков w_1 получим

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 w_2 / w_1, \text{ или } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \quad (6.7)$$

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — ток нагрузки (вторичный ток), приведенный к числу витков первичной обмотки.

Другими словами, это такой ток, который в обмотке с числом витков w_1 создает такую же МДС, что и ток I_2 во вторичной обмотке w_2 , т.е.

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 (w_2 / w_1) w_1 = \dot{I}_2 w_2.$$

Преобразовав выражение (6.7), получим уравнение токов трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \quad (6.8)$$

Из этого уравнения следует, что первичный ток I_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: составляющую I_0 , создающую МДС $I_0 w_1$ необходимую для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока Φ , и составляющую $-\dot{I}'_2$, которая, создавая МДС $-\dot{I}'_2 w_1$, компенсирует МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ трансформатора. Такое действие составляющих первичного тока приводит к тому, что любое изменение тока нагрузки I_2 сопровождается изменением первичного тока I_1 за счет изменения его составляющей $-\dot{I}'_2$, находящейся в противофазе с током нагрузки I_2 .

Основной магнитный поток Φ является переменным, а поэтому магнитопровод трансформатора подвержен систематическому перемагничиванию. Вследствие этого в магнитопроводе трансформатора имеют место магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов, наводимых переменным магнитным потоком в пластинах электротехнической стали. Мощность магнитных потерь эквивалентна активной составляющей тока х.х. Таким образом, ток х.х. имеет две составляющие: реактивную $I_{\text{ор}}$,

представляющую собой намагничивающий ток, и активную I_{oa} , обусловленную магнитными потерями:

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2} \quad (6.9)$$

Обычно активная составляющая тока х.х. невелика и не превышает 0,10 от I_0 , поэтому она не оказывает заметного влияния на ток х.х.

На рис.6.3 представлена векторная диаграмма, на которой показаны векторы тока х.х. I_0 и его составляющих I_{oa} и I_{op} . Угол δ , на который вектор основного магнитного потока Φ_{max} отстает по фазе от тока I_0 , называют *углом магнитных потерь*. Нетрудно заметить, что этот угол увеличивается с ростом активной составляющей тока х.х. I_{oa} , т. е. с ростом магнитных потерь в магнитопроводе трансформатора.

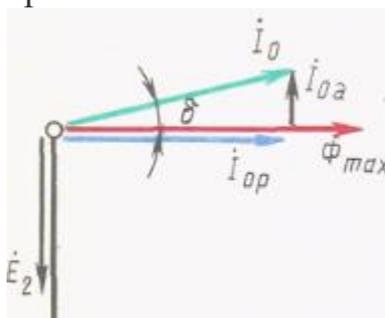


Рис.6.3. Разложение тока х.х. на составляющие.

Сила тока х.х. в трансформаторах большой и средней мощности соответственно составляет 2—10% от номинального первичного тока. Поэтому при нагрузке, близкой к номинальной, пренебрегая током I_0 и преобразуя (6.6), получим

$$I_1 / I_2 = w_1 / w_2 \quad (6.10)$$

т. е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: ток больше в обмотке с меньшим числом витков и меньше в обмотке с большим числом витков. Поэтому обмотки НН выполняют проводом большего сечения, чем обмотки ВН, имеющие большее число витков.

Лекция-7:

Режим работы трансформатора

Цель: Изучение основные работы и их применение трансформаторов.

План:

1. Режим холостого хода трансформатора .
2. Режим нагрузки трансформатора.
3. Режим короткого замыкания трансформатора.

Режим холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называют режим работы при питании одной из обмоток трансформатора от источника с переменным напряжением и при разомкнутых цепях других обмоток. Работу трансформатора в режиме холостого хода удобнее всего рассмотреть на модели однофазного трансформатора, показанной на рис. 2, а. Здесь первичная 1 и вторичная 2 обмотки для наглядности расположены на разных стержнях. К первичной обмотке подведено переменное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Такой режим работы может быть у реального трансформатора, когда он подключен к сети, а нагрузка, питаемая от его вторичной обмотки, еще не включена. По первичной обмотке трансформатора проходит ток I_0 , в то же время во вторичной обмотке тока нет так как цепь ее разомкнута. Ток I_0 , проходя по первичной обмотке, создает в магнитопроводе Φ синусоидально изменяющийся поток Φ_0 , который из-за магнитных потерь отстает по фазе от тока на *угол потерь* δ .

Очевидно, что переменный магнитный поток Φ_0 пересекает обе обмотки трансформатора. В каждой из них возникают эдс: в первичной обмотке — эдс самоиндукции E_1 во вторичной обмотке — эдс взаимной индукции E_2 . Действующие значения этих эдс зависят от числа витков в обмотках, магнитного потока Φ_0 и частоты его изменения f . Величины эдс определяют по формулам:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_{0 \text{ макс}} 10^{-8} \text{ В},$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_{2 \text{ макс}} 10^{-8} \text{ В}$$

где w_1 и w_2 — числа витков в обмотках; f — частота, Гц; $\Phi_{0 \text{ макс}}$ — максимальное значение магнитного потока, Вб.

Разделив E_1 на E_2 , получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Это соотношение характеризует одно из основных свойств трансформатора: *эдс в обмотках трансформатора пропорциональны количеству витков.*

Отношение числа витков $\frac{w_1}{w_2} = k$ называют *коэффициентом трансформации*. Таким образом, если мы хотим повысить полученное от генератора напряжение в 10, 100 или 1000 раз, то необходимо так подобрать обмотки трансформатора, чтобы число витков w_2 вторичной обмотки было больше числа витков w_1 первичной обмотки соответственно в 10, 100 или 1000 раз. Тогда вторичная обмотка оказывается обмоткой высшего напряжения (ВН), а первичная — обмоткой низшего напряжения (НН). Наоборот, если необходимо снизить напряжение в линии,

первичное напряжение подводят к обмотке ВН, а к обмотке НН подключают приемники электрической энергии.

Итак, любой трансформатор может работать как повышающий и как понижающий. Все зависит от того, к какой из его обмоток будет подведено напряжение для преобразования. Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого переменного тока, называется *первичной* (независимо от того, будет ли эта обмотка высшего или низшего напряжения). Обмотка трансформатора, от которой отводится энергия преобразованного переменного тока, называется *вторичной*.

Мы рассмотрели действие только рабочего, или основного, магнитного потока Φ_0 . Однако в трансформаторе кроме рабочего существует еще магнитный поток рассеяния Φ_{p1} . Этот магнитный поток образуется силовыми линиями, которые ответвляются от основного потока в сердечнике и замыкаются по воздуху вокруг витков обмотки w_1 . Поскольку поток рассеяния замыкается по воздуху, его величина пропорциональна току, в нашем случае — току холостого хода I_0 . Следовательно, поток рассеяния Φ_{p1} является, как и ток I_0 , переменным и, пересекая витки первичной обмотки, создает в ней эдс самоиндукции E_{p1}

В первичной обмотке трансформатора создаются две эдс самоиндукции: одна E_1 — рабочим магнитным потоком Φ_0 , другая E_{p1} — магнитным потоком рассеяния. Мы знаем, что эдс самоиндукции всегда направлена против приложенного напряжения и ее действие на ток в цепи равносильно добавочному сопротивлению, которое называют *индуктивным* и обозначают x .

Для поддержания неизменным тока холостого хода подводимое напряжение U_i должно расходоваться не только на преодоление активного сопротивления r_1 обмотки, но и на создание эдс самоиндукции. Другими словами, приложенное напряжение U_1 складывается из нескольких частей: первая часть равна эдс самоиндукции E_1 от потока Φ_0 , вторая — эдс самоиндукции E_{p1} от потока рассеяния Φ_{p1} третья — активному падению напряжения $I_0 r_1$. В векторной форме это запишется так:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 + (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1})$$

Знак минус в последних слагаемых формулы означает, что эдс самоиндукции направлены противоположно напряжению U_1 . Очень удобно рассматривать эту зависимость, пользуясь векторной диаграммой. Построим векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

Известно, что векторами можно изображать любые синусоидально изменяющиеся величины. В нашем случае такими величинами являются приложенное напряжение U_1 и магнитный поток Φ_0 . Ток I_0 благодаря магнитному насыщению стали магнитопровода, влиянию гистерезиса и вихревых токов не является синусоидальным. Однако для приближенных расчетов он обычно заменяется эквивалентным синусоидальным током с действующим значением, соответствующим несинусоидальному току I_0 . Это позволяет изображать его вектором так же, как и другие синусоидально

изменяющиеся величины. Как правило, векторы на диаграмме изображают действующие значения переменных величин.

Построение векторной диаграммы начинается с откладывания по горизонтальной оси вектора магнитного потока Φ_0 (рис. 7.1). Он создается током I_0 , который из-за магнитных потерь в стали опережает поток Φ_0 на угол δ . Поток Φ_0 , пересекая витки обмоток w_1 и w_2 , создает в них эдс E_1 и E_2 , отстающие от потока на четверть-периода. Ток I_0 создает не только главный поток Φ_0 , но и поток рассеяния Φ_{p1} пропорциональный току и совпадающий с ним по-направлению. Этот магнитный поток создает в обмотке да,, вокруг которой он замыкается, эдс самоиндукции E_{p1} . Приложенное напряжение \dot{U}_1 должно компенсировать как эдс \dot{E}_1 и \dot{E}_{p1} так и активное падение напряжения $\dot{I}_0 r_1$ (где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки). Откладываем на диаграмме отрезок E_1 , равный и противоположно направленный эдс \dot{E}_1 к концу вектора \dot{E}_1 пристраиваем отрезок $\dot{I}_0 r_1$ совпадающий с током I_0 по направлению, а к концу вектора $\dot{I}_0 r_1$ — отрезок, равный и противоположно направленный эдс \dot{E}_{p1} . Приложенное напряжение \dot{U}_1 равно геометрической сумме этих величин; на диаграмме его можно получить, соединив точку O с концом отрезка E_{p1} . Таким образом, мы построили полную векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

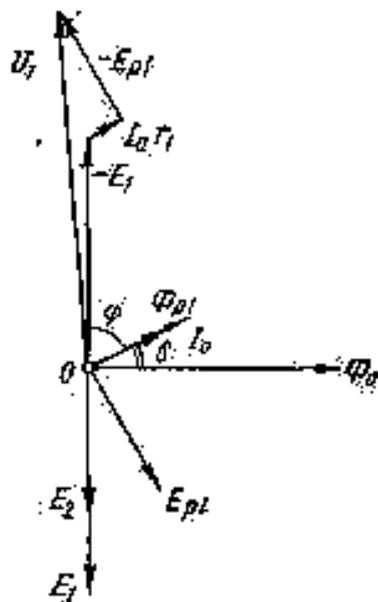


Рис. 7.1. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

В режиме холостого хода вторичная обмотка разомкнута, следовательно, в ней нет тока и она не потребляет активной мощности. В то же время оказывается, что первичная обмотка получает от генератора не только намагничивающую — реактивную -мощность, которая вновь возвращается в генератор, но и определенную активную мощность. На первый взгляд кажется, что эта мощность теряется в первичной обмотке при протекании по ней тока I_0 . Однако оказывается, что измеренные при

этом потери получаются во много раз больше. Куда же расходуется эта энергия? Дело в том, что в действительности только часть тока холостого хода I_0 (ее называют *намагничивающим током* $I_{\text{нам}}$) создает магнитный поток Φ_0 . Другая его часть (ее называют *активной составляющей* и обозначают I_a) зависит от потерь в стали магнитопровода, характеризуемых величиной угла потерь δ .

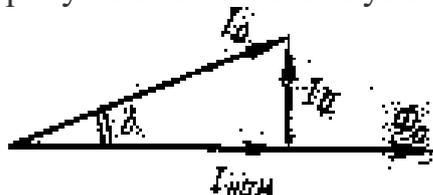


Рис.7.2. Векторная диаграмма тока холостого хода и его составляющих.

Векторная диаграмма тока холостого хода и его составляющих показана на рис. 7.2. Между током холостого хода и его составляющими существует зависимость причем намагничивающая составляющая обычно во много раз больше активной.

Режим нагрузки трансформатора

Если включить вторичную обмотку трансформатора (см. рис. 2, б) во внешнюю цепь, замкнув рубильник Z , то трансформатор перейдет из режима холостого хода в режим нагрузки. Очевидно, что с момента включения рубильника в цепи вторичной обмотки появляется ток нагрузки I_2 . Этот ток, как и любой изменяющийся ток, создает свой переменный магнитный поток Φ_2 . Большая часть потока Φ_2 замыкается по магнитопроводу трансформатора, а меньшая часть Φ_{p2} — по воздуху вокруг витков вторичной обмотки; она оставляет магнитный поток рассеяния.

Будучи индуктированным, ток вторичной обмотки по правилу Ленца противодействует причине, его вызвавшей, т. е. имеет направление, противоположное току I_0 , поэтому и его магнитный поток Φ_2 направлен навстречу потоку Φ_0 . Другими словами, поток, созданный вторичным током, должен был бы ослаблять основной магнитный поток Φ_0 .

Однако стоит только уменьшиться потоку Φ_0 , как это вызывает уменьшение эдс самоиндукции E_x в первичной обмотке. Эдс самоиндукции, как известно, направлена против приложенного напряжения U_1 (см, рис. 7.1), и ее увеличение или уменьшение соответственно уменьшает или увеличивает первичный ток. Это легко подтверждается уравнением для напряжения первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 + (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1})$$

Из уравнения находим

$$i_0 = \frac{U_1 - (-E_1) - (-E_{p1})}{r_1}$$

Следовательно, если допустить, что поток в магнитопроводе уменьшился, уменьшится и E_1 а это значит, что первичный ток возрастет. Увеличение первичного тока по сравнению с током холостого хода станет настолько большим, что созданный этим током дополнительный магнитный поток Φ_1 полностью скомпенсирует поток Φ_2 вторичной обмотки.

Таким образом, действуя почти противоположно друг другу, потоки Φ_1 и Φ_2 компенсируются, а результирующий поток Φ_0 индуцирует в первичной обмотке эдс E_1 почти полностью уравновешивающую напряжение U_1 . При неизменном первичном напряжении U_1 эдс E_1 также остается неизменной, следовательно, и магнитный поток Φ_0 остается практически неизменным при любых нагрузках (токах I_1 и I_2) трансформатора. Итак, мы убедились, что в трансформаторе при увеличении вторичного тока от нуля до h происходит автоматическое увеличение первичного тока от I_0 до I_1 .

Подобные же процессы происходят и при уменьшении вторичного тока. Действительно, при уменьшении тока I_2 поток Φ_2 уменьшается; одновременно уменьшается и его противодействие потоку Φ_0 , величина которого, казалось бы, должна при этом возрасти. Однако увеличение Φ_0 вызывает увеличение эдс E_u т. е. уменьшение первичного тока. Ток I_1 уменьшается ровно настолько, чтобы создаваемый им дополнительный поток Φ_1 в точности соответствовал изменившемуся магнитному потоку Φ_2 .

Режим короткого замыкания трансформатора

Как известно, в режиме нагрузки вторичная обмотка трансформатора включается на сопротивление приемников. Во вторичной цепи устанавливается ток, пропорциональный нагрузке трансформатора. При питании большого числа приемников нередки случаи, когда нарушается изоляция соединительных проводов. Если в местах повреждения изоляции произойдет соприкосновение проводов, питающих приемники, то возникнет режим, называемый *коротким замыканием* (к. з.) участка цепи.

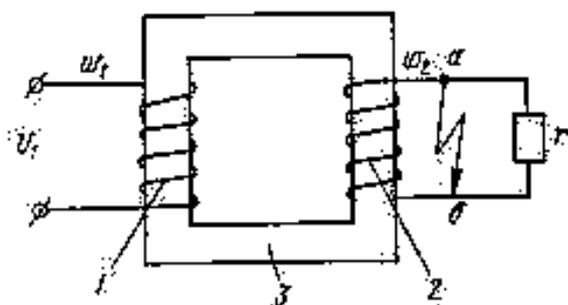


Рис. 7.3. Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки трансформатора: 1-первичная обмотка, 2-вторичная обмотка, 3-магнитопровод

Если соединительные провода, идущие от обмотки, замкнутся где-то в точках *a* и *б*, расположенных до приемника энергии (рис. 7.3), то возникнет короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора. В этом режиме вторичная обмотка окажется замкнутой накоротко. При этом она будет продолжать получать энергию -из первичной обмотки и отдавать ее во вторичную цепь которая состоит теперь только из обмотки и части соединительных проводов.

На первый взгляд кажется, что при коротком замыкании трансформатор должен неизбежно разрушиться, так как сопротивление r_2 обмотки и соединительных проводов в десятки раз меньше сопротивления r приемника. Если допустить, что сопротивление r нагрузки хотя бы в 100 раз больше r_2 , то и ток короткого замыкания $I_{2К}$ должен быть в 100 раз больше тока I_2 при нормальной работе трансформатора. Так как первичный ток также возрастает в 100 раз ($I_1 w_1 = I_2 w_2$), потери в обмотках трансформатора резко увеличатся, а именно в 100^2 раз ($I^2 r$), т. е. в 10000 раз. При этих условиях температура обмоток за 1—2 с достигнет 500—600° С и они быстро сгорят.

Кроме того, при работе трансформатора между обмотками всегда существуют механические усилия, стремящиеся раздвинуть обмотку в радиальном и осевом направлениях. Эти усилия пропорциональны произведению токов $I_1 I_2$ в обмотках, и если при коротком замыкании каждый из токов I_1 и I_2 увеличится, например, в 100 раз, то и усилия увеличатся в 10000 раз. Их величина при этом достигнет сотен тонн и обмотки трансформатора должны были бы мгновенно разрушиться.

Однако на практике этого не происходит. Трансформаторы выдерживают, как правило, короткие замыкания в те весьма малые промежутки времени, пока защита не отключит их от сети. При коротком замыкании резко проявляется действие какого-то дополнительного сопротивления, ограничивающего ток короткого замыкания в обмотках. Это сопротивление связано с магнитными потоками рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} , которые отводятся от основного потока Φ_0 и замыкаются каждый вокруг части витков «своей» обмотки 1 или 2 (рис. 9).

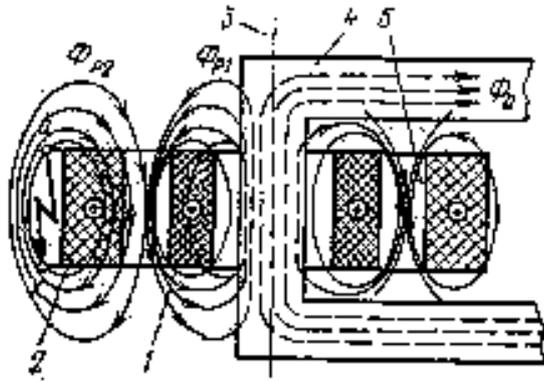


Рис. 7.4. Поток рассеяния и концентрическое расположение обмоток трансформатора:

1 — первичная обмотка, 2 — вторичная обмотка, 3 — общая ось обмоток и стержня трансформатора. 4 — магнитопровод, 5 — главный канал рассеяния.

Непосредственно измерять величину рассеяния очень трудно: слишком разнообразны пути, по которым могут замыкаться эти потоки. Поэтому на практике рассеяние оценивают по влиянию, которое оно оказывает на напряжение и токи в обмотках. Очевидно, что потоки рассеяния возрастают с увеличением тока, протекающего в обмотках. Очевидно также, что при нормальной работе трансформатора поток рассеяния составляет сравнительно небольшую долю основного потока Φ_0 . Действительно, поток рассеяния сцеплен только с частью витков, основной поток — со всеми витками. Кроме того, поток рассеяния большую часть пути вынужден проходить по воздуху, магнитная проницаемость которого принята за единицу, т. е. она в сотни раз меньше магнитной проницаемости стали, по которой замыкается поток Φ_0 .

Все это справедливо как для нормальной работы, так и для режима короткого замыкания трансформатора. Однако поскольку потоки рассеяния определяются токами в обмотках, а в режиме короткого замыкания токи увеличиваются в сотни раз, то во столько же увеличиваются и потоки Φ_p ; при этом они значительно превосходят поток Φ_0 .

Потоки рассеяния индуцируют в обмотках эдс самоиндукции E_{p1} и E_{p2} , направленные против тока. Противодействие, например, эдс E_{p2} можно считать некоторым дополнительным сопротивлением в цепи вторичной обмотки при ее коротком замыкании. Это сопротивление называют *реактивным*.

Для вторичной обмотки справедливо уравнение

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + (-\dot{E}_{p2})$$

В режиме короткого замыкания $U_2=0$ и уравнение преобразуется следующим образом:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_{2к} r_{2к} + (-\dot{E}_{p2к}), \text{ или } \dot{E}_2 = \dot{I}_{2к} r_{2к} + \dot{I}_{2к} x_{2к}$$

где индекс «к» относится к сопротивлениям и токам в режиме короткого замыкания; $I_{2к}x_{2к}$ — индуктивное падение напряжения в режиме короткого замыкания, равное по величине $E_{p2к}$; $x_{2к}$ — реактивное сопротивление вторичной обмотки.

Опыт показывает, что в зависимости от мощности трансформатора сопротивление x_2 в 5—10 раз больше r_2 . Поэтому в действительности ток $I_{2к}$ не в 100, а лишь в 10—20 раз будет больше тока I при нормальной работе трансформатора (активным сопротивлением из-за его малой величины пренебрегаем). Следовательно, в действительности потери в обмотках увеличатся не в 10 000, а только в 100—400 раз; температура обмоток за время короткого замыкания (несколько секунд) едва достигнет 150—200° С и в трансформаторе за это малое время не возникнет никаких серьезных повреждений. Итак, благодаря рассеянию трансформатор способен сам защищаться от токов короткого замыкания.

Все рассмотренные явления происходят при коротком замыкании на зажимах (вводах) вторичной обмотки (см. точки *a* и *b* на рис. 7.3). Это — аварийный режим работы для большинства силовых трансформаторов и возникает он, конечно, не каждый день или даже не каждый год. За время работы (15—20 лет) трансформатор может иметь всего несколько столь тяжелых коротких замыканий. Тем не менее он должен быть так спроектирован и изготовлен, чтобы они не разрушили его и не привели к аварии. Надо четко представлять себе явления, происходящие в трансформаторе при коротком замыкании, сознательно собирать наиболее ответственные узлы его конструкции. В этом отношении весьма существенную роль играет одна из важнейших характеристик трансформатора — напряжение короткого замыкания.

Лекция-8:

Внешняя характеристика трансформатора

Цель: Построить внешнюю характеристику трансформатора.

План:

1. Построение и расчет напряжений при нагрузках.
2. Внешние характеристики трансформатора.

При колебаниях нагрузки трансформатора его вторичное напряжение U'_2 меняется. В этом можно убедиться, воспользовавшись упрощенной схемой замещения трансформатора, из которой следует, что $U'_2 = U_{ном} - I_1 Z_k$.

Изменение вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки от х.х. до номинальной является важнейшей характеристикой трансформатора и определяется выражением

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{ном} - U'_2}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (8.1)$$

Для определения $\Delta U_{ном}$ воспользуемся упрощенной векторной

диаграммой трансформатора, сделав на ней следующее дополнительное построение (рис. 8.1). Из точки A опустим перпендикуляр на продолжение вектора \dot{U}'_2 , получим точку D . С некоторым допущением будем считать, что отрезок \overline{BD} представляет собой разность

$$\dot{U}_{ном} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} - \overline{BF} + \overline{FD}, \quad \text{где} \quad \overline{BF} = U_{к.а} \cos \varphi_2; \overline{FD} = U_{к.р} \sin \varphi_2, \quad \text{тогда}$$

$$U_{ном} - U'_2 = U_{к.а} \cos \varphi_2 + U_{к.р} \sin \varphi_2 \quad (8.2)$$

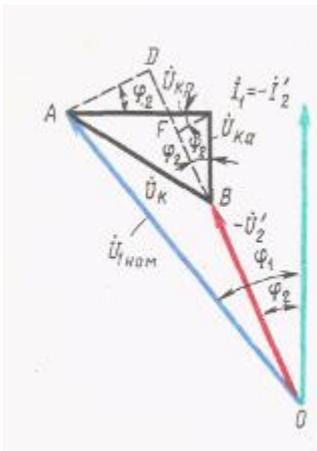


Рис. 8.1. К выводу формулы $\Delta U_{ном}$

Изменение вторичного напряжения (8.1) с учетом (8.2) примет вид

$$\Delta U_{ном} = (U_{к.а} \cos \varphi_2 + U_{к.р} \sin \varphi_2) 100 / U_{ном} \quad (8.3)$$

Обозначим $(U_{к.а} / U_{ном}) 100 = u_{к.а}$; $(U_{к.р} / U_{ном}) 100 = u_{к.р}$, тогда выражение изменения вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки примет вид

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2 \quad (8.4)$$

Выражение (8.4) дает возможность определить изменение вторичного напряжения лишь при номинальной нагрузке трансформатора. При необходимости расчета изменения вторичного напряжения для любой нагрузки в выражение (8.4) следует ввести коэффициент нагрузки, представляющий собой относительное значение тока нагрузки $\beta = I_2 / I_{2ном}$:

$$\Delta U_{ном} = \beta (u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2) \quad (8.5)$$

Из выражения (8.5) следует, что изменение вторичного напряжения ΔU зависит не только от величины нагрузки трансформатора (β), но и от характера этой нагрузки (φ_2).

На рис. 8.2, а представлен график зависимости $\Delta U = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а на рис. 8.2, б — график $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = \text{const}$. На этих графиках отрицательные значения ΔU при работе трансформатора с емкостной нагрузкой соответствуют повышению напряжения при переходе от режима х.х. к нагрузке. Имея в виду, что $u_{ка} = u_k \cos \varphi_k$, $u_{кр} = u_k \sin \varphi_k$,

получим еще одно выражение для расчета изменения вторичного напряжения при любой нагрузке:

$$\Delta U_{ном} = \beta u_{\kappa} (\cos \varphi_{\kappa} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{\kappa} \sin \varphi_2) = \beta u_{\kappa} \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_2) \quad (8.6)$$

Из (8.6) следует, что наибольшее значение изменения напряжения $\Delta U = u_{\kappa}$ имеет место при равенстве углов фазового сдвига $\varphi_2 = \varphi_{\kappa}$, когда $\cos(\varphi_2 - \varphi_{\kappa}) = 1$.

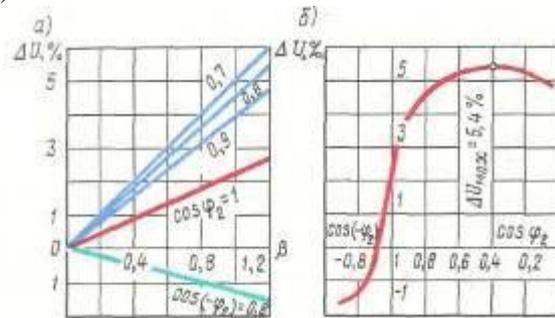


Рис.8.2. Зависимость ΔU от величины нагрузки (а) и коэффициента мощности нагрузки (б) трехфазного трансформатора (100 кВ-А, 6,3/0,22 кВ, $u_{\kappa}=5,4\%$, $\cos \varphi_{\kappa}=0,4$)

Зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от нагрузки I_2 называют *внешней характеристикой*. Напомним, что в силовых трансформаторах за номинальное вторичное напряжение принимают напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме х. х. при номинальном первичном напряжении.

Вид внешней характеристики (рис. 8.3) зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos \varphi_2$). Внешнюю характеристику трансформатора можно построить по (8.6) путем расчета ΔU для разных значений β и $\cos \varphi_2$.

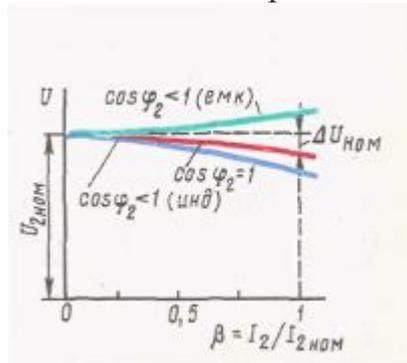


Рис. 8.3. Внешние характеристики трансформатора

Пример. Для трансформатора, данные которого приведены в примерах, определить изменение вторичного напряжения при номинальной нагрузке ($\beta=1$) с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$ для нагрузок двух характеров: активно-индуктивной и активно-емкостной.

Решение. Из примера 1.4 имеем: $u_{\kappa 75} = 5,4\%$; $\cos \varphi_{\kappa 75} = 0,40$; $\sin \varphi_{\kappa 75} = 0,92$. По (8.6) при $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\sin \varphi_2 = 0,6$ получим:

для активно-индуктивной нагрузки $\Delta U = 5,4(0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot 0,6) = 4,65 \%$;

для активно-емкостной нагрузки

$$\Delta U = 5,4[0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot (-0,6)] = -1,2 \%$$

Лекция-9

Потери и КПД трансформатора. Рабочая характеристика.

Цель: Рассмотреть значение потерь в трансформаторах.

План:

1. Потери холостого хода.
2. Основные потери в обмотках.
3. Коэффициент полезного действия.

Трансформатор — статическое электромагнитное устройство, в котором нет вращающихся частей и, следовательно, механических потерь. Все потери в трансформаторе — это потери активной мощности, возникающие в магнитной системе, обмотках и других частях трансформатора при различных режимах его работы. Рассмотрим эти потери.

Потери холостого хода. Мы видели, что в режиме холостого хода потребляемая трансформатором активная мощность расходуется только на покрытие потерь в стали магнитопровода и в первичной обмотке от тока холостого хода ($I_0^2 r_1$)- Потери, возникающие при этом в магнитопроводе, называют *магнитными* и обозначают P_m . А суммарные потери в режиме холостого хода (при номинальных первичном напряжении и частоте) называют *потерями холостого хода* и обозначают P_0 :

$$P = P_m + I_0^2 r_1,$$

где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

Особенностью потерь холостого хода являются их постоянство и независимость от режима нагрузки трансформатора. Действительно, ток холостого хода I_0 определяется геометрической суммой намагничивающей и активной составляющих (см. рис. 6). Ток $I_{\text{нам}}$ создает основной поток Φ_0 , а активная составляющая I_a определяется только потерями в стали от гистерезиса и вихревых токов. Магнитный поток Φ_0 , как мы установили, остается постоянным, как бы ни менялся режим нагрузки (токи I_1 и I_2) трансформатора. Следовательно, и ток $I_{\text{нам}}$ останется неизменным при любой нагрузке.

Активная составляющая зависит только от магнитных потерь и для данного магнитопровода, выполненного из определенной марки стали (при номинальных первичном напряжении и частоте), является также неизменной. Естественно, что и потери в первичной обмотке от протекания тока I_0 останутся неизменными.

Таким образом, *при номинальных первичном напряжении и частоте потери холостого хода P_0 постоянны и не зависят от нагрузки трансформатора.*

Основные потери в обмотках. Как мы установили, при включении нагрузки, из первичной обмотки во вторичную передается

электромагнитная мощность; во вторичной обмотке появляется ток I_2 ; одновременно в первичной обмотке возникает ток I_1 который находится в прямой зависимости от нагрузки, т. е. от тока I_2 . При этом в обмотках теряется мощность, пропорциональная квадратам токов и сопротивлениям первичной и вторичной обмоток:

$$P_{\text{нагр}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$$

где I_1 и I_2 — токи нагрузки; r_1 и r_2 — сопротивления соответствующих обмоток.

Естественно, что потери $P_{\text{нагр}}$ непосредственно зависят от величины мощности, необходимой потребителю. Так, если в какой-либо момент потребляемая мощность составляет 0,7 номинальной, т. е. токи равны 0,7 своих номинальных значений, потери будут составлять $0,7^2 = 0,49$, или только половину расчетных в номинальном режиме. А если учесть, что потребность в энергии в течение суток неодинакова, то очевидны значительные колебания нагрузочных потерь в обмотках, т. е. эти потери непостоянны и полностью зависят от режима нагрузки.

Добавочные потери в обмотках. Однако I_1 и I_2 — не единственные токи, протекающие в обмотках трансформатора. Кроме токов нагрузки в обмотках трансформаторов обнаруживаются еще и другие токи, которые замыкаются внутри отдельных проводов и между параллельными ветвями обмоток; эти токи в отличие от токов нагрузки не выходят за пределы обмоток.

Токи, замыкающиеся внутри отдельных проводов, называют *вихревыми* (аналогично токам внутри пластин магнитной системы). Токи, замыкающиеся между параллельно соединенными обмотками или частями обмоток, называют *циркулирующими*. Эти токи вызваны полем рассеяния, т. е. той частью магнитного поля трансформатора, силовые линии которой сцепляются не со всеми, а только с частью витков обмоток и проходят главным образом в немагнитной среде (в воздухе, масле и т. п.).

При расчете потерь в обмотках реальный ток, неравномерно распределяющийся по сечению проводов и между параллельными ветвями обмоток, обычно рассматривают как сумму трех токов:

тока нагрузки, равномерно распределяющегося по поперечному сечению и между параллельными ветвями;

циркулирующего тока, замыкающегося внутри контура, образованного параллельными ветвями;

вихревого тока, замыкающегося только в пределах каждого провода.

При этом сумма потерь от трех указанных токов равна реальным потерям в обмотках трансформатора.

Кроме потерь в обмотках поля рассеяния вызывают потери в стенках бака, прессующих кольцах, ярмовых балках и других элементах конструкции трансформатора. Добавочные потери снижают эффективность трансформатора; с ними ведется постоянная борьба с целью добиться их

минимальной величины.

Итак, в трансформаторе различают потери активной мощности, не зависящие от нагрузки (P_0); нагрузочные ($P_{нагр}$) и добавочные ($P_{доб}$) потери, определяемые режимом работы (величиной нагрузки) трансформатора:

$$\Sigma P = P_0 + P_{нагр} + P_{доб}$$

Коэффициент полезного действия

Мощность P_1 , получаемая трансформатором из сети, расходуется на полезную мощность P_2 , передаваемую потребителю, и на суммарные потери ΣP :

$$P_1 = P_2 + \Sigma P$$

Отсюда КПД трансформатора определяется формулой

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \cdot 100$$

Полезная мощность, передаваемая потребителю, определяется как $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$, где U_2 и I_2 — вторичные напряжение и ток нагрузки, а $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности, зависящий от характера нагрузки (активная, индуктивная, смешанная). При «чисто» активной нагрузке (например, осветительная электросеть) угол сдвига векторов вторичных тока и напряжения равен нулю, т. е. $\cos\varphi_2 = 1$ и $P_2 = U_2 I_2$.

Однако на практике «чисто» активная нагрузка встречается очень редко. Чаще всего приходится иметь дело со смешанной нагрузкой (например, активная и индуктивная), при которой $\cos\varphi_2$ меньше единицы и, следовательно, полезная мощность, передаваемая потребителю, меньше $U_2 I_2$.

Но при изготовлении трансформатора неизвестно, для какой нагрузки он будет использован, поэтому в табличке паспортных данных при выпуске с завода всегда указывают так называемую полную (или кажущуюся) мощность трансформатора в киловольт-амперах, т. е.

$$S = U_2 I_2 \cdot 10^{-3}, \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

где U_2 и I_2 — указанные в табличке паспортных данных вторичные токи и напряжения трансформатора.

В свою очередь получаемую трансформатором мощность можно записать как

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1, \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

где U_1 и I_1 — номинальные значения первичных напряжения и тока; φ_1 — угол сдвига векторов первичных напряжений и тока, определяемый величиной потребляемой трансформатором реактивной мощности.

Учитывая, что КПД трансформаторов обычно очень высок и достигает 99,5%, и пренебрегая на этом основании потерями, можно записать, что $P_1 = P_2$ или $U_1 I_1 = U_2 I_2$ (при близких значениях углов φ_1 и φ_2).

Разделив последнее равенство на $U_1 I_2$ получим

$$\frac{U_1 I_1}{U_1 I_2} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_2}, \text{ т.е. } \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Вспомним что напряжения (или ЭДС) обмоток пропорциональны числу витков

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}$$

Токи же в обмотках, как видно из предыдущего равенства, обратно пропорциональны напряжениям и, следовательно, числам витков:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{или} \quad I_1 w_1 = I_2 w_2$$

т. е. намагничивающая сила (ампер-витки) первичной обмотки равна намагничивающей силе (ампер-виткам) вторичной обмотки.

Способы уменьшения потерь в трансформаторе

Мы уже видели, что кпд трансформатора достигает весьма высоких значений. Однако как бы ни был высок кпд, за время эксплуатации (20—25 лет) потери мощности, безвозвратно теряемые в трансформаторе, довольно значительны. Поэтому всемерное повышение эффективности, т.е. снижение потерь, остается одной из главных задач производства трансформаторов. Конечно, не все здесь зависит от рабочих, собирающих отдельные узлы или трансформатор в целом. Однако глубокие знания причин возникновения потерь и путей их снижения совершенно необходимы для успешного освоения и грамотного исполнения любых производственных операций при сборке.

Мы уже рассмотрели, где и почему возникают потери в трансформаторе. Посмотрим, какие пути существуют для уменьшения потерь в трансформаторах. Когда говорят о повышении кпд трансформатора, в первую очередь рассматривают возможность снижения потерь холостого хода — постоянных потерь трансформатора. Для уменьшения потерь в стали существует несколько путей. Первый — снижение величины магнитного потока Φ_0 . Однако это самый невыгодный путь, так как для создания тех же эдс потребовалось бы увеличить число витков в обмотках, т.е. израсходовать больше медных или алюминиевых проводов.

Выгоднее использовать другой путь: не уменьшая магнитного потока, применять такие электротехнические стали, которые имели бы высокое сопротивление (для уменьшения вихревых токов) и пониженные потери на гистерезис. Еще один путь — выполнение магнитной системы из тонких изолированных пластин, что резко уменьшает потери от вихревых токов. Широкое использование конструкций магнитопроводов с косыми стыками пластин и без отверстия в активной стали также снижает потери холостого хода.

Однако для сборщика трансформатора особенно важно знать, как

зависят потери в стали от качества выполнения им соответствующих производственных операций. Применяемая сейчас практически для всех трансформаторов холоднокатаная сталь весьма чувствительна к механическим воздействиям. Даже при резке и штамповке пластин происходит ухудшение магнитных свойств стали в зоне реза. Удары по стали, перегибы пластин, наклеп легко нарушают ориентацию кристаллов, увеличивают удельные потери и намагничивающую мощность. До сборки магнитопровода пластины стали обязательно проходят высокотемпературный отжиг в печах, восстанавливающий магнитные характеристики стали.

Однако при сборке магнитопровода, расшихтовке и повторной шихтовке его верхнего ярма сталь очень легко может вновь повредиться. Именно на этих операциях сборщик должен проявить особую осторожность и аккуратность при обращении с пластинами стали, не допуская механических повреждений. Чем осторожнее обращается сборщик с пластинами, тем меньше потери холостого хода в собранном трансформаторе.

Опыт показывает, что удельные потери в стали трансформатора в 1,3—1,5 раза выше, чем в исходном материале. В значительной степени это зависит от качества сборки. При хорошей сборке потери в магнитной системе трансформатора превышают потери в стали до начала ее механической обработки лишь на 25—30%.

Снижение потерь в обмотках от токов нагрузки трансформатора проще всего получить, увеличив сечение обмоточных проводов. Однако экономически это невыгодно, так как при этом неизбежно увеличиваются размеры не только обмоток, но и магнитопровода, т.е. увеличиваются масса активных материалов и потери холостого хода в трансформаторе. Поэтому размеры обмоточных проводов увеличивают редко, чаще всего, если этого требует механическая прочность обмоток.

Существуют и другие пути снижения потерь в обмотках. Мы уже знаем, что кроме нагрузочных в обмотках существуют добавочные потери. Эти потери не только уменьшают КПД трансформатора, снижая его эффективность, но и часто концентрируются в отдельных элементах конструкции трансформатора, вызывая их опасный нагрев. Такие нагревы возникают обычно в верхних и нижних витках (катушках) обмоток, в прессующих кольцах, яр-мовых балках и баке трансформатора.

Потоки рассеяния весьма «чувствительны» к магнитной симметрии обмоток. Достаточно даже незначительного смещения обмоток относительно друг друга, чтобы резко увеличить рассеяние. Такие смещения особенно часто происходят по высоте: одна из обмоток может быть неплотно насажена или несколько отличаться по высоте от другой. Это практически всегда нарушает магнитную симметрию и увеличивает рассеяние. Поэтому при насадке (монтаже) обмоток сборщик должен тщательно следить за их высотами, не допуская смещения обмоток, за равномерностью каналов между ними, за их строго концентрическим расположением на сердечнике.

Нарушение заданных промежутков между обмотками, отводами и баком, как правило, изменяет направление потоков рассеяния и нередко может вызвать опасные местные нагревы в баке или полке ярмовой балки.

Потери мощности и КПД трансформатора.

Трансформаторы нормируются не по активной, а по полной мощности, т.к. размеры трансформаторов при данной частоте определяется в основном номинальным напряжением и током. Номинальный, т.е. допустимый по нагреву, ток определяет собой сечение проводов обмоток трансформатора. От напряжения, приходящегося на один виток, зависят магнитный поток и размеры магнитопровода. Поэтому основной паспортной величиной является номинальная полная мощность $S = U I$. Потери энергии при трансформации бывают постоянные и переменные, зависящие от нагрузки. Постоянные потери мощности состоят из потерь в стальном магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. Потери в стали определяются значением потока и частотой и не зависят от нагрузки, т.к. при $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$ амплитуда потока неизменна. Потери в стали можно принять равными активной мощности, потребляемой трансформатором на х.х.

Переменные потери - это потери в меди обмоток:

$$p_m = p_{1m} + p_{2m} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2,$$

т.к. $I_2 \approx I_1$ (при $I_0 \approx 0$), то

$$p_m = (r_1 + r_2) I_1^2 = r_k I_1^2.$$

Отсюда вытекает, что потери в обмотках при $I_1 = I_{1\text{ном}}$ равны активной мощности в опыте к.з. для $I_{1\text{ном}}$. КПД трансформатора

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - p_c - p_m) / P_1 = 1 - (p_c + p_m) / P_1,$$

где P_1 и P_2 - потребляемая и отдаваемая активная мощность. На х.х. $P_2 = 0$ и $\eta = 0$. С ростом P_2 КПД растет, достигает максимального значения и затем начинает

уменьшаться. Уменьшение при больших нагрузках объясняется сильным увеличением потерь в обмотках, т.к. они растут пропорционально квадрату тока. Максимум КПД имеет место при $p_c = p_m$. Трансформатор конструируется так, чтобы η_{max} достигалось при наиболее вероятной нагрузке, равной $(0,5-0,75) P_{2\text{ном}}$. $\eta_{\text{ном}}$ при $P_2 = P_{2\text{ном}}$ близко к максимальному η и достигает в больших трансформаторах 98-99%.

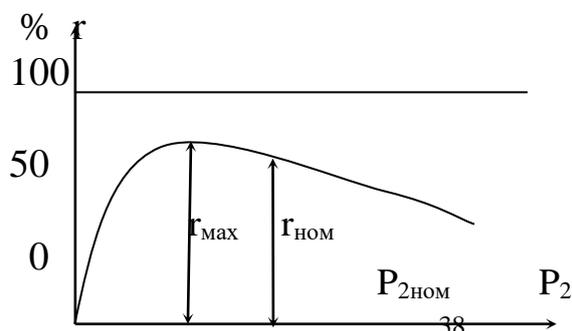


Рис. 32. КПД трансформатора в зависимости от нагрузки.

Лекция-10:

Группы соединения обмоток трансформатора

Цель: Ознакомить студентов со схемами соединений обмоток трансформаторов.

План:

1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов.
2. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы.
3. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

До сих пор при построении векторных диаграмм трансформатора считалось, что ЭДС фазы обмотки ВН \dot{E}_{AX} и обмотки НН \dot{E}_{ax} совпадают по фазе. Но это справедливо лишь при условии намотки первичной и вторичной обмоток трансформатора в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих обмоток, как показано на рис. 2.1, а. Если же в трансформаторе изменить направление обмотки НН или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС \dot{E}_{ax} окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС \dot{E}_{AX} на 180° (рис. 10.1, б). Сдвиг фаз между ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} принято выражать группой соединения. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Угол смещения вектора линейной ЭДС обмотки НН по отношению к вектору линейной ЭДС обмотки ВН определяют умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор ЭДС НН отстает по фазе от вектора ЭДС ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор ЭДС обмотки ВН соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН — часовой стрелке (рис. 10.2). При этом необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} , эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Таким образом, в однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе \dot{E}_{Ax} и \dot{E}_{ax} , группа 6, соответствующая сдвигу фаз между \dot{E}_{Ax} и \dot{E}_{ax} на 180° . Из этих групп ГОСТ предусматривает лишь группу 0, она обозначается I/I—0.

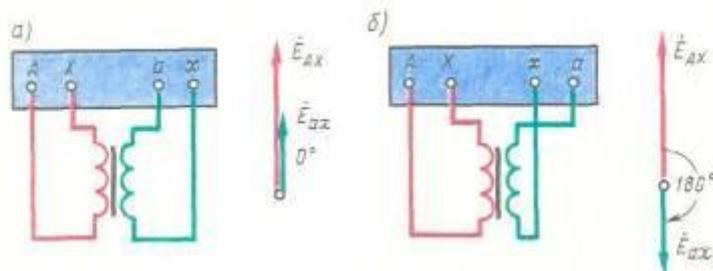


Рис. 10.1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:
а — группа I/I — 0; б—группа I/I — 6



Рис. 10.2. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения.

Применением разных способов соединения обмоток в *трехфазных* трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда — звезда» (рис. 10.3, а). Векторные диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС \dot{E}_{Ax} и \dot{E}_{ax} в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки *A* и *a* при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток ВН и НН. Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается Y/Y—0. Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы *a*, *b* и *c*, а снимать ЭДС с зажимов *x*, *y* и *z*, то ЭДС \dot{E}_{ab} изменит фазу на 180° и трансформатор будет принадлежать группе 6 (Y/Y—6) (рис. 10.3, б).

При соединении обмоток «звезда — треугольник», показанном на рис. 10.4, а, имеет место группа 11 (Y/Δ—11). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток НН, то вектор \dot{E}_{ab} повернется на 180° и трансформатор будет относиться к группе 5 (Y/Δ—5) (рис. 10.4, б).

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например Y/Y и Δ/Δ, получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например Y/Δ или Δ/Y, — нечетные. Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из каждой основной группы соединения методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например на стороне НН (без изменения схемы

соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения $Y/Y-O$ (рис.10.3, а) выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности abc принять последовательность cab , то вектор ЭДС \dot{E}_{ab} повернется на 120° , при этом получим группу соединения $Y/Y-4$. Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность bca , то вектор \dot{E}_{ab} повернется еще на 120° , а всего на 240° ; получим группу $Y/Y-8$.

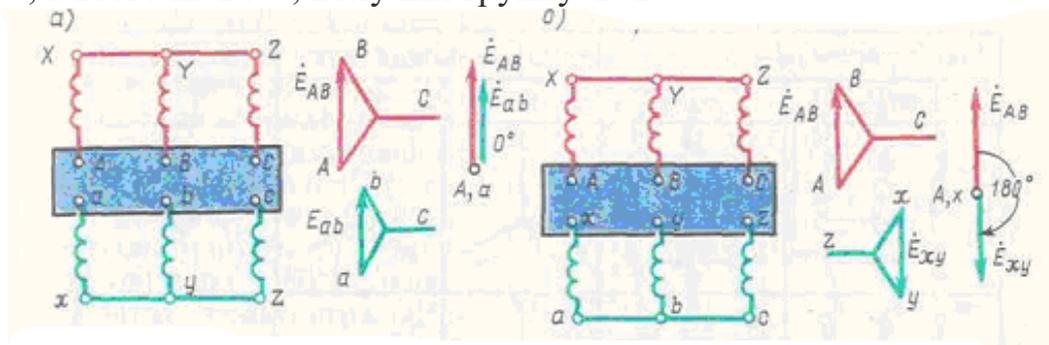


Рис.10.3.Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а- для группы $Y/Y-0$; б-для группы $Y/Y-6$

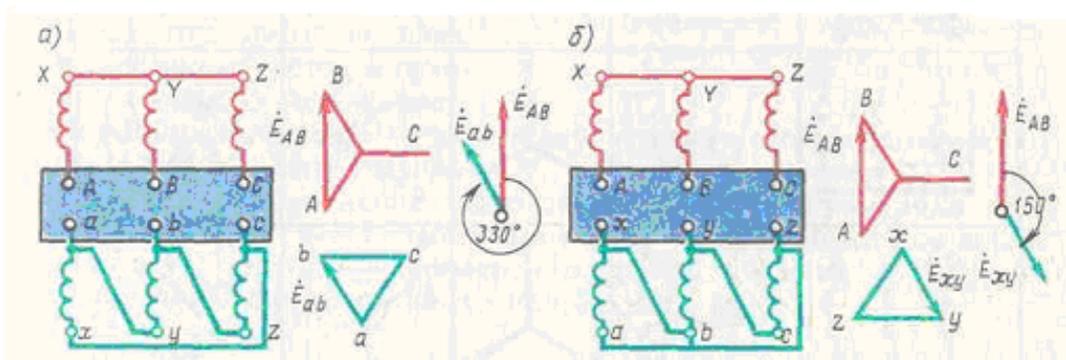


Рис. 10.4. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы $U/D-11$; б — для группы $U/D-5$

Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы 11 — производные группы 3 и 7, от основной группы 5 — производные группы 9 и 1.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах. ГОСТ определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения (рис. 10.5).

Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз между ЭДС обмоток ВН и НН. Этого достигают разделением

обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях, а следовательно, и с различным значением угла. При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

Схемы соединений обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				$\frac{Y}{y} - 0$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{y} - 11$
				$\frac{\Delta}{y} - 11$

Рис. 10.5. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Лекция-11:

Параллельная работа трансформатора

Цель: Ознакомить студентов с параллельной работой и условиями работы трансформаторов.

План:

1. Параллельная работа двухобмоточных трансформаторов.
2. Условия работы трансформаторов.
3. Распределение нагрузок.

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 11.1, а).

Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, например, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка трансформаторов, оставшихся включенными, была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и $\cos\varphi_2$) будут достаточно высокими.

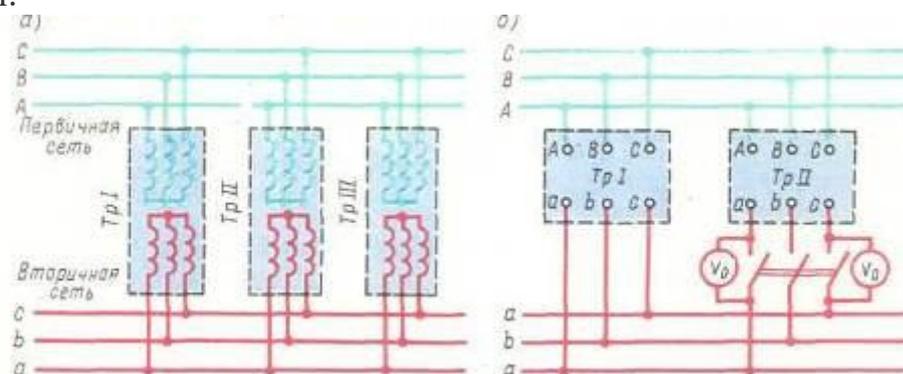


Рис. 11.1. Включение трансформаторов на параллельную работу

Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях:

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны. Другими словами, трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации: $k_1=k_{11}=k_{111}=\dots$. При несоблюдении этого условия, даже в режиме х. х., между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнительный ток, обусловленный разностью вторичных напряжений трансформаторов (рис.11.2, а):

$$\dot{I}_{уп} = \Delta \dot{U} / (Z_{k1} + Z_{k11}) \quad (11.1)$$

где Z_{k1} и Z_{k2} — внутренние сопротивления трансформаторов.

При нагрузке трансформаторов уравнительный ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением х.х. (с меньшим коэффициентом трансформации)

оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации — недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то приходится снижать общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной.

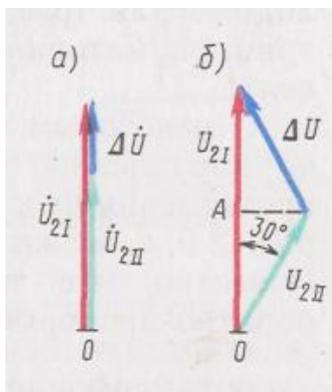


Рис.11.2.Появление напряжения ΔU при несоблюдении условий включения тарнсформаторов на параллельную работу

Однако ГОСТ допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница коэффициентов трансформации не превышает $\pm 0,5\%$ их среднего значения:

$$\Delta k = [(k_1 - k_{11}) / k] 100\% \leq 0,5\% \quad (11.2)$$

где $k = \sqrt{k_1 k_{11}}$ — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения. При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга и в цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU , под действием которого возникнет значительный уравнивающий ток. Так, если включить на параллельную работу два трансформатора с одинаковыми коэффициентами трансформации, но один из них принадлежит к нулевой (Y/Y— 0), а другой — к одиннадцатой (Y/ Δ — 11) группам соединения, то линейное напряжение U_{2I} первого трансформатора будет больше линейного напряжения U_{2II} второго трансформатора в $\sqrt{3}$ раз $U_{2I}/U_{2II} = \sqrt{3}$. Кроме того, векторы этих напряжений окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга на угол 30° (рис. 11.2, б). В этих условиях во вторичной цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU . Для определения величины ΔU воспользуемся построениями рис. 11.2,б: отрезок OA равен $\sqrt{3} U_{11}/2$ или, учитывая, что $U_{211} = U_{21}/\sqrt{3}$,

получим $OA=0,5U_{21}$. Следовательно, треугольник, образованный векторами напряжений равнобедренный, а поэтому разностное напряжение $\Delta U=U_{211}$. Появление такого разностного напряжения привело бы к возникновению во вторичной цепи трансформаторов уравнительного тока, в 15—20 раз превышающего номинальный ток нагрузки, т.е. возникла бы аварийная ситуация. Величина ΔU становится еще большей, если трансформаторы принадлежат нулевой и шестой группам соединения ($\Delta U=2U_2$), так как в этом случае векторы линейных вторичных напряжений окажутся в противофазе.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к. з.: $u_{k1}=u_{k11}=u_{k111} \dots$. Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

С некоторым приближением, пренебрегая токами х.х., можно параллельно включенные трансформаторы заменить их сопротивлениями к.з. Z_{k1} и Z_{k11} и тогда от схемы, показанной на рис.11.3, а, можно перейти к эквивалентной схеме (рис. 11.3, б). Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$I_1/I_{11} = Z_{k11}/Z_{k1}. \quad (11.3)$$

Умножим обе части равенства (11.3) на $I_{11ном}U_{ном}/(I_{1ном}U_{ном})$, левую часть — на $U_{ном}/U_{ном}$ а правую часть — на $100/100$, получим

$$\frac{I_1 I_{11ном} U_{ном} U_{ном}}{I_{11ном} U_{ном} U_{ном}} = \frac{Z_{k11} I_{11ном} U_{ном} 100}{Z_{k1} I_{1ном} U_{ном} 100}.$$

Затем преобразуем полученное равенство, имея в виду следующее: $I_{1ном}U_{ном}=S_1$ и $I_{11ном}U_{ном}=S_{11}$ — фактическая нагрузка первого и второго трансформаторов соответственно, В.А; $I_{1ном}U_{ном}=S_{1ном}$ и $I_{11ном}U_{ном}=S_{11ном}$ — номинальные мощности этих трансформаторов, В.А; $(I_{1ном}Z_{k1}/U_{ном})100=u_{1k}$ и $(I_{11ном}Z_{k11}/U_{ном})100=u_{11k}$ — напряжения к.з. трансформаторов, %. В результате получим

(11.4) или

$$(S_1/S_{1ном}) : (S_{11}/S_{11ном}) = u_{k11}/u_{k1},$$

$$S'_1/S'_1 = u_{k11}/u_{k1}, \quad (11.5)$$

где $S'_1 = S_1 / S_{1ном}$, $S'_{11} = S_{11} / S_{11ном}$ — соответственно относительные мощности (нагрузки) первого и второго трансформаторов.

Из соотношения (11.5) следует, что относительные *мощности (нагрузки) параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям к.з.* Другими словами, при неравенстве напряжений к.з. параллельно работающих трансформаторов больше нагружается трансформатор с меньшим напряжением к. з. В итоге это ведет

к перегрузке одного трансформатора (с меньшим u_k) и недогрузке другого (с большим u_k). Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить общую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений к.з. не допускает полного использования параллельно работающих трансформаторов по мощности.

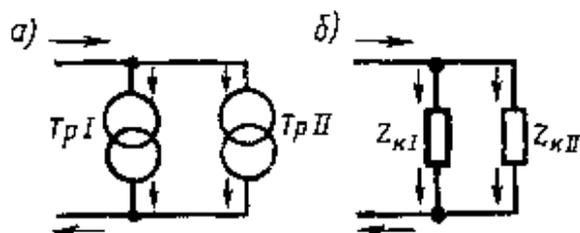


Рис. 11.3. К понятию о распределении нагрузки при параллельной работе трансформаторов

Учитывая, что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями к. з., ГОСТ допускает включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений к. з. не более чем 10% от их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях к.з. трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому » ГОСТ рекомендует, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

Помимо соблюдения указанных трех условий необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется *фазировкой трансформаторов*, сущность которой состоит в том, что одну пару, противоположно расположенных зажимов на рубильнике (см. рис. 11.1, б) соединяют проводом и вольтметром V_0 (нулевой вольтметр) измеряют напряжение между оставшимися несоединенными парами зажимов рубильника. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра V_0 равны нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр V_0 покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено. Необходимо устранить это нарушение и вновь провести фазировку трансформаторов. Следует отметить, что при нарушении порядка следования фаз вольтметр V_0 покажет двойное линейное напряжение. Это необходимо учитывать при подборе вольтметра, предел измерения которого должен быть не менее двойного линейного напряжения на вторичной стороне трансформаторов.

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов S не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов: $S \leq \sum S_{\text{ном}x}$

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_x = S \cdot S_{\text{ном}x} / [u_{\text{кх}} \sum (S_{\text{ном}x} / u_{\text{кх}})] \quad (11.6)$$

где S_x — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, кВ·А; S — общая нагрузка всей параллельной группы, кВ·А; $u_{\text{кх}}$ — напряжение к. з. данного трансформатора, %; $S_{\text{ном}x}$ — номинальная мощность данного трансформатора, кВ·А.

Лекция-12:

Трехобмоточные трансформаторы

Цель: Изучить принцип работы и устройства трехобмоточного трансформатора.

План:

1. Применение трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой.
2. Значение и применение трехобмоточного трансформатора.

В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходится три обмотки. За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее нагружаемой его обмотки. Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мощной обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора.

Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками.

Рассмотрим основные уравнения, особенности работы и область применения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, имеющего наибольшее распространение (рис. 12.1, а). Первичная (наиболее мощная) обмотка этого трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который сцепляется с двумя вторичными обмотками и наводит в них ЭДС \dot{E}_2 и \dot{E}_3 . Аналогично двухобмоточному трансформатору запишем для трехобмоточного трансформатора уравнение МДС:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 = \dot{I}_0 w_1 \quad (12.1)$$

Разделив (12.1) на w_1 , получим уравнения токов:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \quad (12.2)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k_{12}; \dot{I}'_3 = \dot{I}_3 / k_{13} \quad (12.3)$$

Здесь $k_2 = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_2 ;

$k_{13} = w_1/w_3$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_3 .

Пренебрегая током х.х. I_0 , получим упрощенное уравнение токов трехобмоточного трансформатора:

$$I_1 \approx -(I'_2 + I'_3) \quad (12.4)$$

Экономическую целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов можно объяснить тем, что, как это следует из (12.4), первичный ток трехобмоточного трансформатора равен не арифметической, а геометрической сумме приведенных вторичных токов. Учитывая это равенство, а также и то, что нагрузка на вторичные обмотки достигает номинального значения не одновременно, первичную обмотку трехобмоточного трансформатора рассчитывают на мощность, меньшую арифметической суммы номинальных мощностей обеих вторичных обмоток. Еще одно достоинство трехобмоточного трансформатора состоит в том, что он фактически заменяет два двухобмоточных.

Обмотки трехобмоточного трансформатора располагают на стержне обычно концентрически (рис. 12.1, б), при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными — обмотки 1 и 3. В этом случае взаимное влияние вторичных обмоток заметно ослабевает.

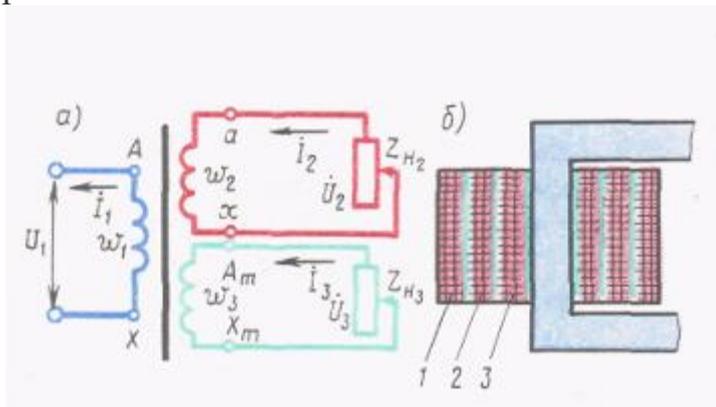


Рис. 12.1. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками

На крупных электростанциях иногда применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками (к каждой из них подключается генератор) и одной вторичной (от нее отходит линия электропередачи). Обычно это установки большой мощности, а поэтому в них применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трансформаторную группу.

Лекция-13:

Автотрансформаторы

Цель: Подробно изучить и рассмотреть принцип работы автотрансформатора.

План:

1. Достоинства и недостатки автотрансформаторов. Мощности автотрансформатора.
2. Коэффициент трансформации автотрансформатора.
3. Трехфазный автотрансформатор.

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и электрическая связь. Обмотки обычного трансформатора можно включить по схеме автотрансформатора, для чего выход X обмотки w_{AX} соединяют с выводом a обмотки w_{ax} (рис. 12.2). Если выводы AX подключить к сети, а к выводам ax подключить нагрузку Z_H , то получим понижающий автотрансформатор. Если же выводы ax подключить к сети, а к выводам AX подключить нагрузку Z_H то получим повышающий автотрансформатор.

Рассмотрим подробнее работу понижающего автотрансформатора. Обмотка w_{ax} одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. В этой обмотке проходит ток I_{12} . Для точки a запишем уравнение токов:

$$I_2 = I_1 + I_{12} \quad (13.1)$$

или

$$I_{12} = I_2 - I_1 \quad (13.2)$$

т. е. по виткам w_{ax} проходит ток I_{12} , равный разности вторичного I_2 и первичного I_1 токов. Если коэффициент трансформации автотрансформатора $k_a = w_{AX}/w_{ax}$ немногим больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки w_{ax} проводом уменьшенного сечения.

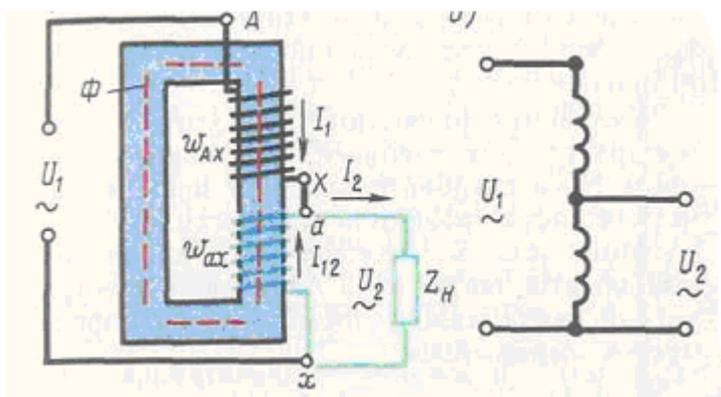


Рис.13.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного понижающего автотрансформатора

Введем понятие *проходной мощности* автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность $S_{пр} = U_2 I_2$ из

первичной цепи во вторичную. Кроме того, различают еще *расчетную мощность* $S_{\text{расч}}$, представляющую собой мощность, передаваемую из первичной во вторичную цепь магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и вес трансформатора зависят от величины этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует лишь магнитная связь. В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями помимо магнитной связи существует еще и электрическая. Поэтому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, другая ее часть передается между цепями без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора $S_{\text{пр}} = I_2 U_2$ на составляющие. Воспользуемся для этого выражением (13.1). Подставив это выражение в формулу проходной мощности, получим

$$S_{\text{пр}} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{\text{э}} + S_{\text{расч}} \quad (13.3)$$

Здесь $S_{\text{э}} = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря электрической связи между этими цепями.

Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе $S_{\text{расч}} = U_2 I_{12}$ составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности.

Средняя длина витка обмотки также становится меньше; следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки I автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и I электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается. V Таким образом автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7%.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность $S_{\text{э}}$, а следовательно, чем меньше расчетная часть проходной мощности.

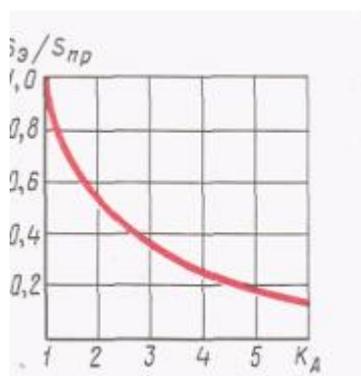


Рис.13.2. Зависимость $S_3/S_{пр}$ от коэффициента трансформации автотрансформатора

Мощность S_3 , передаваемая из первичной во вторичную цепь благодаря электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_3 = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{пр} / k_A \quad (3.8)$$

т. е. значение мощности S_3 обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора k_A

Из графика (рис.13.2) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации. Например, при $k_A=1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{пр} = 1$)

Наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации $k_A \leq 2$. При большом значении коэффициента трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, состоящие в следующем:

1. Большие токи к.з. в случаях понижающего автотрансформатора: при замыкании точек a и x (см. рис. 13.1, a) напряжение U_1 подводится лишь к небольшой части витков Aa , которые обладают очень малым сопротивлением к. з. В этом случае автотрансформаторы не могут защитить сами себя от разрушающего действия токов к. з., поэтому токи к. з. должны ограничиваться сопротивлением других элементов электрической установки, включаемых в цепь автотрансформатора.

2. Электрическая связь стороны ВН со стороной НН; это требует усиленной электрической изоляции всей обмотки. *

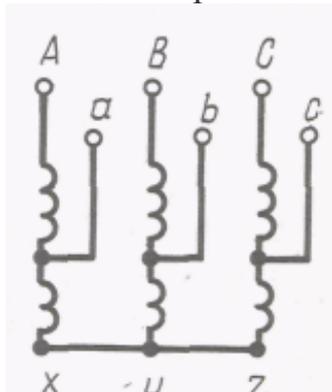


Рис.13.3.Трехфазный автотрансформатор

3. При использовании автотрансформаторов в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и землей возникает напряжение, приблизительно равное напряжению между проводом и землей на стороне ВН.

4. В целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала нельзя применять автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к

потребителям.

Силовые автотрансформаторы широко применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и др. Такие автотрансформаторы обычно выполняют на большие мощности (до 500 МВ·А и выше). Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяют в звезду (рис. 13.3).

Автотрансформаторы применяют в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов двигателей значительной мощности, а также для регулировки режимов работы электрометаллургических печей. Автотрансформаторы малой мощности применяют в устройствах радио, связи и автоматики.

Широко распространены *автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации*. В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать значение вторичного напряжения путем изменения числа витков w_{ax} . Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щетке), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции витками обмотки. Такие автотрансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными и трехфазными.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства трехобмоточных трансформаторов?
2. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
3. Зависят ли достоинства автотрансформатора от коэффициента трансформации?
4. Объясните устройство автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации.

Лекция-14

Специальные трансформаторы

Цель: Изучить и рассмотреть принцип работы специального трансформатора.

План:

1. Перенапряжения в трансформаторах и защита от перенапряжении.
2. Виды перенапряжений в трансформаторе.
3. Меры по защите трансформаторов от перенапряжений.

В нормальных условиях эксплуатации трансформатора между отдельными частями его обмоток, а также между обмотками и заземленным магнитопроводом и корпусом действуют синусоидальные напряжения номинальной частоты, не представляющие опасности для электрической изоляции. Однако периодически возникают условия, при которых между указанными элементами трансформатора появляются *перенапряжения*. В зависимости от причин, их порождающих, перенапряжения разделяются на

два вида: внутренние и внешние.

Внутренние перенапряжения..Возникают либо в процессе коммутационных операций, например отключения или включения трансформатора, либо в результате аварийных процессов (короткое замыкание, дуговые замыкания на землю и др.). Значение внутреннего перенапряжения обычно составляет $(2,5 \div 3,5)U_{ном}$.

Внешние (атмосферные) перенапряжения. Обусловлены атмосферными разрядами: либо прямыми ударами молний в провода или опоры линий электропередач, либо грозowymi разрядами, индуцирующими в проводах линии электромагнитные волны высокого напряжения. Значение перенапряжения в этом случае может достигать нескольких тысяч киловольт.

На процессы, происходящие в трансформаторе при перенапряжениях, существенное влияние оказывает скорость нарастания волны напряжения. При подходе волны напряжения к трансформатору напряжение между зажимом обмотки и землей нарастает весьма быстро. При этом скорость нарастания напряжения в значительной степени влияет на вид схемы замещения обмотки. При напряжении промышленной частоты схема замещения обмотки имеет вид ряда последовательно соединенных индуктивных и активных сопротивлений элементов этой обмотки (рис. 14.1, а). При подходе к трансформатору периодической волны перенапряжения, вызванной коммутационными процессами, скорость нарастания напряжения настолько увеличивается, что на процессы, происходящие в трансформаторе, оказывают влияние емкостные связи между элементами обмотки и между обмоткой и заземленным магнитопроводом (рис.14.1,б). Наконец, при атмосферных перенапряжениях, когда к трансформатору устремляется апериодический импульс с крутым передним фронтом $P\Phi$ (рис. 14.2), при котором напряжение между вводом трансформатора и землей достигает наибольшего значения за $(1 \div 2) \cdot 10^{-6}$ с, индуктивные сопротивления в схеме замещения становятся настолько большими, что их влиянием можно пренебречь и считать схему замещения обмотки состоящей только из поперечных емкостей между элементом обмотки и магнитопроводом (землей) C_q и продольных емкостей между смежными элементами обмотки C_d (рис. 14.1., б).

Рассмотрим подробнее процессы в трансформаторе при атмосферных перенапряжениях, так как эти перенапряжения наиболее опасны. Обмотка в этом случае по отношению к быстро нарастающему напряжению представляет собой некоторую входную емкость $C_{вх}$, которая обуславливает входное (емкостное) сопротивление трансформатора $x_{вх}$. В начальный момент подхода волны, когда скорость нарастания напряжения огромна ($du/dt \rightarrow \infty$), входное сопротивление практически равно нулю ($x_{вх} \rightarrow 0$), т. е. трансформатор эквивалентен коротко замкнутому концу линии передачи. При этом напряжение на входе трансформатора сначала падает до нуля, затем, по мере зарядки емкости $C_{вх}$, повышается и достигает двукратной величины амплитуды импульса, а волна

напряжения отражается от трансформатора. В этот период трансформатор эквивалентен разомкнутому концу линии передачи. Напряжение, возникающее между обмоткой и магнитопроводом (землей), создает токи через поперечные емкости C_d , при этом токи в продольных емкостях C_u по мере приближения к концу обмотки уменьшаются. Это приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль обмотки. Характер начального распределения напряжения вдоль обмотки зависит от двух причин: от состояния нейтральной точки трансформатора и от соотношения емкостей $C_{я}$ и C_a , определяемого коэффициентом

$$\alpha = \sqrt{C_q / C_d} \quad (14.1)$$

При $\alpha \geq 5$, что соответствует реальным трансформаторам, начальное распределение напряжения не зависит от состояния нейтральной точки и весьма неравномерно, достигая максимального значения на начальных элементах обмотки. Это создает опасность для изоляции между начальными элементами обмотки. При уменьшении α распределение напряжения вдоль обмотки становится более равномерным, особенно при заземленной нейтрали, хотя наибольшее значение напряжения остается неизменным.

Через некоторое время после подхода волны к обмотке все точки обмотки приобретут установившийся потенциал. При этом распределение напряжения вдоль обмотки, называемое конечным, будет соответствовать кривым при $\alpha=0$, показанным на рис.

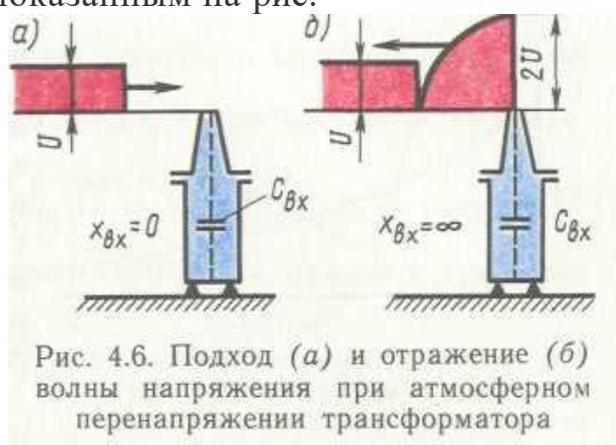


Рис. 4.6. Подход (а) и отражение (б) волны напряжения при атмосферном перенапряжении трансформатора

Следовательно, между начальным и конечным распределением напряжения имеет место переходный процесс, связанный с затухающими электромагнитными колебаниями, обусловленными индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением обмотки. За время переходного процесса напряжение каждой точки обмотки меняется и в отдельные моменты времени достигает значения, превышающих наибольшее его значение при начальном распределении напряжения.

Наибольшее напряжение возникает на изолированном конце обмотки (точка X при изолированной нейтрали) и может достигать значения $u_x = 1,91V$, где V — максимальное напряжение на обмотке при начальном распределении напряжения. Таким образом, наибольшую опасность для

изоляции обмотки (межвитковой и относительно земли) представляет собой переходный колебательный процесс.

В автотрансформаторах из-за наличия электрической связи между первичной и вторичной цепями возможна передача волн напряжения из одной сети в другую со значительным усилением их по амплитуде.

К мерам по защите трансформаторов от перенапряжений относятся внешняя защита — применение заземленных разрядников (эти меры позволяют ограничить амплитуду волн напряжения, подходящих к трансформатору) и внутренняя защита — усиление изоляции входных витков; установка емкостных колец и электростатических экранов (емкостная компенсация); применение обмоток с пониженным значением коэффициента. Цель последних двух мероприятий внутренней защиты сводится к сближению начального и конечного распределения напряжения. При этом практически устраняется переходный колебательный процесс.

Емкостные кольца представляют собой разомкнутые шайбообразные экраны, изготовляемые металлизированного электрокартона. Этими кольцами прикрывают начало и конец обмотки, тем самым поднимают кривую начального распределения напряжения, приближая ее к кривой конечного. Изменение потенциала от распределения,ной точки обмотки трансформатора.

Уменьшение неравномерности относительно земли в течение перенапряжения достигается применением в трансформаторах дополнительных электростатических экранов в виде разомкнутых металлических колец (витков), охватывающих начальную часть обмотки и соединенных с ее вводом. Такой экран создает дополнительные емкости C_3 , через которые заряжаются поперечные емкости C_0 в обход продольных емкостей C_1 (рис. 4.9, а). В результате кривая начального распределения напряжения 1 (рис. 4.9, б) значительно спрямляется и становится почти такой же, как и кривая конечного распределения 2 для обмоток с заземленной нейтралью.

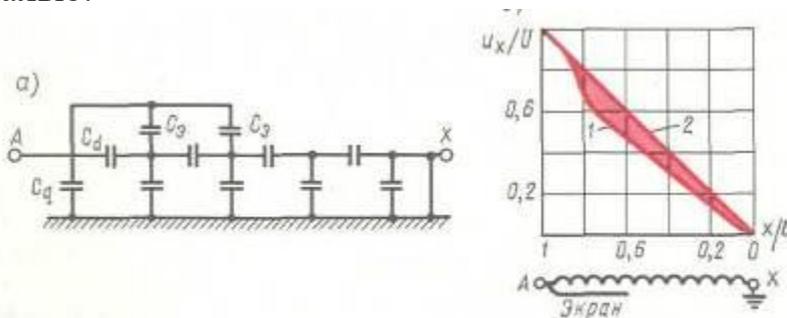


Рис. 4.9. Роль электростатического экрана

Трансформаторы с изолированной нейтралью также могут снабжаться электростатическими экранами, но в этом случае применяют специальные устройства — *импидоры*, включаемые между нейтралью и землей. Это устройство содержит емкость, включенную параллельно разряднику и

реактору, которая при волновых процессах заземляет нейтраль трансформатора, а при промышленной частоте имеет большое сопротивление и практически изолирует нейтраль.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения сверхтока холостого хода?
2. Как влияет состояние магнитного насыщения магнитопровода на силу тока включения трансформатора?
3. Каковы наиболее неблагоприятные условия внезапного короткого замыкания трансформатора?
4. Какова продолжительность переходного процесса при внезапном коротком замыкании трансформатора?
5. Какие виды перенапряжений возможны в трансформаторе?
6. В чем состоит внешняя и внутренняя защита трансформаторов от перенапряжений?
7. Каково назначение дополнительных электростатических экранов в трансформаторе?

Лекция-15:

Цель: Ознакомить студентов с особенностями работы измерительного трансформатора.

План:

1. Назначение измерительных трансформаторов.
2. Устройство трансформатора тока.
3. Трансформаторы напряжения в схемах релейной защиты.
4. Схемы соединений обмоток измерительного трансформатора.

2.1 Назначение

Измерительные преобразователи являются общими элементами для всех схем релейной защиты. Их основное назначение изолировать цепи высокого напряжения от вторичных цепей защиты и преобразовать входные величины в величины, удобные для измерений. К наиболее распространенным относятся электромагнитные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Трансформаторы тока рассчитываются на получение вторичных токов величиной 5 А или 1 А, при помощи трансформаторов напряжения получают вторичные напряжения 100 В или $\frac{100}{\sqrt{3}}$ В.

В качестве примера на Рис.7 показан внешний вид низковольтного кабельного и высоковольтного трансформаторов тока.

2.2 Особенности работы трансформаторов тока в схемах релейной защиты

Конструктивно трансформатор тока представляет собой стальной сердечник с двумя обмотками: первичной ω_1 и вторичной ω_2 (Рис.8).

При протекании тока по первичной обмотке трансформатора тока создается магнитный поток, который наводит во вторичной обмотке, замкнутой на сопротивление нагрузки, ток I_2 . Для идеального трансформатора тока сумма намагничивающих сил обмоток равна нулю:

$$I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = 0.$$

Отсюда $I_2 = -\frac{I_1 \omega_1}{\omega_2}$. Отношение чисел витков обмоток называется витковым коэффициентом трансформации трансформатора тока:

$$n_B = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Отношение первичных и вторичных номинальных токов

$n_{\text{ТТ}} = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}}$ называется номинальным коэффициентом трансформации трансформатора тока.

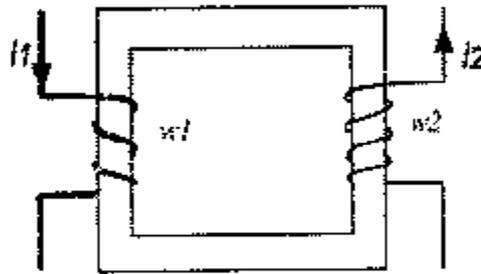


Рис.8 Устройство трансформатора тока

Из-за потерь в стали сердечника значения виткового и номинального коэффициентов трансформации трансформаторов тока различны. Для рассмотрения причин, вызывающих эту разницу, обратимся к схеме замещения трансформатора тока (Рис.9).

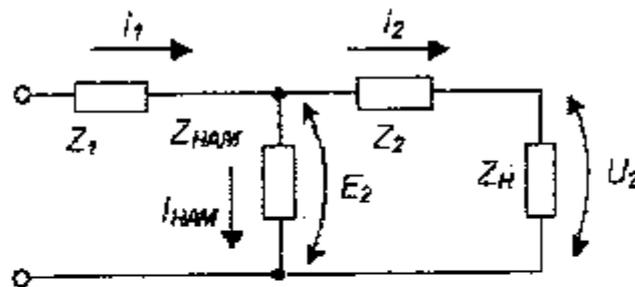


Рис.9 Схема замещения трансформатора тока

На схеме замещения Z_1 , Z_2 - сопротивление первичной и вторичной обмоток, $Z_{\text{НАМ}}$ - сопротивление ветви намагничивания, которое характеризует потери мощности в трансформаторе тока, связанные с затратами энергии на создание магнитного потока, гистерезис, нагрев стали сердечника.

Первичный ток I_1 проходит сопротивление Z_1 и далее разветвляется по двум параллельным ветвям. На нагрузку поступает вторичный ток I_2 , по ветви намагничивания замыкается ток $I_{НАМ} = I_1 - I_2$, называемый током намагничивания. Введение ветви намагничивания в схему замещения трансформатора тока позволяет учесть погрешности при реальном процессе трансформации.

Таким образом, соотношение первичного и вторичного токов имеет вид:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{I}_1 - \vec{I}_{НАМ}}{n_{ТТ}},$$

т.е. реальный трансформатор тока имеет погрешности. Различают следующие виды погрешностей.

Токовая погрешность определяет разницу между измеренным модулем тока и его фактическим значением:

$$f_i = \frac{I_1 - I_2 n_{ТТ}}{I_1} 100, \%$$

Фазовая погрешность определяет угол сдвига вторичного тока относительно первичного.

Из схемы замещения следует, что величина погрешности зависит от значения сопротивления ветви намагничивания $Z_{НАМ}$ и от его соотношения с сопротивлением нагрузки Z_H . Сопротивление намагничивания определяется конструкцией трансформатора тока, характеристикой стали сердечника и кратностью первичного тока. Увеличение первичного тока приводит к насыщению стали и уменьшению сопротивления $Z_{НАМ}$, что приводит к росту погрешности. Если увеличивать нагрузку при неизменном первичном токе, то также происходит увеличение погрешности.

Для примера в Табл.1 приведена классификация трансформаторов тока. Допустимые погрешности, приведенные в таблице, соответствуют нагрузкам вторичной обмотки не выше номинальных, и при вторичном токе, не превышающем 120 % номинального значения

Таблица 1

Класс точности	Допустимая токовая погрешность, %	Допустимая угловая погрешность, мин.	Область применения
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 40	Учет электроэнергии
1,0	$\pm 1,0$	± 80	Щитовые приборы

Трансформаторы тока, предназначенные для питания схем релейной защиты, работают в режиме коротких замыканий или перегрузок оборудования, когда первичные токи значительно превышают номинальные. Такие условия работы связаны с увеличенным значением погрешностей. И хотя сердечники трансформаторов тока для устройств релейной защиты выполняются из высококачественной электротехнической стали, насыщающейся при больших кратностях тока, обязательным условием возможности использования трансформатора тока является его проверка на допустимую погрешность.

Согласно нормативным требованиям, погрешность трансформаторов тока в режиме работы защиты не должна превышать 10%. Рекомендуется следующий порядок выбора трансформаторов тока:

1. Определяется рабочий ток защищаемого объекта $I_{РАБ}$.
2. По найденному значению тока и номинальному напряжению выбирается трансформатор тока.
3. Определяется максимально возможное значение тока повреждения защищаемого объекта $I_{КМАКС}$.
4. Рассчитывается кратность тока короткого замыкания как

отношение $K = \frac{I_{\text{КМАКС}}}{I_{\text{РАБ}}}$.

5. На основании технической документации поставщика оборудования или справочных материалов и найденной кратности первичного тока определяется допустимая нагрузка $Z_{\text{Н доп}}$ для выбранного трансформатора тока.

6. Рассчитывается фактическая нагрузка трансформаторов тока $Z_{\text{Н ФАКТ}}$ и сравнивается с допустимой.

7. Если $Z_{\text{Н ФАКТ}} \leq Z_{\text{Н доп}}$ считается, что трансформатор тока удовлетворяет требованиям точности и его можно использовать для данной схемы защиты. Если $Z_{\text{Н ФАКТ}} > Z_{\text{Н доп}}$, то необходимо принять меры для уменьшения нагрузки. В качестве таких мер можно назвать следующие:

- выбор трансформатора тока с увеличенным значением коэффициента трансформации;
- увеличение сечения контрольного кабеля;
- использование вместо одного трансформатора тока группу трансформаторов, соединенных последовательно.

Фактическую нагрузку трансформаторов тока можно рассчитать по выражению:

$$Z_{\text{Н ФАКТ}} = Z_{\text{Р}} + Z_{\text{ПР}} + R_{\text{КАБ}} + R_{\text{ПЕР}} ,$$

где $Z_{\text{Р}}$ – сопротивление реле; $Z_{\text{ПР}}$ – сопротивление приборов; $R_{\text{КАБ}}$ – сопротивление контрольного кабеля; $R_{\text{ПЕР}}$ – сопротивление переходных контактов. Сложение полных и активных сопротивлений для упрощения расчетов допускается производить арифметически. В трехфазной сети необходимо дополнительно учесть схему соединения трансформаторов тока и вид короткого замыкания.

Трансформаторы тока, в отличие от силовых трансформаторов, работают в условиях, близких к режиму короткого замыкания вторичных выводов. При размыкании вторичной обмотки весь первичный ток переходит в ветвь намагничивания, и трансформатор тока переходит в

режим глубокого насыщения. Режим насыщения сопровождается нагревом магнитопровода и возникновением опасных перенапряжений на вторичных зажимах, что недопустимо по условиям изоляции вторичных цепей (Рис.10).

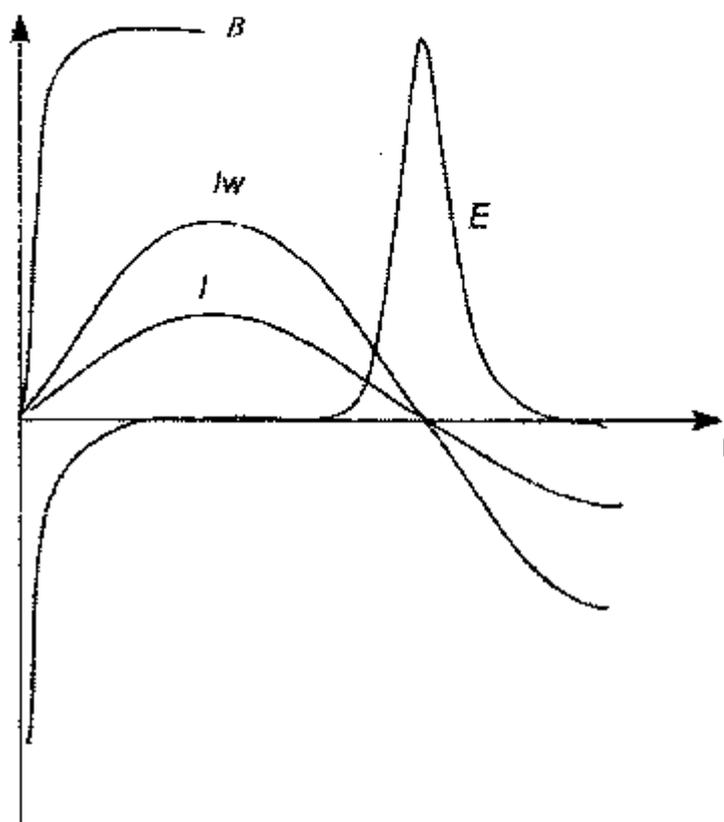


Рис.10 Кривые изменение во времени тока I , ампервитков, индукции B и э.д.с. E у трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой.

С учетом сказанного работа трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой недопустима, а работа с замкнутой является частным случаем нормальной работы. По условиям электробезопасности вторичные обмотки трансформаторов тока заземляются.

2.3 Трансформаторы напряжения в схемах релейной защиты

Трансформатор напряжения представляет собой сердечник, набранный из пластин электротехнической стали с размещенными на нем первичной и вторичной обмотками (Рис.11).

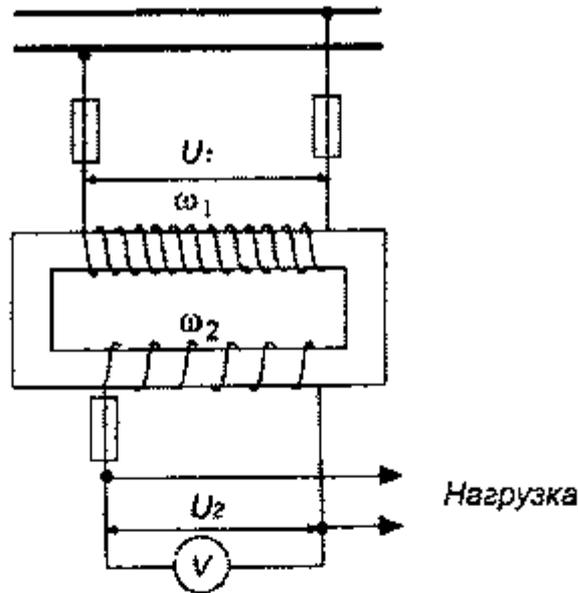


Рис.11 Устройство трансформатора напряжения

Первичная обмотка ω_1 , имеющая большое число витков (несколько тысяч), подключается параллельно силовой сети, к вторичной обмотке ω_2 подключаются измерительные приборы, цепи защит и сигнализации. Преобразование напряжения U_1 до величины U_2 определяется соотношением витков первичной и вторичной обмоток:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Отношение чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации трансформатора напряжения:

$$n_{ТН} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Трансформаторы напряжения выполняются в однофазном и трехфазном исполнении. В зависимости от требуемой информации однофазные трансформаторы могут соединяться в различные схемы (Рис 12).

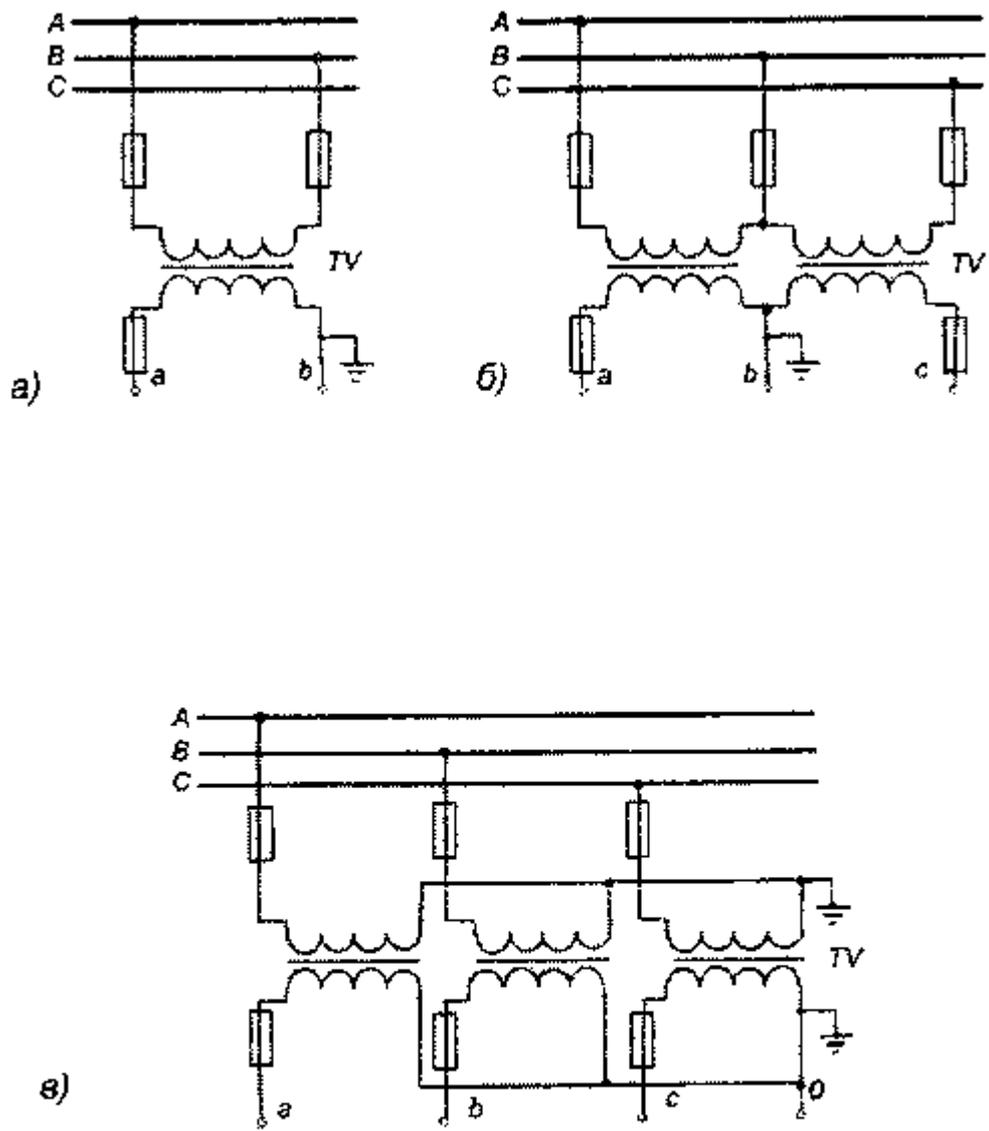


Рис.12 Схемы соединения однофазных трансформаторов

Для получения одного междуфазного напряжения используется схема, представленная на Рис12,а; для получения двух или трех междуфазных напряжений применяется схема неполной звезды (Рис.12,б).

На Рис.12,в приведено соединение трех трансформаторов напряжения в схему звезды. Эта схема используется для получения информации о фазных или междуфазных напряжениях.

Для получения напряжения нулевой последовательности наряду с фазным и междуфазным применяются трансформаторы напряжения, имеющие две вторичные обмотки. Одна из вторичных обмоток соединяется в звезду, другая - в разомкнутый треугольник (Рис.13).

Вторичные обмотки трансформаторов напряжения обязательно заземляются для обеспечения безопасности персонала при попадании высокого напряжения во вторичные цепи. При соединении вторичной обмотки в звезду заземляется нулевая точка, в других случаях - один из фазных проводов.

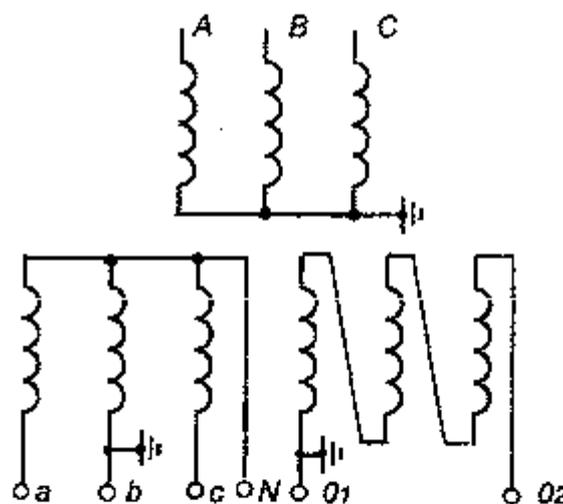


Рис.13 Схема соединения обмоток трансформаторов с двумя вторичными обмотками

Для защиты от коротких замыканий во все незаземленные вторичные цепи трансформаторов напряжения устанавливаются предохранители или автоматические выключатели.

Трансформаторы напряжения имеют две погрешности:

1. Погрешность по напряжению, под которой понимается отклонение действительного значения коэффициента трансформации от его номинального значения.

2. Погрешность по углу.

В зависимости от погрешностей трансформаторы напряжения подразделяются на классы точности. В Табл.2 приведена классификация трансформаторов в зависимости от класса точности.

Таблица 2

<i>Класс точности</i>	<i>Допустимая погрешность по напряжению, %</i>	<i>Допустимая угловая погрешность, мин.</i>	<i>Область применения</i>
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 20	Учет электроэнергии
1,0	$\pm 1,0$	± 40	Щитовые приборы
3,0	$\pm 3,0$	<i>Не нормируется</i>	Сигнализация, цепи защит

В зависимости от нагрузки один и тот же трансформатор напряжения может работать в разных классах точности. Поэтому в паспортных данных указывается два значения мощности:

- номинальная, при которой трансформатор работает в гарантированном классе точности;

- предельная, при которой нагрев обмоток не выходит за допустимые пределы.

Кроме основных погрешностей на точность измерений оказывает влияние падение напряжения в контрольном кабеле. Величина потерь

нормируется, так, для цепей релейной защиты она не должна превышать 3 %.

Лекция-16:

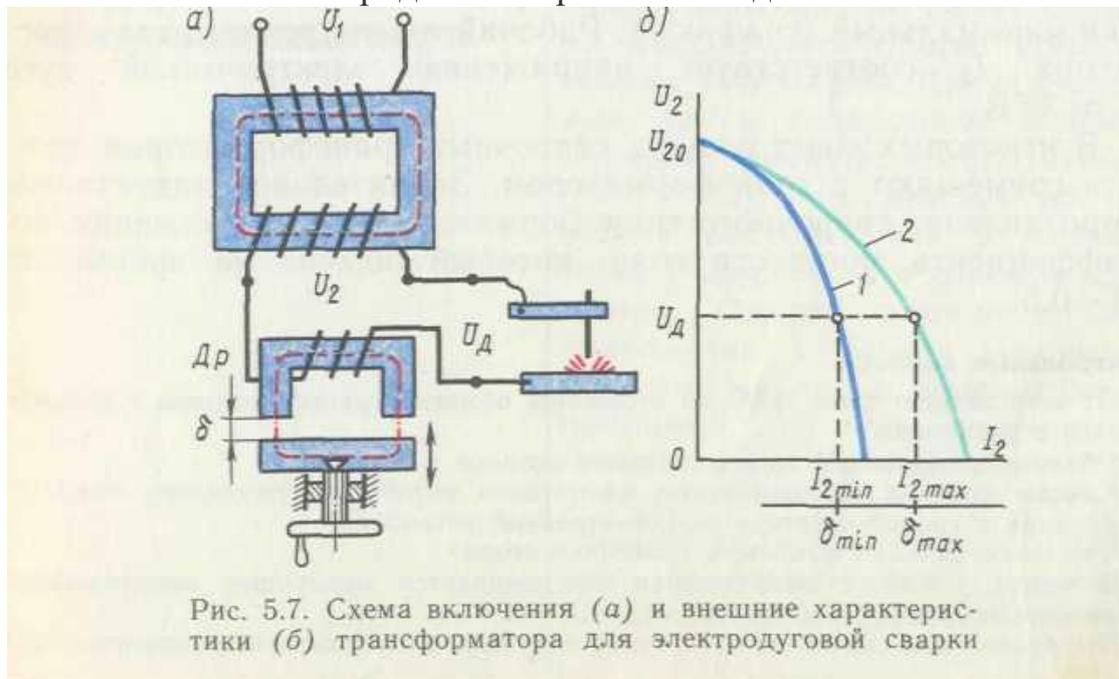
Сварочные трансформаторы

Цель: Ознакомить студентов с особенностями работы измерительного трансформатора.

План:

1. Трансформаторы для дуговой электросварки.
2. Специфика работы сварочного трансформатора.

Трансформатор для дуговой электросварки, обычно называемый сварочным трансформатором, представляет собой однофазный двухобмоточный понижающий трансформатор, преобразующий напряжение сети 220 или 380 В в напряжение 60—70 В, необходимое для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги между металлическим электродом и свариваемыми деталями.



Специфика работы сварочного трансформатора состоит в прерывистом режиме его работы: зажиганию электрической дуги предшествует короткое замыкание вторичной цепи трансформатора, а обрыв дуги создает режим холостого хода. Номинальный режим работы трансформатора соответствует устойчивому горению электрической дуги. Для ограничения тока в сварочном трансформаторе приняты меры, суть которых сводится к увеличению индуктивного сопротивления. С этой целью первичную; обмотку трансформатора располагают на одном стержне, а вторичную — на другом. Это ведет к росту магнитного рассеяния, а следовательно, к увеличению индуктивного сопротивления обмоток. Другой мерой является включение во вторичную цепь

трансформатора последовательно индуктивной катушки — дросселя, представляющего собой катушку из медного провода прямоугольного сечения, расположенную на стальном магнитопроводе. Дроссель снабжен устройством типа «винт — гайка», позволяющим вращением винта перемещать ярмо так, что воздушный зазор δ между ярмом и стержнями меняется от $\delta = \delta_{\max}$. При этом минимальному значению δ соответствует: наибольшее индуктивное сопротивление дросселя, а следовательно, минимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\min}$, а максимальному значению $\delta = \delta_{\max}$ — наименьшее индуктивное сопротивление дросселя и максимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\max}$. Повышенное индуктивное сопротивление обмоток и наличие дросселя D_p обеспечивают сварочному трансформатору круто падающие внешние характеристики $U_2 = f(I_2)$, необходимые для устойчивого горения электрической дуги. Изменяя величину воздушного зазора δ в дросселе D_p можно плавно менять угол наклона внешних характеристик, при $\delta \approx 0$ наклон характеристики наибольший (график 1), а при $\delta \approx \delta_{\max}$ наклон характеристики минимальный (график 2). Рабочий ток сварочного трансформатора I_2 соответствует напряжению электрической дуги $U_d \approx 30$ В.

В некоторых конструкциях сварочных трансформаторов дроссель совмещают с трансформатором. Значительное индуктивное сопротивление сварочного трансформатора ведет к снижению его коэффициента мощности $\cos\varphi$, который обычно не превышает 0,4—0,5.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит фаза ЭДС во вторичной обмотка трансформатора с подвижным сердечником?
2. Объясните взаимодействие магнитных потоков в ТРПШ.
3. Какова причина возникновения магнитного потока вынужденного намагничивания в трансформаторе выпрямительной установки?
4. Что такое типовая мощность трансформатора?
5. В каких условиях выпрямления обеспечивается наилучшее использование мощности трансформатора?
6. Что делают для снижения остаточной индукции в импульсном трансформаторе?

Лекция-17:

Способ охлаждения трансформатора

Цель: Рассмотреть способы и процессы охлаждения трансформаторов.

План:

1. Способы охлаждения трансформаторов при различных температурах.
2. Процесс нагревания.

Электрическая энергия, теряемая в трансформаторе при его работе, выделяется в виде тепла в обмотках, магнитопроводе, деталях конструкции и в других частях трансформатора. При этом трансформатор нагревается, и температура его отдельных частей может превысить допустимую температуру.

Металлические части трансформатора могут без повреждения длительное время выдерживать довольно высокие температуры, а изоляция трансформатора и, в частности, изоляция обмоточных проводов не может. Установлено, что электрическая прочность бумажной изоляции, которая в современных масляных трансформаторах играет основную роль, не снижается до тех пор, пока сохраняется ее механическая прочность. При работе трансформатора бумажная изоляция постепенно изнашивается, стареет. Старение изоляции сопровождается уменьшением ее эластичности и механической прочности. Причем чем выше температура обмоток, тем интенсивнее происходит старение изоляции.

Сильно состарившаяся изоляция становится настолько неэластичной и хрупкой, что под влиянием вибраций и динамических усилий, имеющих в трансформаторе, начинает растрескиваться и ломаться, т. е. механически повреждается. Следствием этого может быть резкое снижение электрической прочности, пробой и повреждение трансформатора.

Время, в течение которого изоляция изнашивается настолько, что становится непригодной к дальнейшей работе, зависит от температуры ее нагрева. С увеличением температуры при прочих равных условиях срок службы трансформатора уменьшается.

Для трансформаторов отечественного производства принята такая допустимая температура нагрева изоляции, при которой обеспечивается срок службы трансформаторов 20—25 лет. Опытным путем установлено, что наивысшая температура, которую выдерживает в масле бумажная изоляция без заметного снижения своих изоляционных свойств, 105°C .

Исходя из этого, ГОСТ 11677—75 установил, что у трансформаторов, предназначенных для мест с наибольшей температурой окружающего воздуха 40°C , превышение средней (определяемой по сопротивлению) температуры обмоток над температурой воздуха не должно быть больше $105^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 65^{\circ}\text{C}$. Однако температура окружающего воздуха как в течение года, так и в течение суток никогда не бывает постоянной, также

колеблется и нагрузка. Следовательно, температура обмоток (и изоляции) никогда не будет равной 105°C .

Установлено, что если бы в процессе эксплуатации среднюю температуру обмоток каким-либо способом удалось поддерживать все время 105°C , то срок службы трансформатора едва бы превысил 2 года. Поэтому температуру обмоток 105°C надо понимать как наибольшую среднюю температуру, допустимую для безопасной работы трансформатора в течение нескольких часов в сутки в те немногие дни, когда температура окружающего воздуха достигает максимума (40°C).

Как уже указывалось, при работе трансформатора обмоточные провода, стальные пластины магнитопровода и различные металлические детали конструкции нагреваются и вследствие этого являются постоянными источниками тепловой энергии. Поэтому в магнитопроводе и обмотках происходит постоянный процесс передачи тепла от более нагретых внутренних частей к наружным поверхностям, отдающим тепло. Учитывая это, трансформаторы строят таким образом, чтобы размеры наружных поверхностей были достаточны для отвода тепла.

В трансформаторах мощностью в несколько киловольт-ампер поверхность охлаждения обмоток и магнитопровода достаточна для отвода того небольшого количества тепла, которое выделяется при их работе. Малые трансформаторы охлаждаются в окружающем их более холодном воздухе путем естественного излучения тепла. Никаких специальных устройств для охлаждения не предусматривается. Такие трансформаторы называют *сухими*.

По мере увеличения мощности потери в трансформаторе возрастают, причем они растут пропорционально его массе, т. е. приблизительно пропорционально кубу его линейных размеров. В то же время поверхность охлаждения растет пропорционально квадрату линейных размеров, т. е. потери в трансформаторе увеличиваются быстрее, чем поверхность, отводящая тепло.

Начиная с какой-то определенной мощности, этой поверхности оказывается недостаточно и приходится между частями обмоток, катушками, секциями делать специальные каналы, увеличивая омываемые воздухом поверхности охлаждения. Однако и такое увеличение оказывается достаточным только для трансформаторов мощностью 630—1000 кВ-А. При больших мощностях приходится делать специальные обдувные установки для увеличения теплоотдачи сухих трансформаторов.

Более действенным средством для отвода тепла трансформатора является применение минерального (трансформаторного) масла. Трансформатор погружают в наполненный маслом стальной бак. Слои масла, непосредственно соприкасающиеся с обмоткой и магнитопроводом, нагреваются, и нагретые частицы, имея меньшую плотность, поднимаются вверх; их место занимают поступающие снизу более холодные частицы масла. Поднявшиеся вверх нагретые частицы масла соприкасаются со стенками и крышкой бака и отдают им свое тепло,

рассеивающееся затем в окружающий воздух. Охладившиеся частицы масла опускаются вниз, а их место занимают другие, нагретые частицы.

Таким образом, в баке происходит непрерывный процесс нагревания и охлаждения масла, циркулирующий поток которого является как бы переносчиком тепла от нагретых частей трансформатора к стенкам бака. Конечно, температура масла не остается одинаковой по высоте бака: внизу она самая низкая, в середине бака средняя, а верхние слои масла нагреты до наибольшей температуры.

Согласно нормам (ГОСТ 11677—75) в верхних слоях допустимо превышение температуры масла над температурой окружающего воздуха 60°C , если масло в баке полностью защищено от соприкосновения с окружающим воздухом (герметизированное исполнение трансформатора), и 55°C — во всех остальных случаях. Этот перегрев можно установить, если из температуры верхних слоев масла, определенной по термометру, вычесть температуру окружающего воздуха в момент измерения. Например, температура верхних слоев масла составляет по термометру 75°C . В момент измерения температура воздуха была 25°C , следовательно, перегрев масла $75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$, что ниже допустимого.

Применение трансформаторного масла в качестве теплопередающей среды исключительно эффективно. По опытным данным теплоотдача от единицы поверхности при масляном охлаждении в 6—8 раз больше, чем при отдаче тепла непосредственно воздуху. При масляном охлаждении поверхности обмоток и магнитопровода можно сделать значительно меньшими, чем у такого же по мощности сухого трансформатора с воздушным охлаждением.

Однако поверхность бака, с которого тепло отводится в воздух, должна быть при этом достаточно большой, иначе температура масла станет выше допустимой. Таким образом, у масляных трансформаторов для улучшения охлаждения надо подбирать бак трансформатора с достаточно большой поверхностью.

Самый простой путь — это увеличение линейных размеров (длины, ширины, высоты) бака. Но этот путь ведет к увеличению общих размеров трансформатора и поэтому не экономичен. Более правильный путь — это увеличение поверхности бака путем применения волнистых стенок, труб, ввариваемых в его стенки, или трубчатых охладителей (радиаторов), специально пристраиваемых к баку трансформатора.

У трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А такое увеличение поверхности бака позволяет успешно отводить тепло и не допускать увеличения температуры масла над воздухом выше допустимой величины. У этих трансформаторов происходит, как говорят, естественное охлаждение с помощью масла и циркуляции воздуха. У трансформаторов большой мощности естественное охлаждение оказывается недостаточным. В этих случаях применяют искусственное охлаждение масла. Существует несколько способов принудительного охлаждения трансформаторов.

Рассмотрим наиболее распространенные.

Первый способ — это вид охлаждения трансформатора с использованием принудительного ускорения движения воздуха, охлаждающего радиаторы, с помощью вентиляторов. Этот способ называют дутьевым (Д) охлаждением.

Устанавливая вентиляторы под радиаторами и создавая таким образом принудительную циркуляцию воздуха вдоль их наружной поверхности, можно увеличить эффективность (теплоотдачу) радиаторов на 40—50% по сравнению с естественным охлаждением. Вообще система дутьевого охлаждения рассчитывается так, чтобы при снижении нагрузки до 50—60% можно было бы отключить вентиляторы, т. е. вернуться к естественному масляному охлаждению.

Второй способ — это вид охлаждения трансформатора с использованием принудительного ускорения движения как трансформаторного масла, так и воздуха. Этот способ называют системой охлаждения ДЦ.

Обычно для системы ДЦ применяют специальные охладители, собранные из трубок, через которые встроенные в трубопровод насосы прогоняют нагретое масло. Необходимое число вентиляторов создает направленные потоки воздуха, обдувающие поверхность трубок

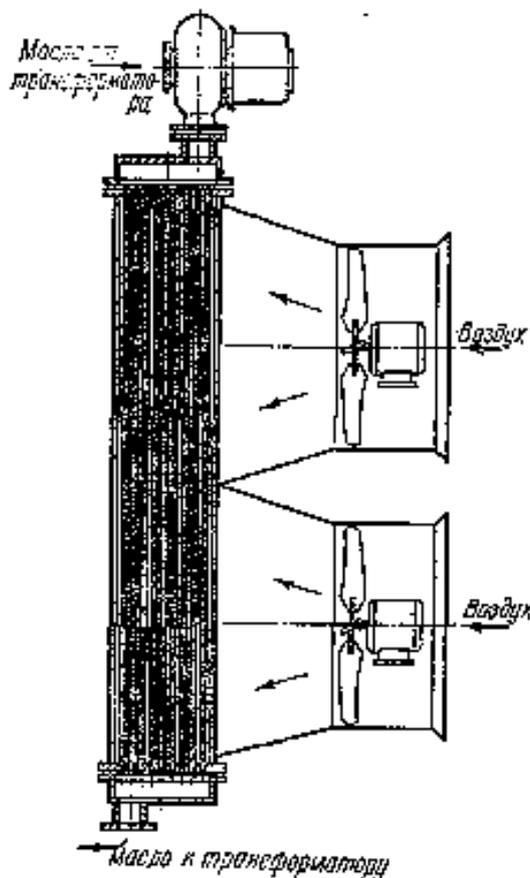


Рис.17.1.Схема охладителя системы ДЦ.

Третий способ — это вид охлаждения трансформатора, при котором нагретое масло принудительно (с помощью насоса) прогоняется через ряд

труб охладителя, заключенных в «рубашку», в которой циркулирует вода. Такой способ называют масляно-водяной системой или охлаждением вида Ц. Водяное охлаждение — одно из наиболее эффективных. Объясняется это тем, что коэффициент теплоотдачи от масла в воду значительно выше, чем в воздух. Поэтому такие охладители получаются значительно компактнее, чем в системе ДЦ. Это обстоятельство часто является определяющим при выборе системы охлаждения. Особенно важно это для специальных (например, электропечных) трансформаторов, устанавливаемых внутри производственных помещений, где габариты трансформатора существенно влияют на стоимость строительных работ и всего предприятия в целом.

Принудительная циркуляция масла очень эффективна. Во-первых, она значительно улучшает (выравнивает) распределение температуры масла по высоте бака, т. е. снижает температуру наиболее нагретых верхних слоев масла. Во-вторых, ускоренное движение масла улучшает теплоотдачу нагретых элементов конструкции трансформатора.

Особенно эффективна принудительная циркуляция в тех случаях, когда масло с повышенной скоростью проходит не только между активной частью и баком, но и непосредственно в каналах обмоток и магнитопровода трансформатора.

Для обеспечения такого «направленного» движения масла в конструкции предусматривают специальные перегородки и другие устройства, направляющие масло именно в те места, где это необходимо.

Лекция-18: Защита трансформатора.

Цель: Ознакомить студентов с видами перенапряжений трансформаторов.

План:

1. Графики переходных процессов при внезапном к.з.
2. Перенапряжения в трансформаторах и защита от напряжений.

При переходе трансформатора из одного установившегося режима в другой возникают переходные процессы. Так как каждый установившийся режим характеризуется определенным значением энергии электромагнитных полей, то в течение переходного процесса происходит изменение энергии этих полей. Наибольший практический интерес представляют переходные процессы при включении трансформатора и коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки.

Включение трансформатора в сеть. В этом случае результирующий магнитный поток можно рассматривать как сумму трех составляющих:

$$\Phi = \Phi_{\text{уст}} + \Phi_{\text{пер}} \pm \Phi_{\text{ост}}$$

где $\Phi_{\text{уст}}$ — магнитный поток установившийся; $\Phi_{\text{пер}}$ — магнитный поток переходного процесса; $\Phi_{\text{ост}}$ — магнитный поток остаточного магнетизма,

направленный либо согласно с установившимся потоком (знак «+»), либо встречно ему (знак «-»).

Магнитный поток переходного процесса затухающий и постоянен по направлению.

Наиболее благоприятный случай включения трансформатора в сеть будет при потоке остаточного магнетизма, направленном встречно установившемуся потоку, и мгновенном значении первичного напряжения $u_1=0$. при этом магнитный поток установившийся $\Phi_{уст}$ будет максимальным, так как он отстает по фазе от напряжения на угол приблизительно 90° . Магнитный поток Φ становится наибольшим приблизительно через половину периода после включения трансформатора в первичной обмотке появится намагничивающий ток, пропорциональный магнитному потоку. Если же магнитопровод трансформатора насыщен, то при включении трансформатора намагничивающий ток включения достигает значительной силы, называемой сверхтоком холостого хода.

При наиболее неблагоприятных условиях сверхток i_k может в 6-8 раз превысить номинальное значение первичного тока.

Так как длительность переходного процесса невелика и не превышает нескольких периодов переменного тока, то ток включения для трансформатора не опасен. Однако его следует учитывать при регулировке аппаратуры защиты, чтобы в момент включения трансформатора не произошло его неправильного отключения от сети. Бросок тока включения следует также учитывать при наличии в цепи первичной обмотки трансформатора чувствительных измерительных приборов. Во избежание поломки этих приборов нужно до включения трансформатора в сеть шунтировать их токовые обмотки.

Внезапное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Она возникает из-за различных неисправностей: механического повреждения изоляции или ее электрического пробоя при перенапряжениях, ошибочных действиях обслуживающего персонала и др. короткое замыкание-это аварийный режим, который может привести к разрушению трансформатора.

При внезапном коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки в трансформаторе возникает переходный процесс, сопровождаемый возникновением большого мгновенного тока к.з. i_k . Этот ток можно рассматривать как результирующий двух токов: установившегося тока $i_{k,уст}$ и тока переходного процесса, постоянного по направлению, но убывающего по экспоненциальному закону

$$i_k = i_{k,уст} + i_{k,пер}$$

Наиболее неблагоприятные условия к.з. могут быть в момент, когда мгновенное значение первичного напряжения равно нулю ($u_1=0$). На рис.18.1. построена тока к.з. для этого условия. Ток внезапного к.з. (ударный ток) может достигать двойного значения установившегося тока к.з. и в 20-40 раз

превышать номинальное значение тока.

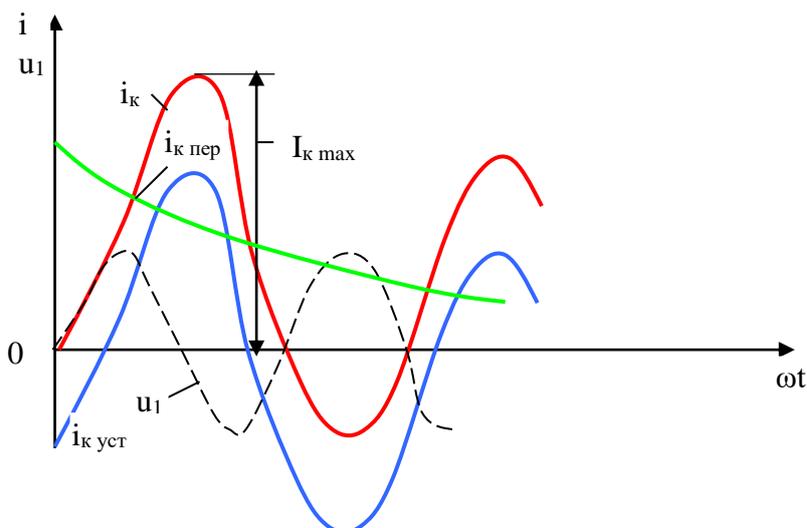


Рис.18.1. Графики переходных процессов при внезапном к.з.

Переходный процесс при внезапном к.з. у трансформатора малой мощности длится не более одного периода, а у трансформаторов большой мощности — 6-7 периодов. Затем трансформатор переходит в режим установившегося к.з., при этом в обмотках протекают токи $i_{k \text{ уст}}$, значения которых хотя и меньше тока i_k при переходном процессе, но все же во много раз превышают номинальное значение тока. Через несколько секунд срабатывают защитные устройства, отключающие трансформатор от сети. Но несмотря на кратковременность процесса к.з., он представляет собой значительную опасность для обмоток трансформатора: во-первых, чрезмерно большой ток к.з. резко повышает температуру обмотки, что может повредить ее изоляцию; во-вторых, резко увеличиваются электромагнитные силы в обмотках трансформатора.

Значение удельной электромагнитной силы, действующей на витки обмоток, определяют произведением магнитной индукции поля рассеяния B_σ на ток i в витке обмотки:

$$F = B_\sigma i$$

где F — удельная электромагнитная сила, Н/м.

Но с увеличением тока растет также и индукция поля рассеяния, поэтому сила растет пропорционально квадрату тока ($F=i^2$). Так, если в витке ток $i=100$ А и индукция $B_\sigma=0,1$ Тл, то $F=0,1 \cdot 100=10$ Н/м. Такая сила не вызывает заметных деформаций витков обмотки. Но если при внезапном к.з.

бросок ток достигнет значения I_k , превышающего номинальный ток в 30 раз, то электромагнитная сила возрастет в 900 раз и станет равной 9000Н/м. Такая сила может вызвать значительные механические разрушения в трансформаторе. Все это необходимо учитывать при проектировании трансформаторов и создавать достаточно прочные конструкции обмоток и надежное их крепление на сердечниках.

Перенапряжения в трансформаторах и защита от напряжений

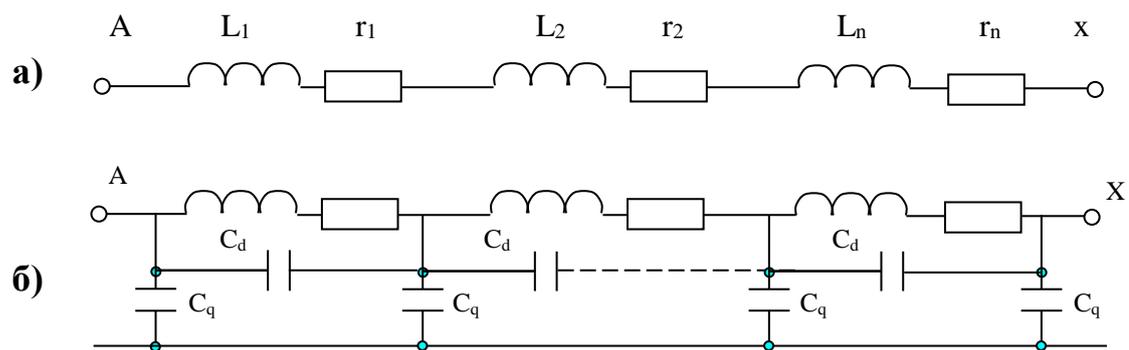
В нормальных условиях эксплуатации трансформатора между отдельными частями его обмоток, а также между обмотками и заземленным магнитопроводом и корпусом действует синусоидальные напряжения номинальной частоты, не представляющие опасности для электрической изоляции. Однако периодически возникают условия, при которых между указанными элементами трансформатора появляются перенапряжения. В зависимости от причин, их порождающих, перенапряжения разделяются на два вида: внутренние и внешние.

Внутренние перенапряжения. Возникают либо в процессе коммутационных операций, например отключения или включения трансформатора, либо в результате аварийных процессов (короткое замыкание, дуговые замыкания на землю и др.). Значение внутреннего перенапряжения обычно составляет $(2,5 \div 3,5) U_{ном}$.

Внешние (атмосферные) перенапряжения. Обусловлены атмосферными разрядами: либо прямыми ударами молний в провода или опоры линий электропередач, либо грозowymi разрядами, индуцирующими в проводах линии электромагнитные волны высокого напряжения. Значение перенапряжения в этом случае может достигать нескольких тысяч киловольт.

На процессы, происходящие в трансформаторе при перенапряжениях, существенное влияние оказывает скорость нарастания волны напряжения. При подходе волны напряжения к трансформатору напряжение между зажимом обмотки и землей нарастет весьма быстро. При этом скорость нарастания напряжения в значительной степени влияет на вид схемы замещения обмотки. При напряжении промышленной частоты схема замещения обмотки имеет вид ряда последовательно соединенных индуктивных и активных сопротивлений элементов этой обмотки. При подходе к трансформатору периодической волны перенапряжения, вызванной коммутационными процессами, скорость нарастания напряжения настолько увеличивается, что на процессы, происходящие в трансформаторе, оказывают влияние емкостные связи между элементами обмотки и между обмоткой и заземленным магнитопроводом. Наконец, при атмосферных перенапряжениях, когда к трансформатору устремляется апериодический импульс с крутым передним фронтом ПФ, при котором напряжение между вводом трансформатора и землей достигает наибольшего значения за $(1 \div 2) \cdot 10^{-6}$ с, индуктивные сопротивления в схеме замещения становятся настолько большими, что их влиянием можно пренебречь и считать схему замещения обмотки состоящей только из поперечных емкостей между элементом

обмотки и магнитопроводом (землей) C_q и продольных емкостей между смежными элементами обмотки C_d



Литературы

- | | | |
|----|--|---|
| 1. | <i>Костенько Г.Н.
Пиотровский Л.М.</i> | <i>Электрические машины. Л, 1972 г.</i> |
| 2. | <i>Вольдек А.И.</i> | <i>Электрические машины. Л, 1978 г.</i> |
| 3. | <i>Кацман М.М.</i> | <i>Электрические машины. М, 1983 г.</i> |
| 4. | <i>Копилов И.П.</i> | <i>Электрические машины. Л, 1986 г.</i> |
| 5. | <i>Копилова И.П.</i> | <i>Проектирование. Электрические
машины. М: 1980 г.</i> |
| 6. | <i>Тихомиров П.М.</i> | <i>Расчёт трансформаторов. М. 1986 г.</i> |

