

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Электромеханика и электромеханические системы»

621.313(07)
Ш96

Б.Д. Шумаков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ЧАСТЬ I.
ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ.
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Курс лекций

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2014

УДК 621.313(075.8) + 621.314.2(075.8)
Ш96

Одобрено
учебно-методической комиссией
энергетического факультета

Рецензенты:
В.А. Буторин, А.Ю. Коняев.

Шумаков Б.Д.

Ш96 Электрические машины. Часть I. Введение в электромеханику. Трансформаторы: курс лекций /Б.Д. Шумаков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 114 с.

Курс лекций предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по основной образовательной программе бакалавриата с направлением подготовки 140400 – «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация 140400.62 «бакалавр»). В лекциях рассмотрены вопросы введения в электромеханику и раздела «Трансформаторы» общей дисциплины «Электрические машины» базовой части профессионального цикла образовательной программы.

В материале курса приведены описания фондов оценочных средств текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся, содержащие контрольные вопросы для подготовки к лабораторным работам, тесты для допуска и защиты лабораторных работ, а также контрольные вопросы для подготовки к экзамену по разделу «Трансформаторы». Приведены тесты для оценки знаний поступающих в магистратуру, а также задачи и тесты, использованные на Всероссийских студенческих олимпиадах по электромеханике.

При составлении курса лекций использованы материалы по дисциплинам «Электромеханика» и «Электрические машины», разработанные ведущими преподавателями кафедры «Электромеханика и электромеханические системы» ЮУрГУ В.А. Лифановым, В.Ф. Шемякиным, Г.Н. Мармелёвым, С.Н. Лычагиной, А.К. Елагиной и др.

УДК 621.313(075.8) + 621.314.2(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2014

Раздел 1

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ

Лекция 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

План лекции

1. *Назначение и область применения электромеханики.*
2. *Характеристики магнитного поля и магнитные свойства материалов.*
3. *Физические законы электромеханического преобразования энергии.*

1. Назначение и область применения электромеханики

Уровень развития цивилизации во многом определяется количеством энергии, используемой человеком. В настоящее время в наиболее развитых странах на одного человека приходится свыше 10 кВт энергии всех видов. Электрическая энергия среди них составляет наибольшую долю. Это обусловлено следующими достоинствами электрической энергии перед другими видами энергий: удобная передача на большие расстояния от мест производства к местам потребления; сравнительно простое и экономичное преобразование в другие виды энергии; достаточно легкое управление.

Потребность в электроэнергии непрерывно растет, особенно в настоящий период в связи с ростом автоматизации и созданием технологических процессов, непосредственно использующих электрическую энергию.

Область науки и техники, связанная с использованием взаимодействия электрических и механических процессов (или, более кратко, электромеханических процессов) для целенаправленного преобразования энергии – электрической в механическую, или, наоборот, механической в электрическую называется *электромеханика*. Машины, в которых производятся такие преобразования *называются электромеханическими преобразователями*, или *электрическими машинами* (ЭМ). К ЭМ также относят электромагнитные аппараты, преобразующие величины напряжения переменного тока.

Цели электромеханического преобразования энергии могут быть различными, и эти цели определяют специализацию ЭМ. Принято различать ЭМ, используемые в качестве источника электрической энергии – *генераторы*, в качестве источника механической энергии – *двигатели* и в качестве преобразователя напряжения переменного тока – *трансформаторы*.

В качестве энергоносителя в ЭМ может быть использовано как магнитное, так и электрическое поле. Машины, в которых для преобразования энергии используется магнитное поле, называются индуктивными, а те, в которых используется электрическое поле – емкостными. Возможны конструкции индуктивно-емкостных ЭМ, в которых совместно используются магнитные и электрические поля.

Диапазон мощностей современных ЭМ составляет $10^{-17} \dots 10^9$ Вт и может быть условно разделен на три зоны. Распределение по зонам ориентировочных нормированных значений количества ЭМ с различными энергоносителями N_* в зависимости от их мощностей показано на рис. 1.1.

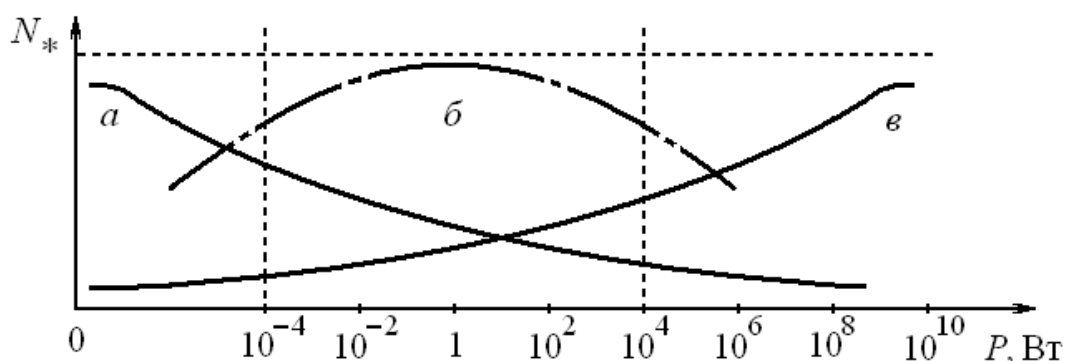


Рис. 1.1. Ориентировочные нормированные значения количества ЭМ с различными энергоносителями N_* :
а – емкостные ЭМ; *б* – индуктивно-емкостные ЭМ;
в – индуктивные ЭМ

Наибольшее распространение в обеспечении потребностей промышленности, сельского хозяйства и населения получили индуктивные ЭМ, что объясняется особенностями их конструкций, простотой требуемых технологий изготовления, а также доступностью электротехнических материалов с необходимыми свойствами. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться наиболее распространенные индуктивные ЭМ, в которых энергоносителем является магнитное поле.

Во всех системах большой или малой мощности, где используются ЭМ, их рабочие свойства во многом определяют поведение и свойства этих систем. Поэтому знание основ теории ЭМ необходимо каждому специалисту, работающему в любой из сфер производства, распределения или потребления электрической энергии.

В данном курсе лекций рассматриваются конструкции основных типов индуктивных ЭМ, составляющих основу электромеханики, принципу их действия, анализу электромеханических и электромагнитных процессов, связанных с преобразованием энергии в ЭМ, расчету характеристик и режимов работы в различных условиях эксплуатации, а также методам испытаний и определения параметров ЭМ.

2. Характеристики магнитного поля и магнитные свойства материалов

2.1. Характеристики магнитного поля

Движущиеся элементарные частицы любой среды (вещества), обладающие электрическим зарядом, создают вокруг себя магнитное поле. В проводнике с током и пространстве вокруг него магнитное поле создается этим током, а внутри и вне намагниченного тела (постоянного магнита) – внутриатомным и внутримолекулярным движением элементарных заряженных частиц (например, вращением электронов вокруг собственной оси и ядра атома).

Магнитное поле характеризуется вектором *магнитной индукции* B [Тл], значение которой определяет *силу*, действующую в данной точке поля на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

При воздействии магнитного поля на любую среду ее внутреннее магнитное поле складывается из двух составляющих: внешнего поля, например, от токов вблизи расположенных проводников, и поля элементарных внутренних токов. Таким образом, в различных с точки зрения количества элементарных токов и их взаиморасположения средах внутренняя магнитная индукция B может быть различной при одинаковых внешних магнитных полях.

Для оценки воздействия только внешнего поля, например, от токов вблизи расположенных проводников, используют векторную величину, которая называется напряженностью магнитного поля, или *магнитной напряженностью* H [А/м]. H не зависит от материала вещества и характеризует только действие силы, намагничивающей данную среду. При действии магнитного поля, образованного токами вблизи расположенных проводников, напряженность магнитного поля H в какой-либо точке зависит от силы тока и расстояний от проводников до точки, в которой она определяется.

Магнитная индукция любой среды отличается от ее магнитной напряженности на величину внутреннего магнитного поля, которое зависит от свойств среды. Данная зависимость выражается следующим образом:

$$B = \mu_a \cdot H,$$

где μ_a – *абсолютная магнитная проницаемость* вещества.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a характеризует магнитные свойства вещества, его способность создавать собственное магнитное поле под действием намагничивающей силы внешнего магнитного поля. На практике удобно пользоваться отношением абсолютной магнитной проницаемости вещества μ_a к магнитной проницаемости вакуума μ_0 , которая принята за условную единицу и носит название «*магнитная постоянная*» ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м):

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0.$$

Величина μ_r называется *относительной магнитной проницаемостью* и показывает, во сколько раз магнитное поле в веществе получается сильнее (или слабее), чем в вакууме.

Графически магнитное поле можно изобразить с помощью линий магнитной индукции. Линию магнитной индукции проводят так, чтобы в каждой точке этой линии касательная к ней совпадала с вектором магнитной индукции. Особенностью магнитных линий является то, что они замкнуты и сцеплены с источником магнитного поля. Суммарное число магнитных силовых линий или поток вектора магнитной индукции, проходящий через заданную поверхность S , называется *магнитным потоком* Φ [Вб]. Если вектор магнитной индукции B перпендикулярен поверхности S , то

$$\Phi = B \cdot S.$$

2.2. Магнитные свойства материалов

Магнитная проницаемость материала характеризует степень его влияния на образование магнитного поля. По степени влияния на магнитное поле различают следующие материалы.

Диамагнетики – материалы, обладающие магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$. Диамагнетики ослабляют действующее на них внешнее магнитное поле, то есть они формируют собственное магнитное поле противоположное по направлению внешнему магнитному полю. К данной группе относятся вода, водород, кварц, стекло, цинк, серебро, золото, медь и др.

Парамагнетики – материалы, обладающие магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$. Парамагнетики незначительно усиливают действующее на них внешнее магнитное поле. К данной группе относятся алюминий, вольфрам, платина, многие газы и др.

Такое поведение диамагнетиков и парамагнетиков объясняется различиями в ориентации под действием внешнего магнитного поля элементарных токов атомов вещества.

Ферромагнетики – материалы, обладающие магнитной проницаемостью $\mu_r \gg 1$, причем величина μ_r в большой степени зависит от напряженности магнитного поля. Так, например, в слабых полях магнитная проницаемость μ_r железа доходит до 6000, а в сильных полях значение μ_r падает до нескольких сотен. Ферромагнетики значительно усиливают действующее на них внешнее магнитное поле. К данной группе относятся железо, никель, кобальт и их сплавы.

Такое поведение ферромагнетиков объясняется дополнительной однонаправленной ориентацией намагниченных областей материала – доменов под действием внешнего магнитного поля. При этом внутри материала под влиянием внешнего магнитного поля зачастую создается магнитное поле более сильное, чем внешнее.

В электромеханических преобразователях наибольшее применение нашли ферромагнитные вещества. Магнитное состояние ферромагнитного материала характеризуется кривой намагничивания $B = f(H)$. Эта зависимость устанавливается опытным путем. Основная, или начальная, кривая намагниченности получается при постепенном намагничивании в одном направлении ненамагниченного вещества. Процесс намагничивания ферромагнитного сердечника, помещенного в катушку (рис. 1.2), осуществляется следующим образом.

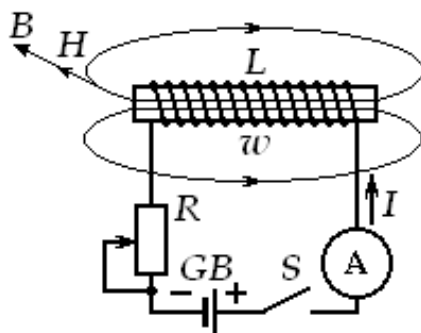


Рис. 1.2. Схема установки для снятия кривой намагничивания $B = f(H)$

Первоначально сердечник катушки не намагничен. При подаче на катушку L тока вокруг витков w возникает магнитное поле с напряженностью H и сердечник намагничивается. При увеличении тока напряженность H увеличивается, соответственно увеличиваются магнитная проницаемость μ_a и индукция B (рис. 1.3).

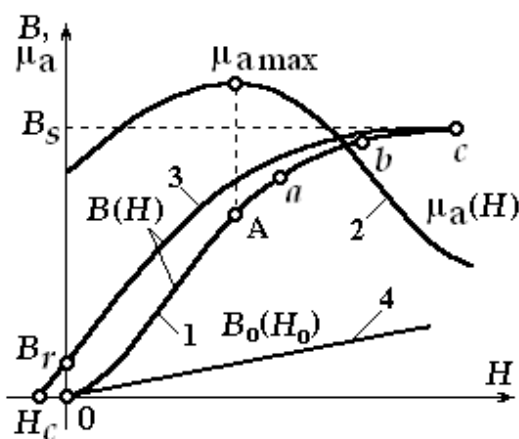


Рис. 1.3. Кривые первоначального намагничивания и магнитной проницаемости

Кривая 1 — кривая первоначального намагничивания. Эту кривую можно разбить на участки: $0a$ — участок интенсивного намагничивания, ab — участок перегиба кривой (колени), bc — участок магнитного насыщения материала. При относительно небольших напряженностях, когда материал еще

не насыщен (участок $0a$), увеличение H сопровождается значительным увеличением B и магнитной проницаемости μ_a . Максимальному значению магнитной проницаемости соответствует точка A , которая может быть получена, если через начало координат провести касательную к кривой 1.

С увеличением H на участке ab материал все более насыщается и темп роста B снижается. На участке bc увеличение напряженности приводит к малым приращениям магнитной индукции, примерно как приращение в случае катушки без ферромагнитного сердечника катушки L (прямая 4).

После достижения точки насыщения c (B_S – индукция насыщения) размагничивание сердечника при уменьшении тока I происходит по кривой 3, расположенной выше первоначальной кривой намагничивания 1. При снижении напряженности и дальнейшем ее увеличении в противоположном направлении можно выделить характерные точки: B_r – остаточная индукция, H_c – коэрцитивная сила, то есть напряженность поля, при которой индукция равна нулю.

Если периодически и весьма медленно изменять напряженность от $+H_{1m}$ до $-H_{1m}$, то после нескольких циклов перемагничивания магнитная индукция будет изменяться в пределах от $+B_{1m}$ до $-B_{1m}$ в соответствии с кривой 1 на рис. 1.4, a , называемой статической петлей магнитного гистерезиса. При разных пределах изменения напряженности получим семейство статических симметричных петель магнитного гистерезиса. Существуют некоторые напряженности $+H_m = +H_S$ и $-H_m = -H_S$, при превышении которых площадь, ограниченная петлями гистерезиса, остается постоянной. Петля гистерезиса 2 называется в этом случае предельной, а магнитная индукция B_S – индукцией технического насыщения. Значения B_r (остаточная индукция) и H_c (коэрцитивная сила) определяются по предельной петле гистерезиса.

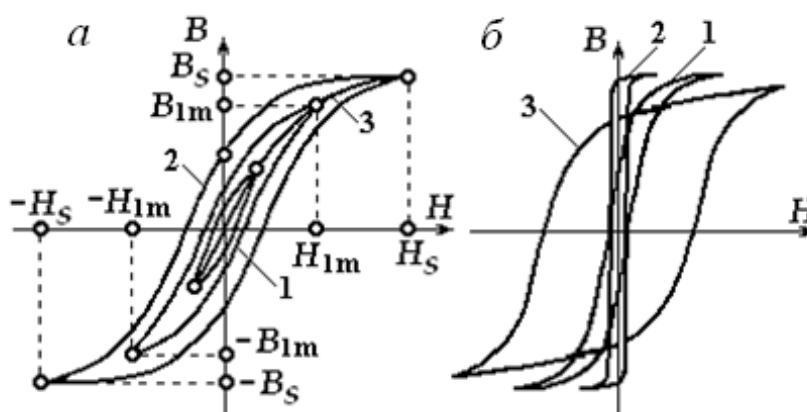


Рис. 1.4. Симметричные циклы магнитного гистерезиса и основная кривая намагничивания

Если соединить вершины статических петель гистерезиса, то получим основную кривую намагничивания 3, незначительно отличающуюся от

кривой первоначального намагничивания. Основная кривая намагничивания используется при расчете магнитных цепей. Наибольшее значение магнитной проницаемости μ_a соответствует точке касания касательной к основной кривой намагничивания.

Различают магнитно-мягкие и магнитно-твердые ферромагнитные материалы.

К *магнитно-мягким* материалам относятся чистое железо, углеродистые электротехнические стали, сплавы железа и никеля (пермаллои), магнитные ферриты, литая сталь, конструкционные стали, некоторые химические соединения железа. Магнитно-мягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса ($H_C \leq 0,8 \text{ А/м}$) (кривые 1 и 2 на рис. 1.4, б).

Часть магнитно-мягких материалов, например, электротехническая листовая сталь, имеют петлю гистерезиса, соответствующую кривой 1 на рис. 1.4, б. У них малое значение $B_r < B_s$ и постоянным током подмагничивания сердечника можно регулировать магнитный поток в широких пределах. Такие материалы применяются для создания магнитных цепей ЭМ.

Магнитно-мягкие материалы – пермаллои, имеют узкую прямоугольную петлю гистерезиса, в которой $B_r = B_s$ (кривая 2 на рис. 1.4, б), находят широкое применение в устройствах автоматики и вычислительной техники, в частности, в магнитных усилителях.

Магнитно-твердые материалы имеют широкую петлю гистерезиса (кривая 3 на рис. 1.4, б), к ним относятся сплавы железа с алюминием, хромом и вольфрамом, содержащие различные присадки. Эти материалы имеют большие значения $B_r = B_s$ и H_C до 400 кА/м и применяются в основном для изготовления постоянных магнитов.

Магнитный поток в ЭМ проводится по магнитным цепям (*магнитопроводам*), выполненным из ферромагнитных материалов, способствующих прохождению магнитных потоков. Наиболее распространенным ферромагнитным материалом является электротехническая (реже конструкционная) сталь. Магнитные потоки в ЭМ могут быть как постоянными (статическими), так и переменными (динамическими) в зависимости от конструктивного назначения участков магнитных цепей.

Участки магнитных цепей, проводящие статические магнитные потоки, выполняются, как правило, в виде монолитных стальных конструкций, обеспечивающих высокую механическую прочность. Зачастую эти конструкции проходят специальную упрочняющую операцию – *поковку*.

Участки магнитных цепей, проводящие динамические магнитные потоки, выполняют путем набора из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,25...0,5 мм, электрически изолированных друг от друга. Делается это с целью уменьшения *вихревых токов*, вызывающих потери энергии при перемагничивании (на нагрев и механическое смещение листов магнитопровода вдоль силовых линий)). При этом листы стали

ориентируют вдоль направления магнитных силовых линий. В этом случае кольцевые вихревые токи, которые формируются перпендикулярно силовым линиям, встречают значительное электрическое сопротивление в изоляции между листами, что снижает амплитуду вихревых токов.

1.3. Физические законы электромеханического преобразования энергии

Индуктивная ЭМ представляет собой *электромеханический преобразователь* энергии, который объединяет в себе электрическую и механическую системы, связь между которыми осуществляется посредством магнитного поля (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Схема электромеханического преобразователя энергии

Взаимодействие магнитного поля с электрической и механической системами проявляется, с одной стороны, в появлении ЭДС e в элементах электрической системы и, с другой стороны, в возникновении силы f_e , действующей на элементы механической системы, что и обуславливает электромеханическое преобразование энергии. Процесс такого преобразования подчиняется закону сохранения энергии: изменение энергии, поступающей в ЭМ со стороны электрической ($dW_{эл}$) и механической ($dW_{мех}$) систем, расходуется на изменение энергии магнитного поля ($dW_{мг}$) и на покрытие потерь, сопровождающих основной процесс преобразования энергии.

Если все потери в ЭМ вынести во внешние цепи, то уравнение баланса полезного преобразования энергии будет иметь вид

$$\pm dW_{эл} \mp dW_{мех} = dW_{мг}.$$

Знак «+» означает, что энергия поступает в электрическую машину из внешней системы, а знак «-» – что энергия отдается ЭМ во внешнюю систему.

Из этого уравнения следует, что процесс преобразования энергии в ЭМ сопровождается непрерывным изменением энергии магнитного поля. Причиной ее изменения является энергия, поступающая либо из электрической, либо из механической системы.

Если в переменное магнитное поле поместить проводящий контур, то в нем возникнет ЭДС $e = - d\psi/dt$, где ψ – потокосцепление контура, то есть полный магнитный поток, сцепленный с витками проводящего контура.

Это явление называется электромагнитной индукцией, а приведенное выражение представляет собой *закон электромагнитной индукции Фарадея*. Знак «минус» в формуле для ЭДС e обусловлен инерционным характером магнитного поля: наведенная ЭДС всегда направлена так, что создаваемый ею ток препятствует изменению магнитного поля вызывающего ЭДС.

Величина потокосцепления одновиткового контура (рис. 1.5) определяется потоком Φ , пронизывающим площадь S , ограниченную контуром

$$\psi = \Phi = B S = B \ell 2x,$$

где B – магнитная индукция; ℓ – длина активной части контура; x – смещение плоскости контура относительно оси магнитного поля.

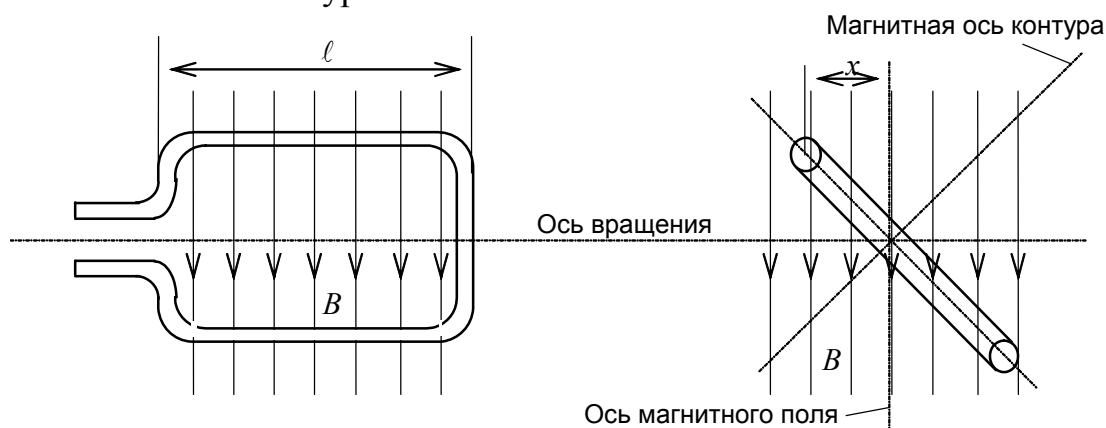


Рис. 1.5. Схема потокосцепления одновиткового контура в ЭМ

Возможны три случая изменения потокосцепления этого контура:

контур неподвижен, поток меняется во времени;

контур вращается, поток неизменен;

контур вращается и поток изменяется во времени.

Поэтому потокосцепление ψ является функцией пространственной координаты x и времени t

$$\psi = \psi(x, t).$$

Следовательно,

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx.$$

Подставляя это выражение в формулу ЭДС, получим

$$e = -\frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial x} V,$$

где $V = \frac{dx}{dt}$ – скорость пересечения контуром силовых линий поля.

Согласно полученному выражению ЭДС e можно представить в виде двух составляющих: *трансформаторной ЭДС* $e_t = -\frac{\partial \psi}{\partial t}$ и *ЭДС вращения* $e_v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} V$. С учетом выражения потокосцепления ЭДС вращения может быть записана в виде $e_v = -2 B \ell V$.

Обычно знак «—» в выражении e_v опускают, а направление ЭДС определяют *правилом правой руки*: если правую руку расположить так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а отогнутый большой палец направить в сторону перемещения проводника относительно поля, то четыре пальца покажут направление ЭДС. Наличие ЭДС вращения e_v в замкнутом контуре всегда связано с обменом энергией между механической и электрической системами. Существование лишь трансформаторной ЭДС e_t указывает на то, что обмена энергией между механической и электрической системами не происходит, а возможен обмен энергией лишь между частями электрической системы.

Если контур (см. рис. 1.5) подключить к электрической системе с напряжением u , то по нему потечет ток, величина которого, согласно закону Ома, определяется выражением

$$i = \frac{1}{R} (u + e),$$

где R – активное сопротивление контура.

Ток создает свое магнитное поле (рис. 1.6). Результирующее магнитное поле вокруг проводника искажается: с одной стороны проводника поле усиливается, а с другой – ослабляется. Это приводит к появлению силы, действующей в направлении максимального ослабления поля. Практически направление силы определяется *правилом левой руки*: силовые линии поля входят в ладонь, четыре пальца показывают направление тока, а отогнутый большой палец показывает направление силы. Поскольку в контуре (рис. 1.7) ток по отношению к внешнему полю протекает в разных направлениях, то на контур будет действовать момент

$$M_e = f_e y = f_e D \sin \alpha,$$

где D – диаметр окружности, вписанной в контур; α – угол, определяющий положение контура в магнитном поле.

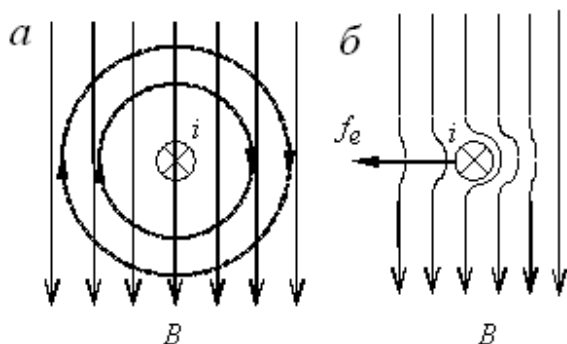


Рис. 1.6. Действие магнитного поля на проводник с током

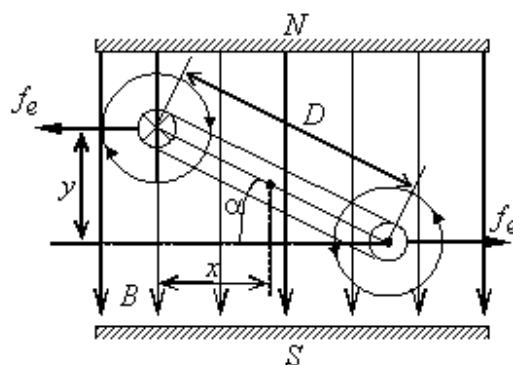


Рис. 1.7. Действие магнитного поля на контур с током

Если связать контур еще и с механической системой, то можно осуществить передачу энергии в эту систему из электрической системы или наоборот преобразовать механическую энергию в электрическую.

Без учета потерь величина изменения энергии электрической системы определяется выражением

$$dW_{\text{эл}} = u i dt = -i e dt = i d\psi.$$

Соответствующее ей изменение энергии механической системы определяется произведением силы f_e на приращение координаты

$$dW_{\text{мех}} = f_e dx.$$

Закон сохранения энергии ($\pm dW_{\text{эл}} \mp dW_{\text{мех}} = dW_{\text{мг}}$) требует, чтобы суммарное изменение энергии равнялось изменению энергии магнитного поля

$$i d\psi - f_e dx = dW_{\text{мг}}.$$

Запасенная энергия магнитного поля контура выражается формулой

$$W_{\text{мг}} = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} i \psi,$$

где $L = \psi/i$ – индуктивность контура.

Отсюда, учитывая, что ток i задан, получаем

$$dW_{\text{мг}} = \frac{1}{2} i d\psi.$$

Решая последние три выражения относительно силы f_e , находим

$$f_e = \frac{1}{2} i \frac{d\psi}{dx}.$$

Учитывая, что $\psi = \Phi = B S = B \ell 2x$ получаем

$$f_e = B \ell i.$$

Данное выражение определяет взаимодействие магнитного поля с током электрического контура, помещенного в это поле. Указанное взаимодействие проявляется в возникновении силы, действующей на контур.

Рассмотренные выше взаимодействия магнитного поля, как с электрическими системами ЭМ, так и с механическими показывает, что материальное магнитное поле является универсальным энергоносителем передающим энергию от одного вида систем в другие. При данных преобразованиях энергии в индуктивных ЭМ выделяются два важных свойства: *обратимость* работы ЭМ и *саморегулирование* параметров в ЭМ.

Свойство *обратимости* работы заключается в возможности ЭМ реализовать как прямое, так и обратное преобразование энергии, то есть одна и та же ЭМ может работать либо как электрический генератор, либо как электрический двигатель.

Следует отметить, что конструктивно ЭМ проектируются для определенной работы как генератор или как двигатель. Применение ЭМ в другом качестве, как правило, сопровождается худшими удельными показателями по сравнению с аналогичными ЭМ, используемыми по прямому назначе-

нию. Это объясняется тем, что при проектировании конструктивно закладывается максимально эффективная реализация полезного параметра (ЭДС или момента). При смене максимально полезного параметра, работа ЭМ может быть не столь эффективной.

При смене направления преобразование энергии в электромагнитной ЭМ – трансформаторе, заметного снижения эффективности преобразования не наблюдается, что объясняется односторонностью требований к электрическим параметрам как входных, так и выходных частей электрических систем трансформатора.

Свойство *саморегулирования* заключается в способности ЭМ автоматически (без внешних воздействий) изменять внутренние и внешние параметры ЭМ в случаях внешних вариаций входных или выходных показателей ЭМ. Саморегулирование параметров ЭМ объясняется действием общего закона сохранения энергии. Изменение входного или выходного показателя ЭМ автоматически приводит к вариации магнитного поля и, как следствие, к изменению выходного или входного показателя ЭМ. Наиболее часто рассматриваются процессы саморегулирования при изменениях выходных показателей ЭМ и их влияние на входные показатели.

Преобразование энергии в ЭМ объясняется взаимодействием трех физических процессов: механического, магнитного и электрического. В данных процессах часть энергии частично преобразуется в тепловую энергию, что является необратимой потерей энергии. Величину данных потерь характеризуют мощностью в ваттах. В соответствии с физикой преобразования энергии различают следующие виды необратимых потерь.

Механические потери, которые обусловлены силами трения, а также затратами энергии на вентиляцию ЭМ. Данные потери зависят только от частоты вращения деталей ЭМ и не зависят от величины нагрузки.

Магнитные потери, которые обусловлены перемагничиванием – циклическим, пульсирующим или вращательным – отдельных частей магнитопровода и включают в себя потери на гистерезис и на вихревые токи. Величина магнитных потерь зависит от индукции и частоты перемагничивания магнитного потока. Численное значение этих потерь определяется качеством стали магнитопровода, толщиной его листов и способом их шихтовки. Эти потери слабо зависят от нагрузки ЭМ, так как обычно при нагрузке ЭМ магнитный поток в ней изменяется незначительно.

Электрические потери, которые обусловлены тепловыми потерями от токов, протекающих в токопроводах (обмотках). Они пропорциональны квадрату тока в обмотках и поэтому существенно зависят от нагрузки, то есть от токов в обмотках ЭМ.

Представленные три вида потерь зачастую называются *основными потерями* в ЭМ.

Раздел 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Лекция 2. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

1. Назначение и области применения трансформаторов.
2. Принцип действия и устройство однофазного трансформатора.

1. Назначение и области применения трансформаторов

Промышленные центры потребления электроэнергии, как правило, удалены на десятки, сотни и даже тысячи километров от электростанций, сооружаемых в местах, богатых природными энергоресурсами. Для передачи выработанной электроэнергии используются проводные линии.

Полная электрическая мощность S , передаваемая по проводам, равна

$$S = I \cdot U,$$

где I – линейный ток, U – линейное напряжение.

При протекании линейного тока I в проводах происходят необратимые потери электроэнергии $P_{\text{л}}$ (нагрев проводов линии), равные

$$P_{\text{л}} = I^2 \cdot R_{\text{л}},$$

где $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление проводов.

Следовательно, для снижения потерь в линиях передач целесообразно применять небольшие линейные токи, что при сохранении величины передаваемой мощности ведет к необходимости повышать линейные напряжения. Однако получение высоких напряжений непосредственно от генераторов электроэнергии представляет собой весьма сложную техническую задачу.

В настоящее время конструктивно осуществимы с высокой степенью надежности генераторы переменного тока с выходным напряжением до нескольких десятков киловольт, хотя при этом линии электропередач позволяют использовать напряжения до нескольких сотен киловольт. С другой стороны, потребители электроэнергии в большинстве имеют рабочие напряжения до 380...500 В. Поэтому в электроэнергетике нашли широкое применение устройства – трансформаторы, повышающие или понижающие электрический ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформатором называется статическое (без движущихся частей) электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктив-

но связанных обмоток, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения без изменения частоты.

Приоритет в изобретении трансформатора принадлежит выдающемуся русскому ученому П.Н. Яблочкову. В 1876 г. он впервые применил трансформатор (названный индукционной катушкой) для питания переменным током изобретенных им электрических свечей. В 1882 г. И.П. Усагин показал возможность применения трансформатора для передачи электроэнергии на дальние расстояния. В 1885 г. венгерские инженеры-электротехники Б. Блати, Дери, Циперовский сконструировали трансформатор, пригодный для технической эксплуатации. М.О. Доливо-Добровольским в 1891 г. был разработан трехфазный трансформатор.

В настоящее время трансформаторы имеют широкое распространение в электроэнергетике. Существует множество разнообразных типов трансформаторов, среди которых выделяют следующие: *силовые трансформаторы* – для передачи и распределения электроэнергии; *силовые трансформаторы специального назначения* – для питания печей, сварочных аппаратов и выпрямительных установок; *автотрансформаторы* – для преобразования напряжения сети в небольших пределах; *измерительные* – для включения в схемы измерительных приборов; *испытательные* – для производственных испытаний под высоким напряжением; *индукционные регуляторы* – для плавного регулирования напряжения.

Трансформаторы различаются по числу питающих фаз – на однофазные и трехфазные; а также по способу охлаждения – на сухие и жидкостные. Частота переменного тока, используемая в трансформаторах, равна 50 Гц.

Трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети или системы. Передача электрической энергии на большие расстояния от места её производства до места потребления требует в современных системах не менее четырех- пяти-кратной трансформации напряжения. С этой целью в сетях энергосистем и энергопотребителей применяются силовые повышающие и понижающие трансформаторы. Суммарная установленная мощность трансформаторов в несколько раз превышает установленную мощность генераторов (по некоторым данным в около пяти раз).

Современная электромашиностроительная промышленность выпускает двух- и трехобмоточные трансформаторы мощностью от долей ВА до 1000 МВА, с номинальным напряжением на стороне высокого напряжения (ВН) 6, 10, 35, 110, 220, 330, 400, 500, 750, 1150 кВ.

Условные графические обозначения трансформаторов показаны на рис.2.1.

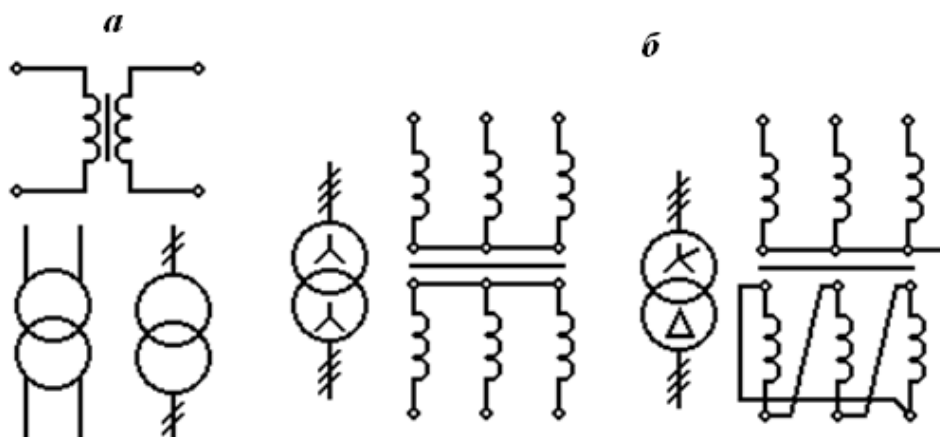


Рис. 2.1. Условные обозначения трансформаторов:
 a – однофазного; b – трехфазного

2. Принцип действия и устройство однофазного трансформатора

2.1. Принцип действия трансформатора

Принцип действия трансформатора показан на примере однофазного трансформатора (рис. 2.2). Электромагнитная система трансформатора состоит из двух отдельных обмоток, первичной и вторичной, размещённых на замкнутом магнитопроводе, выполненного из магнитомягкого ферромагнитного материала. Применение такого магнитопровода позволяет усиливать электромагнитную связь между обмотками за счет малого магнитного сопротивления контура, по которому проходит магнитный поток.

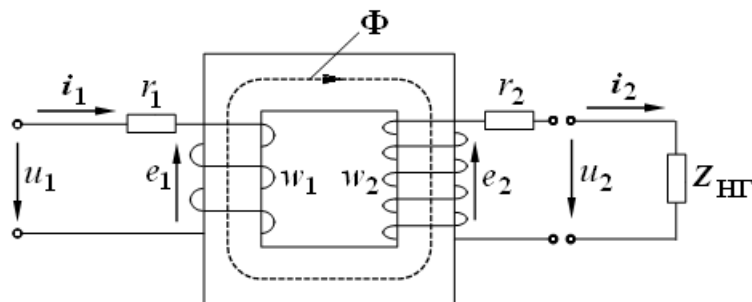


Рис.2.2. Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора

Ток i_1 первичной обмотки трансформатора, формируемый источником переменного тока с напряжением u_1 , создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ , индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС (электродвижущие силы) e_1 и e_2 , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$:

$$e_1 = - w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = - w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношения действующих и мгновенных ЭДС в обмотках определяются выражением

$$E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2.$$

При работе трансформатора в режимах, в которых токи обмоток значительно не превышают номинальные токи, падение напряжений в обмотках составляют не более 3...5 % от номинальных напряжений. Следовательно, если считать, что $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то можно получить

$$U_1/U_2 \approx w_1/w_2.$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить U_2 , то число витков w_2 делают больше w_1 и такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить U_1 , то число витков w_2 делают меньшим w_1 и такой трансформатор называют *понижающим*.

Отношение ЭДС $E_{ВН}$ обмотки высшего напряжения к $E_{НН}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*:

$$k_{\text{ТР}} = E_{ВН}/E_{НН} = w_{ВН}/w_{НН}.$$

В трансформаторе преобразуются как напряжения, так и токи, при примерно постоянной мощности в первичной и вторичной обмотках. Так как мощности первичной и вторичной обмоток различаются незначительно (на величину малых внутренних потерь энергии), то, для понижающего трансформатора можно записать:

$$U_1/U_2 \approx I_2/I_1 \approx w_1/w_2 = k_{\text{ТР}}.$$

Таким образом, применение трансформаторов может быть следующим:

трансформатор напряжения $U_2 \approx U_1/k_{\text{ТР}}$, трансформация в котором осуществляется при параллельном подключении первичной обмотки w_1 к источнику напряжения U_1 ;

трансформатор тока $I_2 \approx I_1 \cdot k_{\text{ТР}}$, трансформация в котором осуществляется при последовательном подключении первичной обмотки w_1 к источнику тока I_1 ;

трансформатор согласования сопротивлений $R_1 \approx R_2 \cdot k_{\text{ТР}}^2$, где R_1 – требуемое оптимальное сопротивление нагрузки для источника энергии, R_2 – имеющееся эксплуатационное сопротивление нагрузки для источника энергии, согласование сопротивлений осуществляется при последовательном подключении первичной обмотки w_1 к источнику энергии.

Основное распространение получили трансформаторы напряжений, как понижающие, так и повышающие, в качестве силовых трансформаторов. Трансформаторы тока и согласования применяют в измерительной технике, в слаботочных цепях радиотехники и системах управления, а также, в специализированных технологических установках.

2.2. Устройство однофазного трансформатора

Конструктивная схема трансформатора состоит из основных четырех элементов:

- замкнутой магнитной системы из листовой электротехнической стали;
- электрической системы в виде двух или нескольких обмоток, охватывающих магнитную систему и изолированных относительно нее (концы обмоток присоединены к выводным изоляторам);

- охлаждающей системы – воздушной, масляной, водяной или комбинированной, служащей для отведения тепла, возникающего вследствие потерь энергии в магнитной системе и обмотках;

- механической системы, обеспечивающей механическую прочность всей конструкции трансформатора и возможность его перемещения.

Конструктивное выполнение трансформатора определяется в значительной мере способом его охлаждения, который зависит от его номинальной мощности. При увеличении мощности трансформатора необходимо увеличивать и интенсивность его охлаждения. В силовых трансформаторах для отвода теплоты от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воздушное (сухое), масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика.

При воздушном охлаждении трансформатор имеет непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому охлаждение происходит путем конвекции воздуха и излучения. Для повышения интенсивности охлаждения зачастую применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вентилятора. Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений.

При масляном охлаждении магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный минеральным (трансформаторным) маслом, которое обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит теплоту от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую поверхность охлаждения, чем трансформатор. Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает повышение электрической изоляции обмоток, предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий.

Примеры исполнения трехфазных сухого и масляного трансформаторов показаны на рис.2.3 и рис.2.4.

Следует отметить, что воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Из-за меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах меньше, чем в масляных, что приводит к увеличению сечений проводов обмотки и магнитопровода. Поэтому масса актив-

ных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных. В эксплуатации сухие трансформаторы удобнее масляных, так как исключают необходимость периодической очистки и смены масла.



Рис.2.3. Пример исполнения сухого трансформатора

При охлаждении посредством негорючего жидкого диэлектрика трансформатор помещают в герметизированный бак, заполненный синтетическим изоляционным материалом, например соавтолом, свойства которого по электроизоляции и теплопроводности близки к трансформаторному маслу.



Рис.2.4. Пример исполнения масляного трансформатора

По конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяются на *стержневые* и *броневые* (рис. 2.5).

В стержневых трансформаторах однофазные обмотки располагаются на двух *стержнях* и соединяются последовательно или параллельно. Стержнем называется та часть магнитопровода, на которой размещаются обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют *ярмом*. Трансформаторы броневой конструкции имеют разветвлённую магнитную систему, которая частично закрывает обмотки, как бы закрывая их броней. Магнитный поток в стержне броневых трансформатора вдвое больше, чем в ярмах, поэтому последние могут иметь вдвое меньшее сечение.

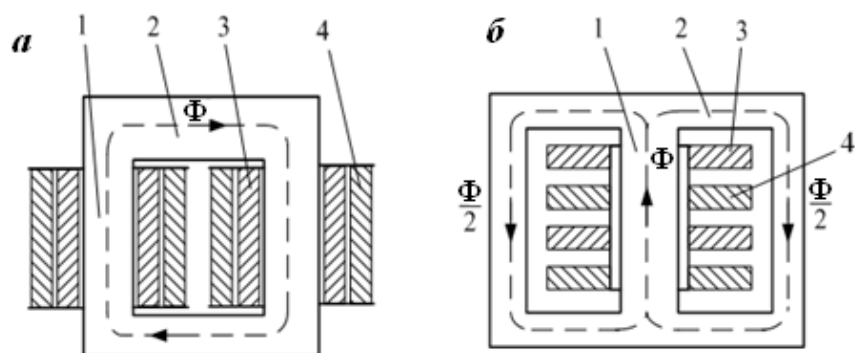


Рис. 2.5. Устройство однофазного трансформатора:
 а – стержневого; б – броневого;
 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – обмотка низшего напряжения (НН);
 4 – обмотка высшего напряжения (ВН)

Однофазные броневые трансформаторы изготавливают, как правило, небольшой мощности. Силовых трансформаторов броневого типа отечественная промышленность не выпускает.

Основное преимущество трансформаторов стержневого типа – цилиндрическая форма обмоток, более простых и технологичных, чем дисковые чередующиеся обмотки броневых трансформаторов.

Магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из листов холоднокатанной электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм марок (старое обозначение Э413 и Э414) 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, реже 1511, 1512, 1513 или 3411, 3412 и 3413. Для обеспечения изоляции листы стали с одной стороны оклеивают изоляционной бумагой толщиной 0,03 мм или с обеих покрывают изоляционным масляным лаком.

Одним из способов улучшения показателей работы трансформатора является использование анизотропной электротехнической стали с ребровой структурой (марки 3411-3416) с содержанием кремния 2,8...3,8%. Магнитные свойства этой стали резко улучшаются при совпадении направлений магнитного потока и прокатки: потери в стали на перемагничивание уменьшаются в 2...3 раза, а магнитная проницаемость и индукция насыщения возрастают. Однако использование холоднокатаной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек направления прокатки или уменьшить длину таких участков.

Индукция в стержнях трансформаторов мощностью 5 кВ·А и выше находится в пределах 1,2...1,45 Тл для горячекатаных сталей и 1,5...1,7 Тл для холоднокатаных сталей – в масляных трансформаторах и 1,0...1,2 Тл и 1,1...1,5 Тл – в сухих трансформаторах.

По способу сочленения стержней с ярмами различают трансформаторы со *стыковыми* и *шихтованными* магнитопроводами (рис.2.6).

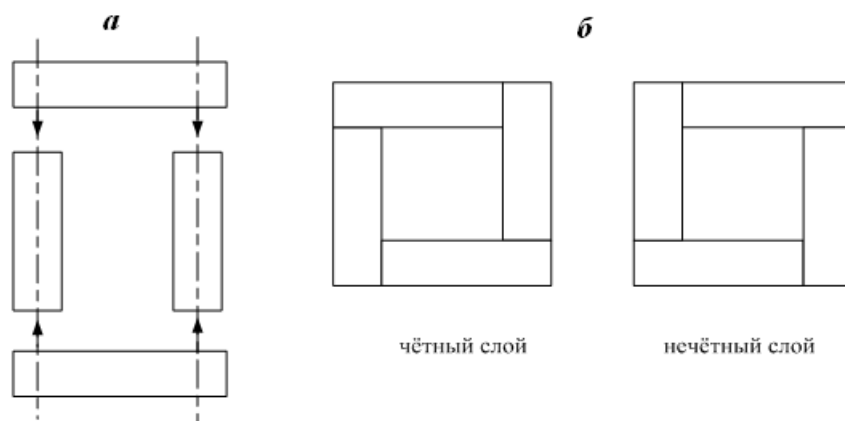


Рис. 2.6. Сочленения стержней с ярами в магнитопроводах трансформаторов: *а* – стыковое; *б* – шихтованное в переплёт

В стыковом магнитопроводе стержни и яра собирают отдельно и соединяют друг с другом с помощью системы вертикальных стяжных шпилек, а в места стыков во избежание замыкания листов и возникновения значительных вихревых токов ставят изоляционные прокладки. Обмотки трансформатора размещают на стержнях перед их соединением с ярами. Крепления в стыковом магнитопроводе весьма сложны и массивны, так как яра необходимо плотно скреплять со стержнями.

В шихтованном магнитопроводе стержни и яра собирают вместе как цельную конструкцию, причем листы стержней и ярем отдельных слоев собирают в переплет, при котором четные и нечетные слои чередуются таким образом, что места стыков одного слоя перекрываются сплошными листами другого слоя. После сборки магнитопровода листы верхнего яра вынимают, на стержнях размещают обмотки и листы снова зашихтовывают. Шихтованный в переплёт магнитопровод имеет весьма жёсткую конструкцию.

Наличие изоляционных прокладок в стыковых магнитопроводах увеличивает магнитное сопротивление потоку, что ведет к росту тока первичной обмотки трансформатора, поэтому стыковые магнитопроводы применяют редко. В мощных силовых трансформаторах используют шихтованный в переплёт способ сочленения. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми, так как они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

Поперечное сечение стержней магнитопровода у мощных силовых трансформаторов ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (рис. 2.7). Такая форма обеспечивает получение требуемого поперечного сечения стержня при минимальном диаметре. Чем больше ступеней, тем ближе поперечное сечение к окружности, тем больше активное сечение стержня при данном диаметре.

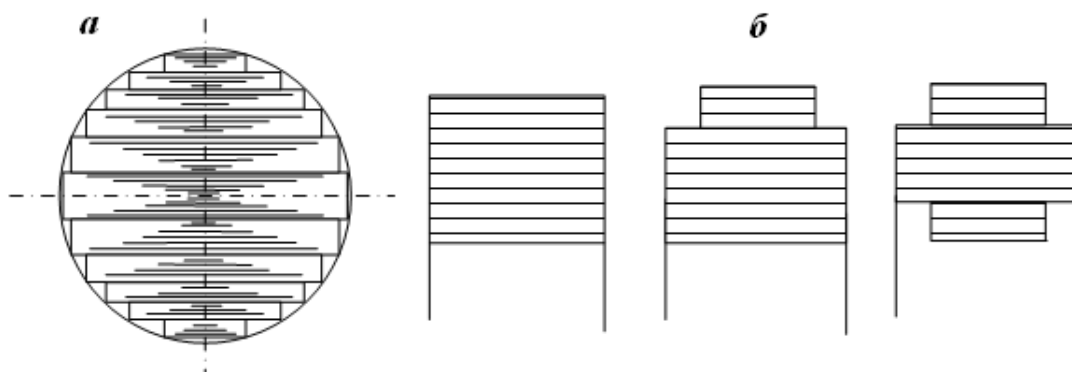


Рис. 2.7. Поперечное сечение элементов магнитопроводов:
а – стержень; б – ярмо

Ярма, соединяющие стержни, в сечении обычно прямоугольные или ступенчатые. В современных трансформаторах сечение ярма обычно повторяет форму сечения стержней (см. рис. 2.7, б). Площадь сечения ярма выбирают обычно на 2...5 % больше, чем сечение стержней. Это уменьшает индукцию в стали ярма и потери мощности в ней на 10...15 %.

Обмотки трансформаторов должны обладать механической и электрической прочностью, технологичностью, нагревостойкостью и экономичностью. Основными величинами, определяющими параметры обмоток трансформатора, являются номинальные значения тока и напряжения. Обмотки выполняются из медного или алюминиевого провода круглого ($S = 0,02 \dots 10 \text{ мм}^2$) или прямоугольного ($S = 6 \dots 60 \text{ мм}^2$) сечения. Удельное электрическое сопротивление меди равно 0,017, а алюминия 0,028 Ом·мм²/м, разница сопротивлений составляет 1,64 раза.

Плотность тока в медных обмотках трансформаторов с масляным охлаждением находится в пределах $j = 2,5 \dots 4,5 \text{ А/мм}^2$, а в сухих $j = 1,8 \dots 2,5 \text{ А/мм}^2$. В алюминиевых обмотках плотность тока на 40% меньше. Поэтому поперечное сечение обмотки из алюминия будет больше, чем из меди, при одной величине тока, а, следовательно, габариты и масса трансформатора с алюминиевыми обмотками больше, чем с медными.

В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе к друг другу. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки (см. рис. 2.5) либо концентрически – одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называются *концентрическими*, во втором – *чередующимися*, которые имеют меньшее магнитное рассеяние, однако изоляции их сложнее. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержню располагают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи обмотку ВН.

Различают следующие виды обмоток трансформаторов:

цилиндрические одно-двухслойные обмотки, выполненные из провода прямоугольного сечения (рис.2.8, а);

цилиндрические многослойные обмотки, выполненные из провода круглого или прямоугольного сечения (рис. 2.8, б). Применяют в качестве обмотки ВН или НН, просты в производстве, но механическая прочность невелика. Применяют при мощности на один стержень до 200 кВ·А;

катушечные многослойные обмотки, состоящие из ряда последовательно-соединённых катушек, намотанных из круглого провода (рис. 2.8, в). Используют в качестве обмотки ВН при напряжении до 35 кВ, при мощности на один стержень до 350 кВ·А;

винтовые обмотки (рис. 2.8, г), выполненные из нескольких прямоугольных проводников, которые укладываются по винтовой линии, при этом обладают достаточной механической прочностью. Для равномерного распределения тока между параллельными проводниками используется *транспозиция* проводников, то есть перекладка проводников относительно стержня. Используют как обмотку НН при токах свыше 300 А и напряжениях от 230 В до 15 кВ, при мощности на один стержень от 45 до 350 кВ·А;

непрерывные катушечные обмотки, широко используемые в качестве обмоток ВН и НН, так как имеют большую механическую прочность и надёжность. Изготавливается обмотка из нескольких десятков дисковых катушек, намотанных по спирали и соединённых без пайки.

В трансформаторах изоляцию обмоток подразделяют на *главную* – изоляцию их от магнитопровода и между собой (обмоток ВН от НН) и *продольную* – изоляцию между витками, слоями и катушками каждой обмотки.

Главную изоляцию обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга обеспечивают изоляционными промежутками. Между обмотками ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона. Изоляционное расстояние обмоток от ярма обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. В трансформаторах с напряжением 110 кВ и выше для выравнивания электрических полей у краев обмоток используют электрические экраны в виде экранирующих витков и емкостных колец.

Продольную изоляцию между катушками слоями и витками обеспечивают радиальными масляными каналами, простыми и угловыми шайбами из электроизоляционного картона. В качестве межслойной изоляции обычно применяют несколько слоев кабельной бумаги, электроизоляционный картон или лакоткань. Изоляцию между витками обеспечивают в основном собственной изоляцией обмоточного провода.

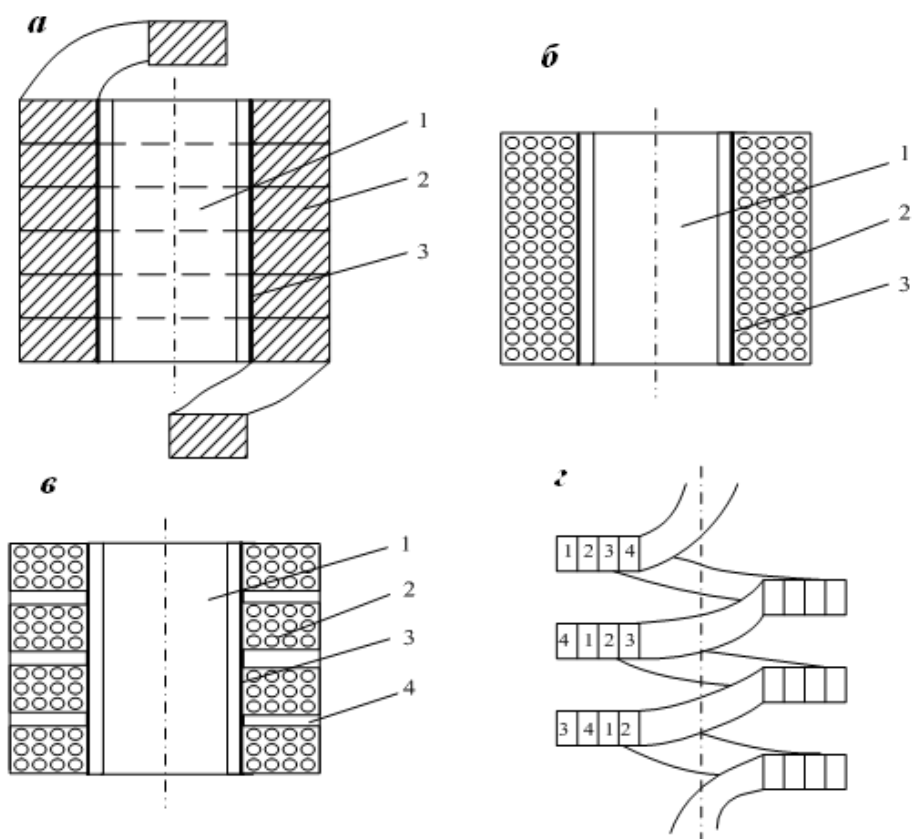


Рис. 2.8. Обмотки трансформаторов:

- а* – цилиндрическая однослойная; *б* – цилиндрическая многослойная;
в – катушечная многослойная; *г* – винтовая;
 1 – стержень; 2 – обмотка; 3 – изоляционный цилиндр;
 4 – радиальный вентиляционный канал

В трансформаторах с воздушным охлаждением изоляцию обеспечивают изоляционными пленками и пропиточными лаками. Высокая стоимость изоляционных материалов и трудоемкость выполнения изоляции повышают общую стоимость сухих трансформаторов по сравнению с масляными.

Для вывода наружу концов от обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют *вводом*.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность, а вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами, число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора. При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор листьев и т.п.

При эксплуатации трансформаторов наблюдаются колебания вторичного напряжения трансформаторов, обусловленные колебаниями нагрузок потребителей и колебаний напряжений в питающей сети. Поэтому стандартные трансформаторы оборудуются системами регулирования напряжения, которые позволяют изменять в небольших пределах число витков одной из обмоток. Изменение числа витков осуществляется с помощью переключающего устройства, управление которым выведено на крышку или стенку бака трансформатора. Конструкция переключающего устройства определяется его возможностью проводить переключения при условии отсутствия напряжения на обмотках или под напряжением и нагрузкой трансформатора.

Увеличение частоты тока, используемого в трансформаторах, ведет с одной стороны к возможности уменьшения массы и габаритов магнитопроводов, а с другой стороны к необходимости улучшения магнитных свойств материалов и конструкций магнитопроводов, что является весьма затратным. Поэтому трансформаторы с повышенной частотой, например, 400 Гц используются в случаях, когда уменьшение массы и габаритов более выгодно, по сравнению с затратами при использовании материалов магнитопроводов с улучшенными свойствами, например, в космической и воздушной технике.

Силовые трансформаторы имеют значительные габаритные и весовые показатели, например, трансформаторы мощностью 200...300 кВА имеют вес около 1 кг на 1 кВА мощности.

Наряду с силовыми трансформаторами в электроэнергетике широко используются *измерительные трансформаторы тока и напряжения*.

Трансформаторы тока позволяют обеспечить питание цепей релейной защиты и измерения произвольной величины тока типовыми приборами с номинальными токами 1...5 А. Первичный ток находится в пределах 5...24 000 А при напряжении измеряемой сети 0,4...24 кВ. Также выпускаются трансформаторы тока на напряжение 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ.

Трансформаторы напряжения используются в цепях переменного тока напряжением 0,4...1150 кВ для питания измерительных приборов и цепей релейной защиты. Трансформаторы напряжения выпускаются как в сухом, так и в масляном исполнении. Трансформаторы напряжения до 35 кВ включительно, используются в сетях с изолированной нейтралью.

Лекция 3. РЕЖИМЫ ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

1. Режим холостого хода однофазного трансформатора.
2. Работа однофазного трансформатора при нагрузке.
3. Приведение параметров трансформатора при электромагнитных расчетах.
4. Схема замещения трансформатора.

1. Режим холостого хода однофазного трансформатора

Работу трансформатора во всем диапазоне электрических нагрузок, можно характеризовать тремя режимами:

- холостого хода (предельный режим);
- номинальной нагрузки;
- короткого замыкания (предельный режим).

1.1. Режим холостого хода однофазного идеализированного трансформатора

Идеализированным будем считать трансформатор, в котором нет магнитных полей рассеивания, то есть весь магнитный поток располагается в магнитопроводе, и нет внутренних потерь мощности, как электрических, так и магнитных (см. рис. 2.2 в лекции № 2). Параметры трансформатора при холостом ходе будем выделять нижним показателем «0».

При холостом ходе трансформатора его первичная обмотка включается в сеть синусоидального напряжения $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, а вторичная обмотка разомкнута. Напряжение сети формирует в первичной обмотке ток i_0 , который создает магнитный поток Φ , индуцирующий в обмотках ЭДС e_1 и e_2 . Зачастую ток i_0 называется намагничивающим.

Применяя к первичной обмотке трансформатора второй закон Кирхгофа, и учитывая, что в идеализированном трансформаторе $r_1 = 0$, получаем

$$u_1 \approx -e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отсюда получаем выражение для потока:

$$\Phi = \frac{1}{w_1} \int u_1 dt = -\frac{U_{1m}}{w_1} \cos \omega t + A = \frac{U_1 \sqrt{2}}{2\pi f w_1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + A.$$

Постоянная интегрирования A равна некоторому постоянному магнитному потоку, которого нет в магнитопроводах аппаратов переменного тока в установившемся режиме работы. Следовательно, постоянная $A = 0$ и магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$, где $\Phi_m = U_1 / 4,44 f w$, то есть при синусо-

соидальном напряжении u_1 магнитный поток в магнитопроводе также имеет синусоидальный характер изменения во времени, но отстает по фазе на 90° . Амплитуда потока $\Phi_m = U_{1m}/(\omega_1 \omega)$, не зависит от свойств ферромагнитного материала, а определяется амплитудой приложенного напряжения, частотой сети и числом витков.

Так как мгновенные значения напряжения источника энергии u_1 и наведенной ЭДС e_1 в первичной обмотке идеализированного трансформатора находятся в любой момент времени в равновесии, то равны и их действующие значения U_1 и E_1 . Поэтому, используя предыдущие выражения, можно записать, что $E_1 = 4,44 f \omega \Phi_m$. Указанное соотношение применяют для расчетов ЭДС, индуцируемых в обмотках трансформаторов; поэтому его часто называют уравнением *трансформаторной ЭДС*.

С другой стороны следует учесть, что форма потока Φ определяется формой тока намагничивания i_0 в соответствии с петлей гистерезиса материала магнитопровода $\Phi = f(i_0)$, которая подобна кривой намагничивания $B(H)$ и изображается петлей, близкой к гистерезисной, но с несколько закругленными углами из-за влияния вихревых токов (рис. 3.1, а).

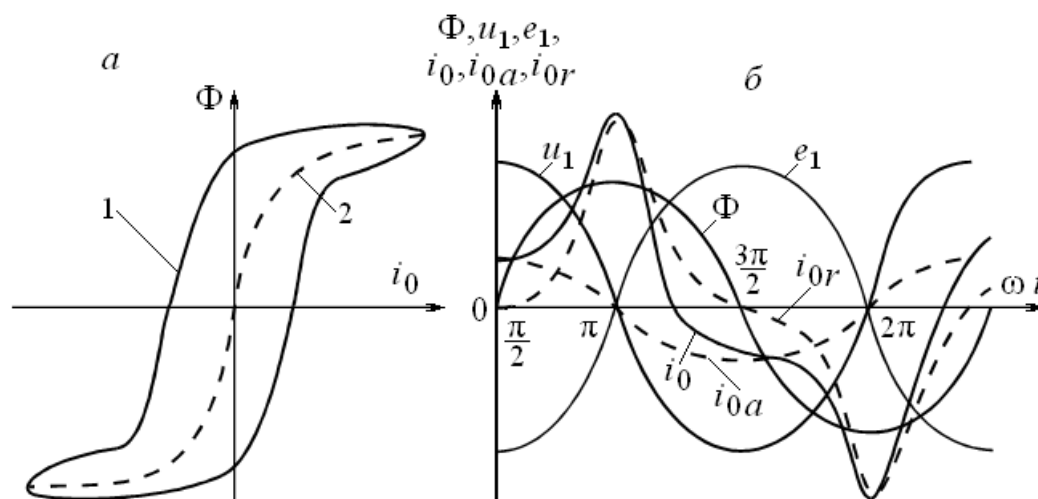


Рис.3.1. Изменения параметров трансформатора при действии синусоидального напряжения:

а – петля гистерезиса материала магнитопровода;

б – изменения параметров трансформатора

Нетрудно видеть, что из-за нелинейности характеристики $\Phi = f(i_0)$, что объясняется насыщением магнитопровода, синусоидальный поток Φ возбуждается несинусоидальным током i_0 (рис. 3.1, б). Для удобства проведения анализа полный ток намагничивания разделяют на активную и реактивную составляющие: $i_0 = i_{0a} + i_{0r}$.

Активная составляющая i_{0a} имеет синусоидальный характер, находится в противофазе с ЭДС e_1 и определяет потери в стали магнитопровода,

$p_{\text{МГ}} = -i_{0a} e_1$. В идеализированном трансформаторе активная составляющая i_{0a} принимается равной нулю.

Реактивная составляющая i_{0r} является несинусоидальной, опережает ЭДС e_1 на 90° и определяет магнитный поток в трансформаторе по основной магнитной характеристике трансформатора (пунктирная кривая 2 на рис. 3.1, а). Кривую тока i_{0r} можно разложить на гармоники (ряд Фурье). Первая гармоника такого ряда называется *основной*, а остальные – *высшими*.

Так как кривая тока i_{0r} симметрична относительно оси абсцисс (оси времени), то ряд содержит гармоники только нечетного порядка. Первая гармоника тока i_{0r} совпадает по фазе с основным потоком Φ , а из высших гармоник наиболее сильно выражена третья гармоника тока (рис.3.2), которая в трансформаторах может достигать более 30% от основной.

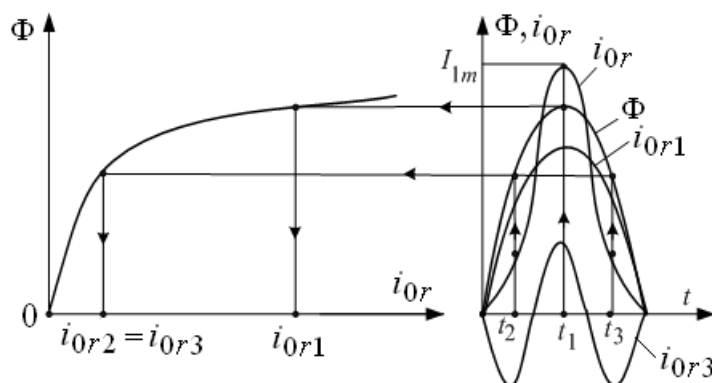


Рис. 3.2. Изменения тока холостого хода в идеализированном трансформаторе

Действующее значение тока холостого хода в идеализированном трансформаторе:

$$I_0 = \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots},$$

где I_{1m} , I_{3m} , I_{5m} – амплитуды первой, третьей и пятой гармоник тока холостого хода.

Так как ток холостого хода отстаёт от напряжения на 90° , то активная мощность, потребляемая идеальным трансформатором из сети, тоже равна нулю. Таким образом, идеальный трансформатор представляется для сети идеальной индуктивностью и потребляет из сети чисто реактивную мощность.

Векторная диаграмма идеального трансформатора представлена на рис. 3.3.

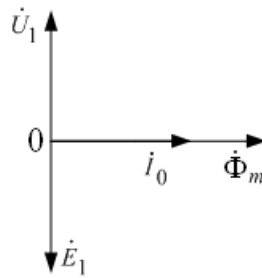


Рис. 3.3. Векторная диаграмма идеального трансформатора

1.2. Холостой ход реального трансформатора

В реальном трансформаторе существуют рассеяние, и потери в стали и в меди. Эти потери покрываются за счёт мощности P_0 , поступающей в трансформатор из сети.

$$P_0 = I_{0a} U_1,$$

где I_{0a} – действующее значение активной составляющей тока холостого хода.

Следовательно, ток холостого хода реального трансформатора состоит из двух составляющих: *намагничивающей*, создающей основной магнитный поток Φ и совпадающей с ним по фазе, и *активной* составляющей i_{0a}

$$I_0 = \sqrt{I_{0r}^2 + I_{0a}^2}.$$

Векторная диаграмма реального трансформатора представлена на рис. 3.4.

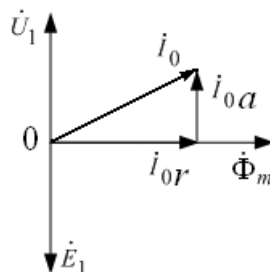


Рис. 3.4. Векторная диаграмма реального трансформатора

Обычно $I_{0a} = (3...8)\% I_0$, поэтому на величину тока холостого хода эта составляющая влияет мало, а в основном влияет на форму кривой тока и его фазу. Ток холостого хода является несинусоидальным и опережает во времени магнитный поток на угол, называемый *углом магнитного запаздывания*.

При замене действительной кривой тока холостого хода эквивалентной синусоидой, можно записать уравнения напряжений в комплексной форме, где все величины изменяются синусоидально:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}_2 = -\dot{E}_2. \end{cases}$$

Учитывая, что ЭДС рассеяния

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt},$$

и переходя к комплексной форме, путем замены $d/dt \rightarrow j\omega$, получим:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} j\omega \dot{I}_0 = -jx_1 \dot{I}_0,$$

где x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Тогда уравнения напряжений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - (-jx_1 \dot{I}_0 r_1) + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 z_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2. \end{cases}$$

где z_1 – полное сопротивление первичной обмотки.

Согласно уравнению тока I_0 и уравнениям напряжений, трансформатор можно представить в виде двух катушек. Первая – без стального сердечника, учитывающая потери в меди и рассеяние первичной обмотки $z_1 = r_1 + jx_1$, вторая – со стальным сердечником, учитывает основной поток, и потери в стали $z_m = r_m + jx_m$, и, зачастую, именуемая *намагничивающим контуром* или *намагничивающей ветвью*. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода показана на рис. 3.5.

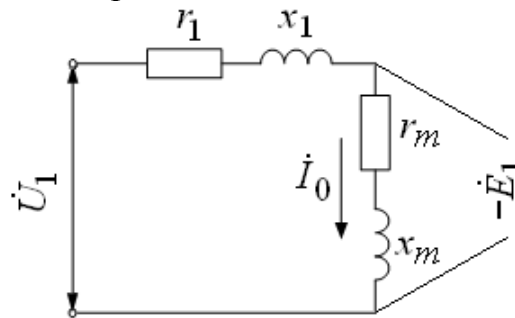


Рис. 3.5. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода показана на рис. 3.6.

2. Работа однофазного трансформатора при нагрузке

2.1. Векторная диаграмма магнитодвижущих сил (МДС) трансформатора в режиме нагрузки

Режим работы трансформатора при нагрузке характеризуется протеканием тока i_2 по вторичной обмотке и нагрузке $z_{нг}$ (рис. 3.7).

Основной магнитный поток создаётся совместным действием МДС первичной и вторичной обмоток:

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1,$$

или в комплексной форме

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1.$$

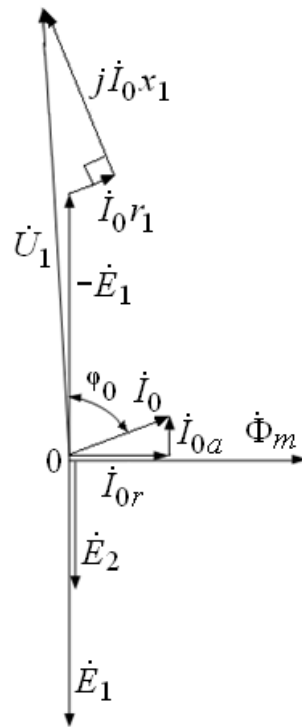


Рис. 3.6. Векторная диаграмма напряжений трансформатора в режиме холостого хода

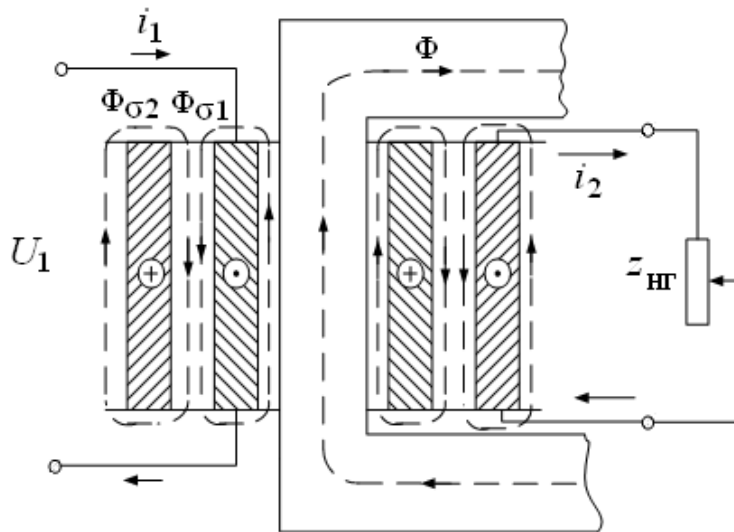


Рис. 3.7. Схема трансформатора при подключении нагрузки

При холостом ходе трансформатора в нем формируется МДС ($\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1$), создающая поток с амплитудой Φ_m , который наводит ЭДС E_1 . Так как $E_1 \equiv \Phi_m$, и $E_1 \approx U_1$, то $U_1 \equiv \Phi_m$. Следовательно, если $U_1 = \text{const}$, то при изменении нагрузки трансформатора от нуля до номинальной, результирующая МДС должна оставаться постоянной.

При нагрузке по вторичной обмотке протекает ток \dot{I}_2 , создающий МДС $\dot{I}_2 w_2$. Воздействие МДС $\dot{I}_2 w_2$ на основной магнитный поток можно объяс-

нить с помощью правила Ленца. В соответствии с этим правилом, наведённая в обмотке ЭДС e_2 создаёт в обмотке такой ток i_2 , который своим магнитным действием направлен против причины, вызвавшей появление этой ЭДС.

Причиной наведения ЭДС e_2 во вторичной обмотке является основной магнитный поток Φ , следовательно, ток \dot{I}_2 создаёт МДС $\dot{I}_2 w_2$, направленную встречно потоку Φ , то есть находящуюся с ним в противофазе и стремящуюся ослабить этот поток.

Таким образом, МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$ оказывает на магнитопровод размагничивающее действие. Так как $\dot{I}_0 w_1 = \text{const}$, то первичная МДС возрастает, и в ней появляется составляющая $-\dot{I}_2 w_2$ для компенсации МДС вторичной обмотки. Векторная диаграмма МДС показана на рис. 3.8.

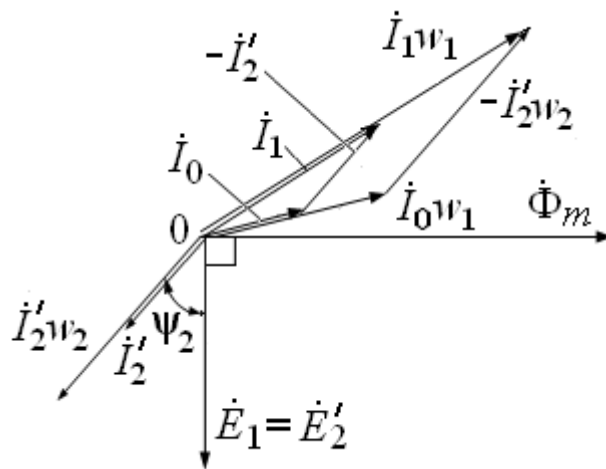


Рис. 3.8. Векторная диаграмма МДС трансформатора в режиме нагрузки

2.2. Уравнения напряжений трансформатора в режиме нагрузки

Согласно закону Кирхгофа, для первичной обмотки трансформатора можно записать уравнение:

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_1 r_1,$$

где e_1 – ЭДС первичной обмотки и $e_{\sigma 1}$ – ЭДС рассеяния:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$$

При переходе к комплексной форме получаем:

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

где ЭДС рассеяния:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} j\omega \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1.$$

Тогда получаем уравнение напряжений:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - (-jx_1 \dot{I}_1) + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1,$$

где z_1 – полное сопротивление первичной обмотки.

Во вторичной обмотке действуют ЭДС e_2 и $e_{\sigma 2}$:

$$e_2 + e_{\sigma 2} - i_2 r_2 = u_2,$$

где e_2 – ЭДС вторичной обмотки и $e_{\sigma 2}$ – ЭДС рассеяния:

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}.$$

При переходе к комплексной форме получаем:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}_2 r_2,$$

где ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} j\omega \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_2.$$

Тогда получаем уравнение напряжений:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_2 \dot{I}_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2,$$

где z_2 – полное сопротивление вторичной обмотки.

В дифференциальной форме уравнения напряжений (считаем, что магнитная проницаемость стали постоянна):

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1; \\ u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_1}{dt} - i_2 r_2. \end{cases}$$

Здесь L_1 и L_2 – полные индуктивности первичной и вторичной обмоток, соответствующие всему сцепленному с данной обмоткой потоку.

$M_{12} = M_{21} = M$ – взаимоиндуктивность первичной и вторичной обмоток.

При переходе к комплексной форме получим:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}_2 = -j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 - \dot{I}_2 r_2. \end{cases}$$

3. Приведение параметров трансформатора при электромагнитных расчетах

3.1. Приведение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки

В трансформаторах в общем случае $w_1 \neq w_2$, поэтому количественно сравнивать процессы, происходящие в первичной и вторичной обмотках затруднительно, особенно при больших коэффициентах трансформации. Поэтому обе обмотки приводят к одному и тому же числу витков. Обычно вторичную обмотку заменяют эквивалентной обмоткой с числом витков $w'_2 = w_1$, так, чтобы процесс приведения не отразился на энергетических и электромагнитных соотношениях трансформатора, и на режиме работы первичной обмотки.

Приведение вторичной обмотки к первичной обмотке осуществляется следующим образом.

Приведённая ЭДС вторичной обмотки:

$$E_2' = E_1 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k.$$

Приведённый вторичный ток найдём из условия, что электромагнитная мощность не должна измениться:

$$E_2' I_2' = E_2 I_2,$$

откуда

$$I_2' = \frac{E_2 I_2}{E_2'} = \frac{I_2}{k}.$$

Приведённое активное сопротивление вторичной обмотки найдём из условия, что электрические потери не должны измениться:

$$I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2,$$

откуда

$$r_2' = \frac{I_2^2 r_2}{I_2'^2} = r_2 k^2.$$

Приведённое индуктивное сопротивление вторичной обмотки:

$$x_2' = x_2 k^2.$$

Полное сопротивление вторичной обмотки:

$$z_2' = r_2' + jx_2' = k^2 z_2.$$

3.2. Уравнения токов и напряжений приведённого трансформатора

Уравнение МДС трансформатора равно $\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}_2 w_2$, откуда

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'.$$

Запишем уравнения напряжений приведённого трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' (r_2' + jx_2') = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2'. \end{cases}$$

3.3. Векторная диаграмма приведённого трансформатора

Примеры векторных диаграмм приведённого трансформатора для случаев активно-индуктивной ($0 < \psi_2 < \pi/2$) и активно-емкостной ($\pi/2 < \psi_2$) нагрузок показаны на рис. 3.9.

4. Схема замещения трансформатора

При анализе работы трансформаторов обычно используется электрическая схема замещения, в которой электромагнитная связь между обмотками заменяется электрической. Потенциалы точек (1) и (3), (2) и (4) одинаковые (рис. 3.10), так как для приведённого трансформатора $E_2' = E_1$, и эти точки можно объединить электрически. Полученная при этом схема называется Т-образной схемой замещения.

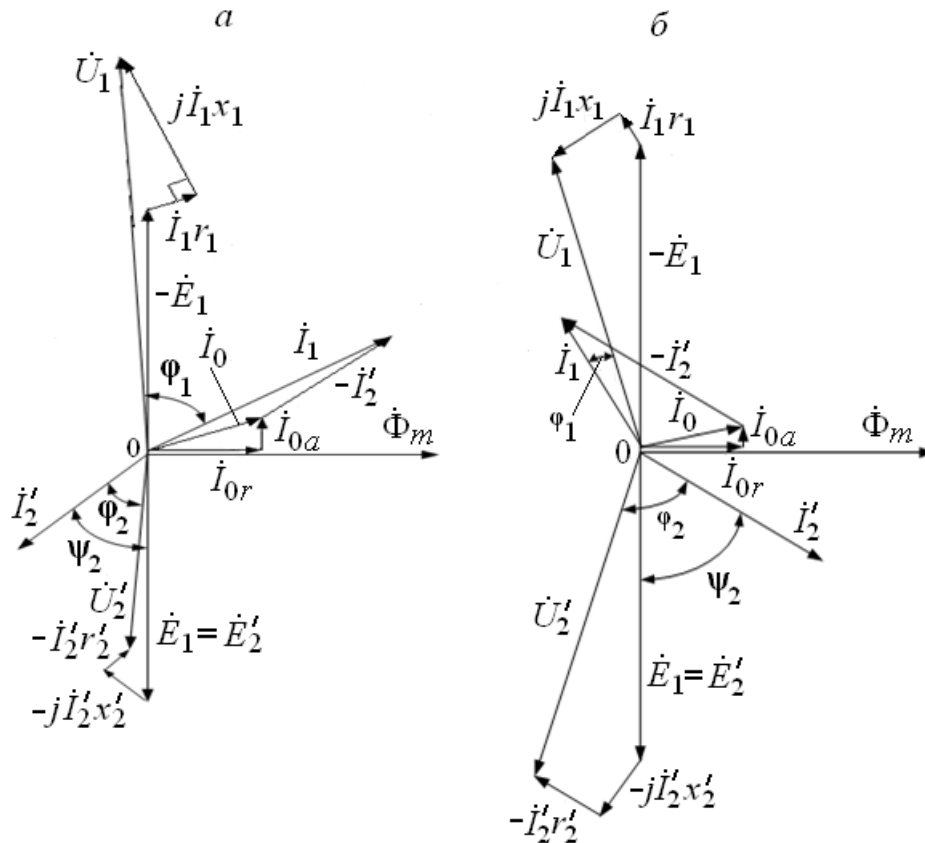


Рис. 3.9. Примеры векторных диаграмм приведённого трансформатора:
 а – при активно-индуктивной нагрузке ($0 < \psi_2 < \pi/2$);
 б – при активно-емкостной нагрузке ($\pi/2 < \psi_2$)

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$z_{\Sigma} = z_1 + \frac{1}{\frac{1}{z_m} + \frac{1}{z_2' + z_{\text{НГ}}}}.$$

В результате имеем объединённую катушку, в которой протекает ток $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$. Эта обмотка называется *намагничивающим контуром* с сопротивлением $z_m = r_m + jx_m$.

Схема замещения является не только математической моделью трансформатора, но и его физической моделью. Каждый параметр Т-образной схемы замещения имеет физический смысл:

- $r_1 \sim p_{\text{эл1}}$ – электрические потери первичной обмотки;
- $x_1 \sim \Phi_{\sigma 1}$ – поток рассеяния первичной обмотки;
- $r_2' \sim p_{\text{эл2}}$ – электрические потери вторичной обмотки;
- $x_2' \sim \Phi_{\sigma 2}$ – поток рассеяния вторичной обмотки;
- $r_m \sim p_{\text{мг}}$ – магнитные потери;
- $x_m \sim \Phi$ – основной магнитный поток.

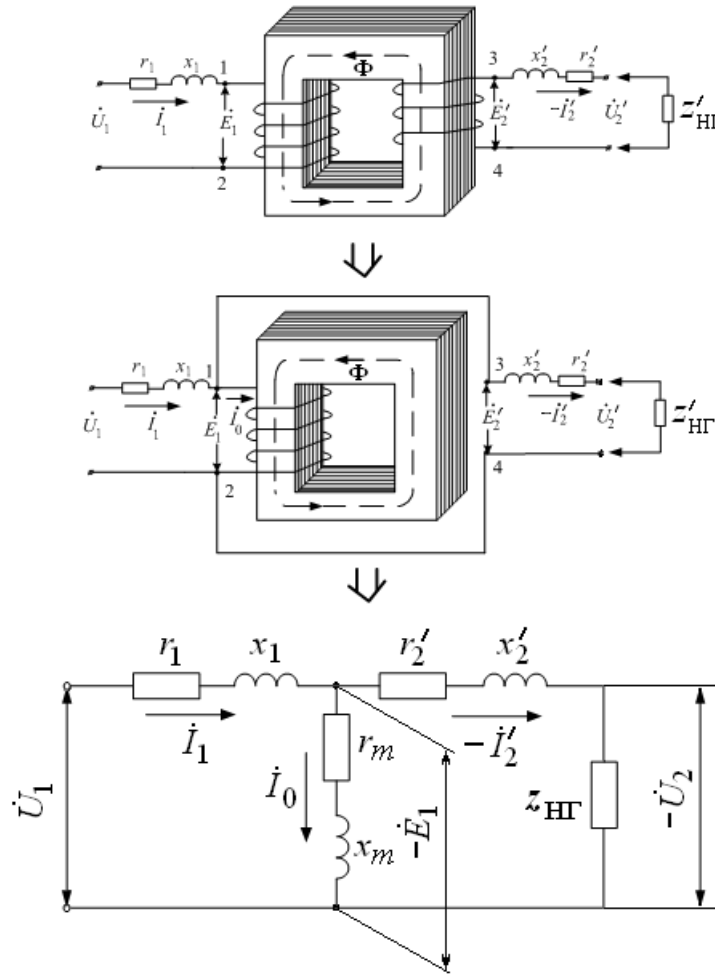


Рис. 3.10. Последовательность получения Т-образной схемы замещения трансформатора

Численные расчеты по уравнениям токов и напряжений, а также по соответствующей им схеме замещения обычно выполняют в относительных единицах. В качестве базисных величин используются следующие показатели:

$u_6 = U_{\text{1нф}}$ – действующее значение номинального фазного напряжения первичной обмотки;

$i_6 = I_{\text{1нф}}$ – действующее значение номинального фазного тока первичной обмотки;

$z_6 = u_6/i_6 = U_{\text{1нф}}/I_{\text{1нф}}$ – фазное сопротивление номинальной нагрузки.

Переход к относительным единицам (с индексами *) осуществляется путем деления величин в именованных единицах на соответствующие базисные значения.

Сопротивления трансформатора в относительных единицах имеют следующий порядок:

$$\begin{aligned} x_{\mu}^* &= 10 \dots 150 \text{ о.е.}; & x_1^* &= x_2'^* = 0,025 \dots 0,1 \text{ о.е.}; \\ r_{\mu}^* &= 0,5 \dots 5 \text{ о.е.}; & r_1^* &= r_2'^* = 0,005 \dots 0,025 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Часто пользуются упрощённой схемой замещения (рис. 3.11), так как при режимах работы трансформатора близких к номинальному, током I_0 можно пренебречь.

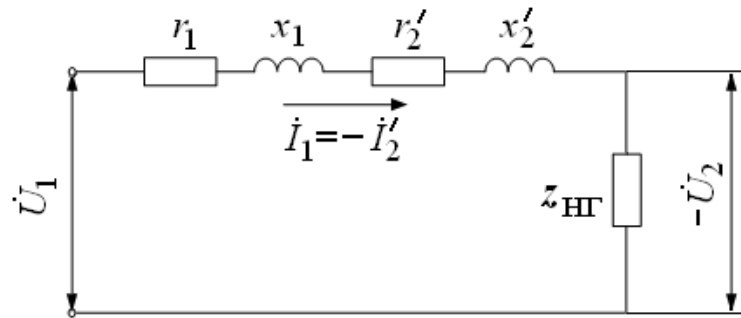


Рис. 3.11. Упрощённая схема замещения

В этом случае уравнение напряжений приобретает вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_2' r_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{U}_2' = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}_2' z_2' - \dot{U}_2'.$$

Согласно данному уравнению, можно построить примеры векторных диаграмм упрощенной схемы замещения (рис.3.12).

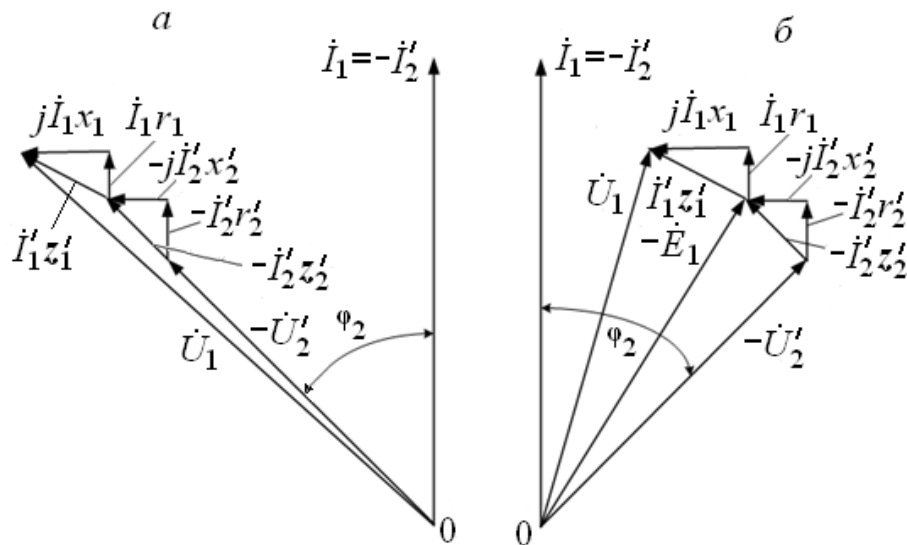


Рис. 3.12. Примеры векторных диаграмм упрощенной схемы замещения:

a – при активно-индуктивной нагрузке;

б – при активно-емкостной нагрузке

Лекция 4. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

1. Характеристика режима короткого замыкания трансформатора.
2. Вторичное напряжение и внешняя характеристика трансформатора.
3. Потери и КПД трансформатора.

1. Характеристика режима короткого замыкания трансформатора

Короткое замыкание трансформатора – это такой режим работы трансформатора, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, т.е. $z_{нг} = 0$, при этом $U_2 = 0$. В условиях, когда к трансформатору подведено первичное номинальное напряжение $U_1 = U_{1н}$, короткое замыкание является аварийным режимом и представляет большую опасность для трансформатора, так как ток короткого замыкания $I_K > (10...20) I_{1н}$. Поэтому при опыте короткого замыкания (КЗ) вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к зажимам первичной обмотки подводят пониженное напряжение $U_K = (5...10)\% U_{1н}$ (рис. 4.1).

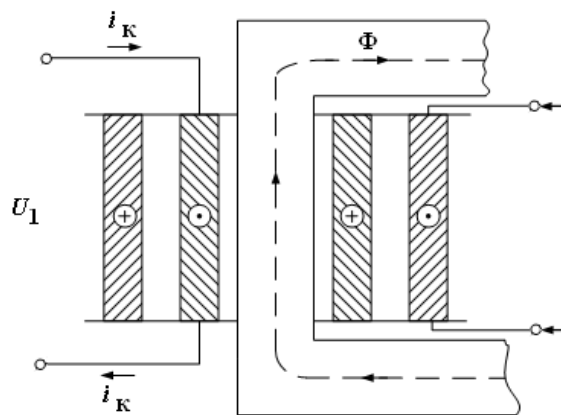


Рис. 4.1. Схема трансформатора при коротком замыкании

При этом под номинальным напряжением короткого замыкания подразумевают напряжение, подведённое к зажимам первичной обмотки при замкнутой вторичной, когда по обеим обмоткам протекают номинальные токи. Номинальное напряжение короткого замыкания составляет $U_{Кн} = (3...10)\% U_{1н}$.

Часто напряжение короткого замыкания выражают в процентах от номинального напряжения:

$$U_{K\%} = \frac{U_K}{U_{1н}} 100\%.$$

Тогда уравнения напряжений и токов можно записать:

$$\begin{cases} U_{1K} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ 0 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2) = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2; \\ \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = \dot{I}_K, \end{cases}$$

Учитывая, что $\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2$ и $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = \dot{I}_K$ получаем:

$$\dot{U}_{1K} = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}'_2 z'_2, \quad \dot{U}_{1K} = \dot{I}_K z_1 + \dot{I}'_K z'_2.$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1K} &= \dot{I}_K(r_1 + jx_1) + \dot{I}_K(r_2' + jx_2') = \\ &= \dot{I}_K(r_1 + r_2') + \dot{I}_K(jx_1 + jx_2') = \dot{I}_K r_K + \dot{I}_K jx_K = \dot{I}_K z_K, \end{aligned}$$
$$z_K = \sqrt{(r_K^2 + x_K^2)}.$$

41

Для режима короткого замыкания можно рассчитать треугольник короткого замыкания.

Стороны треугольника соответствуют:

$$BC = U_{ka} = I_K r_K; \quad AB = U_{kr} = I_K x_K; \quad AC = U_K = I_K z_K,$$

где U_{ka} , U_{kr} , U_K – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, а также полное напряжение короткого замыкания соответственно при токе короткого замыкания I_K .

Активная, реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, и полное напряжение короткого замыкания, часто выражаются в процентах (при токе короткого замыкания I_K):

$$U_{ka\%} = \frac{I_K r_K}{U_H} 100\%; \quad U_{kr\%} = \frac{I_K x_K}{U_H} 100\%; \quad U_{K\%} = \frac{I_K z_K}{U_H} 100\%.$$

Номинальные величины активной, реактивной составляющих напряжения короткого замыкания и полное номинальное напряжение короткого замыкания, также часто выражаются в процентах:

$$U_{ka\%} = \frac{I_H r_K}{U_H} 100; \quad U_{kr\%} = \frac{I_H x_K}{U_H} 100\%; \quad U_{K\%} = \frac{I_H z_K}{U_H}.$$

Можно выразить номинальные величины активной, реактивной составляющих напряжения короткого замыкания, и полное номинальное напряжение короткого замыкания в относительных единицах:

$$U_{ka}^* = \frac{I_H r_K}{U_H}; \quad U_{kr}^* = \frac{I_H x_K}{U_H}; \quad U_K^* = \frac{I_H z_K}{U_H}.$$

Сопротивления короткого замыкания (или параметры короткого замыкания) также выражают в процентах или относительных единицах. Так, полное сопротивление короткого замыкания

$$z_K^* = \frac{z_K}{z_H} = \frac{z_K}{\left(\frac{U_H}{I_H}\right)} = \frac{I_H z_K}{U_H} = U_K^*.$$

Аналогично, активное и реактивное составляющие сопротивления короткого замыкания в относительных единицах:

$$r_K^* = \frac{r_K}{r_H} = U_{ka}^*; \quad x_K^* = \frac{x_K}{x_H} = U_{kr}^*.$$

Так как обмотки в режиме короткого замыкания нагреваются, то активное сопротивление короткого замыкания и все величины, с ним связанные, приводят к температуре 75 °C:

$$r_{K75^\circ} = r_K [1 + \alpha(75^\circ - \theta_1)],$$

где α – температурный коэффициент, равный для меди и алюминия: $\alpha = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, θ_1 – температура окружающей среды (°C).

Следовательно, полное сопротивление схемы замещения, приведённое к температуре 75°C равняется:

$$z_{K75^\circ} = \sqrt{(r_{K75^\circ}^2 + x_K^2)}.$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos\varphi_{K75^\circ} = \frac{r_{K75^\circ}}{z_{K75^\circ}}.$$

Активная и полная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_{Ka75\%} = \frac{I_H r_{K75^\circ}}{U_H} 100\%; \quad U_{K75\%} = \frac{I_H z_{K75^\circ}}{U_H} 100\%.$$

При коротком замыкании ЭДС и поток составляют всего несколько процентов от их значений при номинальном напряжении, поэтому магнитными потерями можно пренебречь и считать, что в этом случае потребляемая трансформатором мощность идёт полностью на покрытие электрических потерь в обмотках:

$$P_K = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2' = I_K^2 r_K.$$

Потери короткого замыкания (или мощность короткого замыкания) также приводят к температуре 75°C :

$$P_{K75^\circ} = I_K^2 r_{K75^\circ}.$$

Схемы замещения трансформатора при коротком замыкании имеют вид (рис. 4.3)

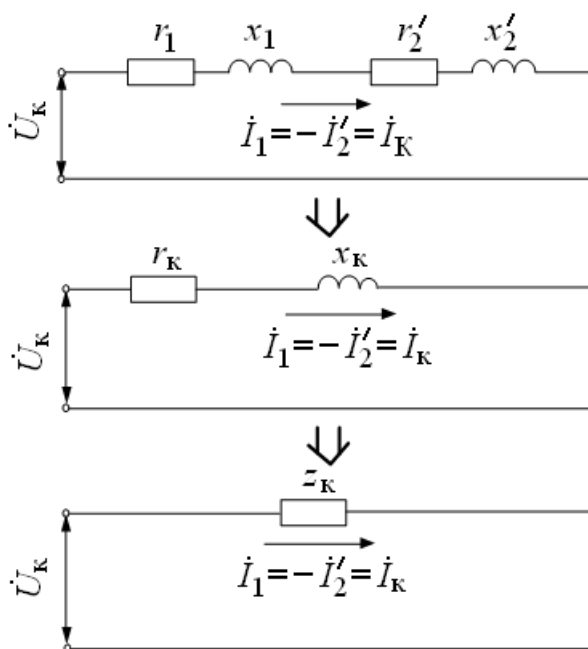


Рис. 4.3. Схемы замещения трансформатора при коротком замыкании

2. Вторичное напряжение и внешняя характеристика трансформатора

2.1. Изменение вторичного напряжения

При изменении нагрузки трансформатора происходит и изменение его вторичного напряжения. Изменением вторичного напряжения называется алгебраическая разность значений вторичного напряжения при холостом ходе U_{20} и нагрузке U_2 в процентах от напряжения при холостом ходе U_{20} :

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100\% = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} 100\%.$$

Так как при холостом ходе практически отсутствуют падения напряжения в обмотках, то $U'_{20} = U_1$ и при номинальном значении:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{1H} - U'_2}{U_{1H}} 100\%.$$

На практике представляет интерес изменение вторичного напряжения в виде $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$. Для определения $\Delta U_{\%}$ используем составляющие напряжения короткого замыкания в векторной диаграмме на рис. 4.4, построенной согласно упрощённой схеме замещения (см. лекцию № 3, рис. 3.11).

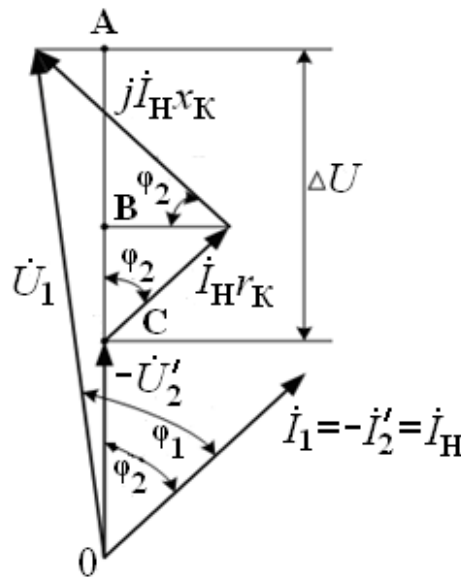


Рис. 4.4. Векторная диаграмма упрощённой схемы трансформатора

Из диаграммы следует, что ввиду малости угла $(\varphi_1 - \varphi_2)$ приближённо за модуль вектора \vec{U}_1 можно принять его проекцию на направление вектора \vec{U}'_2 , т.е. отрезок OA , тогда

$$\Delta U = U_{1H} - U'_2 = AC = AB + BC,$$

или через проекции падений напряжения получим:

$$\Delta U = I_H r_K \cos \varphi_2 + I_H x_K \sin \varphi_2.$$

Изменение вторичного напряжения в относительных единицах равно:

$$\Delta U^* = \frac{\Delta U}{U_H} = \frac{I_H r_K \cos \varphi_2}{U_H} + \frac{I_H x_K \sin \varphi_2}{U_H} = U_{Ka} \cos \varphi_2 + U_{Kr} \sin \varphi_2.$$

Изменение вторичного напряжения в процентах равно:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\%} &= \frac{\Delta U}{U_H} 100\% = \frac{I_H r_K \cos \varphi_2}{U_H} 100\% + \frac{I_H x_K \sin \varphi_2}{U_H} 100\% = \\ &= U_{Ka\%} \cos \varphi_2 + U_{Kr\%} \sin \varphi_2. \end{aligned}$$

Данное выражение позволяет определить изменение вторичного напряжения от режима холостого хода только до номинальной нагрузки, то есть при $I_1 = I_H$. При необходимости расчёта $\Delta U_{\%}$ для любой нагрузки введём коэффициент нагрузки:

$$k_{НГ} = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}},$$

тогда получим

$$\Delta U_{\%} = k_{НГ} (U_{Ka\%} \cos \varphi_2 + U_{Kr\%} \sin \varphi_2).$$

Из данного выражения следует, что, при заданном значении коэффициента нагрузки, величина $\Delta U_{\%}$ зависит от величины угла φ_2 , то есть от типа нагрузки. При чисто активной нагрузке ($\varphi_2 = 0$) величина $\Delta U_{\%} > 0$ невелика. При активно-индуктивной – возрастает (то есть вторичное напряжение при увеличении нагрузки уменьшается, что говорит о размагничивающем действии нагрузки), а при активно-емкостной – даже может быть $\Delta U_{\%} < 0$ (то есть вторичное напряжение при увеличении нагрузки увеличивается, что говорит о подмагничивающем действии нагрузки).

Зависимость $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ приведена на рис. 4.5.

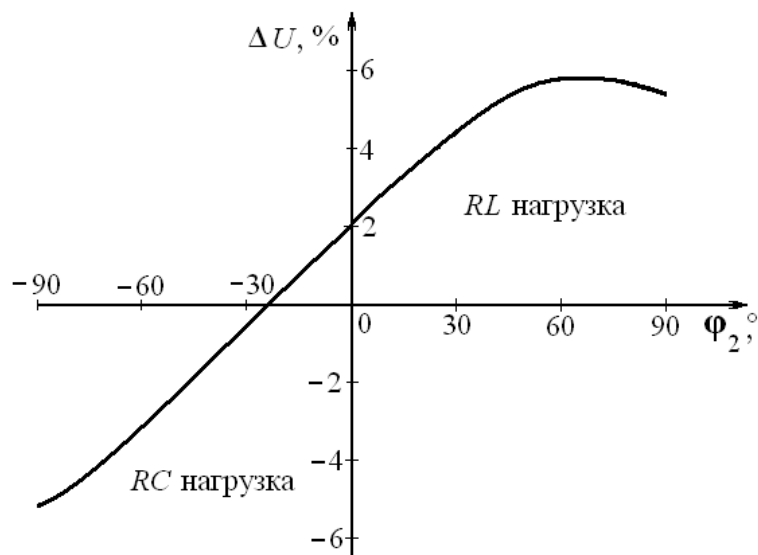


Рис. 4.5. Зависимость изменений вторичного напряжения от вида нагрузки

2.2. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от коэффициента нагрузки, т.е. $U_2 = f(k_{\text{нг}})$. Внешние характеристики для различного характера нагрузки приведены на рис. 4.6.

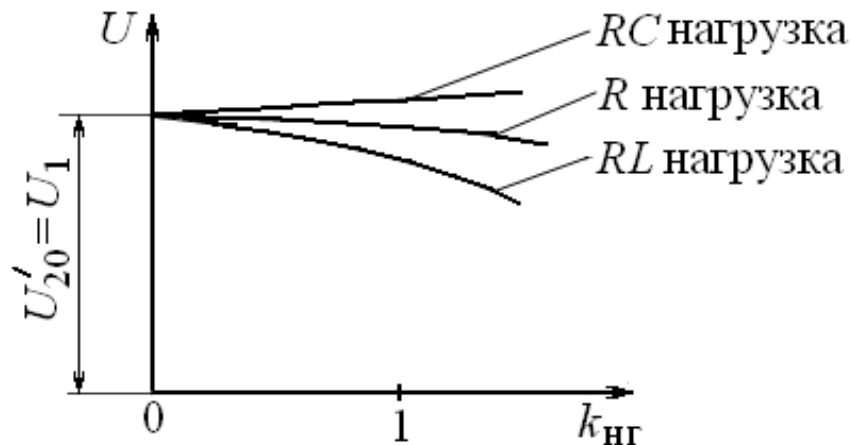


Рис. 4.6. Внешние характеристики трансформатора

4. Потери и КПД трансформатора

В процессе трансформирования электрической энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную часть энергии теряется в самом трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяют на электрические и магнитные:

$$\Sigma p = p_{\text{эл}} + p_{\text{мг}},$$

где Σp — суммарные потери;

$p_{\text{эл}}$, $p_{\text{мг}}$ — электрические и магнитные потери трансформатора.

Электрические потери трансформатора обусловлены нагревом обмоток при прохождении по ним электрического тока и равны:

$$p_{\text{эл}} = p_{\text{эл}1} + p_{\text{эл}2} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2 = mI_1^2 r_1 + mI_2'^2 r_2',$$

где $p_{\text{эл}1}$, $p_{\text{эл}2}$ — электрические потери в первичной и вторичной обмотках, соответственно; m — число фаз трансформатора; ($m = 1$ — для однофазного трансформатора, $m = 3$ — для трёхфазного трансформатора).

Потери в обмотках можно определить из опыта короткого замыкания как

$$p_{\text{эл}} = k_{\text{нг}}^2 P_{\text{кн}75^\circ},$$

где $P_{\text{кн}75^\circ}$ — мощность, подводимая к первичной обмотке в режиме короткого замыкания при номинальных токах в обмотках.

При этом считается, что вся подводимая активная мощность расходуется только на покрытие электрических потерь в обмотках, а магнитными

потерями пренебрегают, поскольку магнитный поток в режиме короткого замыкания мал и, следовательно, магнитные потери также малы, и ими можно пренебречь. Электрические потери зависят от величины нагрузки трансформатора и поэтому их называют переменными.

Магнитные потери происходят главным образом в магнитопроводе трансформатора. Причина появления этих потерь – систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Магнитные потери:

$$p_{\text{мг}} = p_{\text{гист}} + p_{\text{в.т}},$$

где $p_{\text{гист}}$ – потери на гистерезис, т.е. потери, связанные с перемагничиванием магнитопровода переменным магнитным полем; $p_{\text{в.т}}$ – потери на вихревые токи.

Потери в стали зависят от свойств материала, величины индукции, частоты перемагничивания. Потери на вихревые токи также зависят и от толщины стальных листов.

Удельные потери на гистерезис можно определить как:

$$p_{\text{гист}} = c_{\text{гист}} f B^2,$$

где $c_{\text{гист}}$ – постоянная, зависящая от марки стали;

f – частота перемагничивания;

B – величина магнитной индукции.

Удельные потери на вихревые токи можно определить как

$$p_{\text{в.т}} = c_{\text{в.т}} f B^2,$$

где $c_{\text{в.т}}$ – постоянная, зависящая от марки стали.

Так как магнитный поток пропорционален величине подведённого напряжения, то можно считать, что магнитные потери пропорциональны квадрату напряжения. Для снижения магнитных потерь применяют высоколегированные стали (с содержанием кремния 4...5%), холоднокатаные анизотропные стали, магнитные свойства которых резко улучшаются вдоль направления прокатки. Также для снижения потерь на вихревые токи уменьшают толщину листов стали и изолируют их друг от друга.

Магнитные потери определяют из опыта холостого хода (как подведённую активную мощность в режиме холостого хода при номинальном напряжении, при этом пренебрегается электрическими потерями в первичной обмотке, поскольку ток холостого хода мал):

$$p_{\text{мг}} = P_0.$$

Магнитные потери не зависят от нагрузки, и поэтому называются постоянными.

Таким образом, активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку, частично расходуется на электрические потери в первичной обмотке $p_{\text{эл1}}$. Изменяющийся во времени магнитный поток вызывает магнитные потери $p_{\text{мг}}$. Оставшаяся часть мощности – электромагнитная мощ-

ность $P_{\text{ЭМ}}$ – передаётся электромагнитным путём во вторичную обмотку, где расходуется на электрические потери во вторичной обмотке $p_{\text{ЭЛ2}}$:

$$P_{\text{ЭМ}} = P_1 - p_{\text{ЭЛ1}} - p_{\text{МГ}}.$$

В результате на выходе вторичной обмотки имеем активную мощность P_2 :

$$P_2 = P_{\text{ЭМ}} - p_{\text{ЭЛ2}}.$$

Все виды потерь и процесс преобразования потерь показаны на энергетической диаграмме (рис. 4.7).

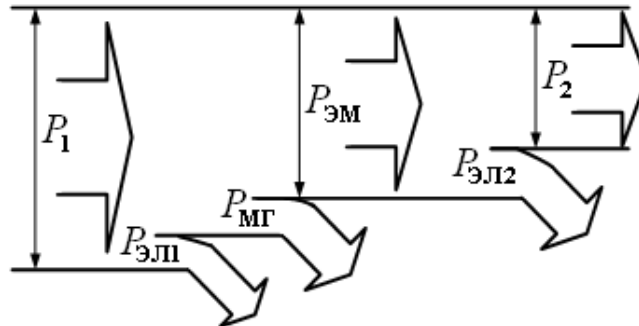


Рис. 4.7. Энергетическая диаграмма трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора – это отношение активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + p_{\text{МГ}} + p_{\text{ЭЛ}}} 100\% =$$

$$= \frac{k_{\text{НГ}} S_{\text{Н}} \cos \varphi_2}{k_{\text{НГ}} S_{\text{Н}} \cos \varphi_2 + P_0 + k_{\text{НГ}}^2 P_{\text{КН}75^\circ}} 100\%,$$

где $S_{\text{Н}}$ – полная номинальная мощность.

Для определения нагрузки, при которой КПД достигает максимального значения нужно взять первую производную $\frac{d\eta}{dk_{\text{НГ}}}$ и приравнять ее нулю:

$$\frac{d\left(\frac{k_{\text{НГ}} S_{\text{Н}} \cos \varphi_2}{k_{\text{НГ}} S_{\text{Н}} \cos \varphi_2 + P_0 + k_{\text{НГ}}^2 P_{\text{КН}75^\circ}}\right)}{dk_{\text{НГ}}} = 0,$$

откуда получаем

$$P_0 = k_{\text{НГ}}^2 P_{\text{КН}75^\circ}.$$

Это условие получения максимума КПД. Другими словами, значение КПД максимально, если выполняется любое из равенств:

потери при холостом ходе = потери при коротком замыкании;

магнитные потери = электрические потери;

постоянные потери = переменные потери.

Последние три утверждения равноценны и справедливы. Таким образом, согласно условию получения максимума, КПД достигает максимума при такой нагрузке, что

$$k_{\text{НГ}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{КН}75^\circ}}}.$$

Для серийных силовых трансформаторов $k_{\text{НГ}} = 0,45 \dots 0,65$, при этом $\eta_{\text{max}} = (97 \dots 99,5)\%$. В трансформаторах небольшой мощности (десятки ВА) максимальный КПД может снижаться до $\eta_{\text{max}} = (60 \dots 65)\%$. Как следует из зависимости $\eta = f(k_{\text{НГ}})$, приведенной на рис. 4.8, максимум КПД трансформаторов выражен достаточно слабо и сохраняет достаточно высокое значение в широком диапазоне нагрузки ($k_{\text{НГ}} = 0,5 \dots 1,25$). При больших нагрузках возрастают электрические потери в обмотках и КПД плавно снижается. При малых нагрузках КПД трансформатора снижается резко.

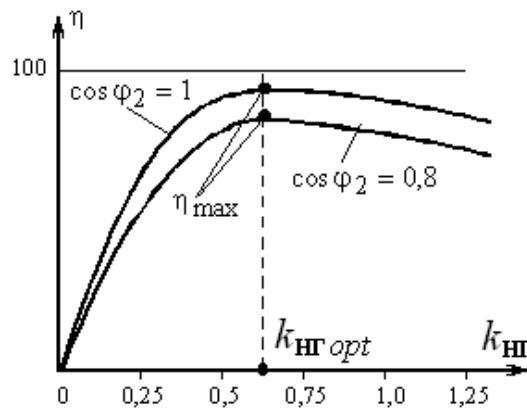


Рис. 4.8. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Если трансформатор работает при переменной нагрузке, то для оценки его экономичности на практике зачастую используют понятие *годового КПД*, который рассчитывается следующим образом:

$$k_{\Gamma} = \frac{\text{Энергия, отданная во вторичную сеть в течении года}}{\text{Энергия, потребленная из первичной сети в течении года}}.$$

Лекция 5. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

План лекции

1. Конструкция трёхфазных трансформаторов.
2. Схемы и группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов.
3. Особенности режима холостого хода трёхфазных трансформаторов.

1. Конструкция трёхфазных трансформаторов

1.1. Магнитные системы трёхфазных трансформаторов

Различают основные типы магнитных систем трёхфазных трансформаторов, в зависимости от конструктивного устройства магнитопровода: стержневая магнитная система; броневая магнитная система; бронестержневая магнитная система.

Также (в зависимости от взаимосвязи потоков различных фаз) магнитные системы разделяются как: независимая система; частично-связанная система; связанная магнитная система.

Примеры наиболее распространённых типов трёхфазных трансформаторов.

1.1.1. Независимая магнитная система.

Данный тип представлен на рис. 5.1. Трёхфазная трансформаторная группа получается из трёх однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены определённым образом. Схема соединения обмоток – «звезда»/«звезда» (Y/Y) показана на рисунке.

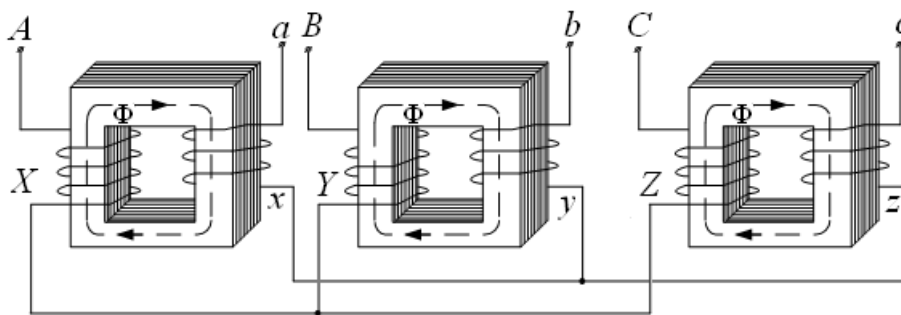


Рис. 5.1. Трёхфазная трансформаторная группа

Независимая группа применяется только при очень больших мощностях (более 10 МВА в фазе). Данный тип имеет некоторые преимущества при транспортировке и монтаже. Так, при выходе из строя одного однофазного трансформатора, ремонту или замене подлежит только один однофазный трансформатор.

К недостаткам можно отнести громоздкость всей конструкции, повышенные габариты и вес, отсюда повышенная стоимость.

Применяются, например, в металлургии для обеспечения работы мощных электродуговых печей.

1.1.2. Частично-связанная система;

Трёхфазный броневого трансформатор можно рассматривать как три однофазных броневого трансформатора, поставленных друг на друга. Трёхфазный броневого трансформатор представлен на рис. 5.2.

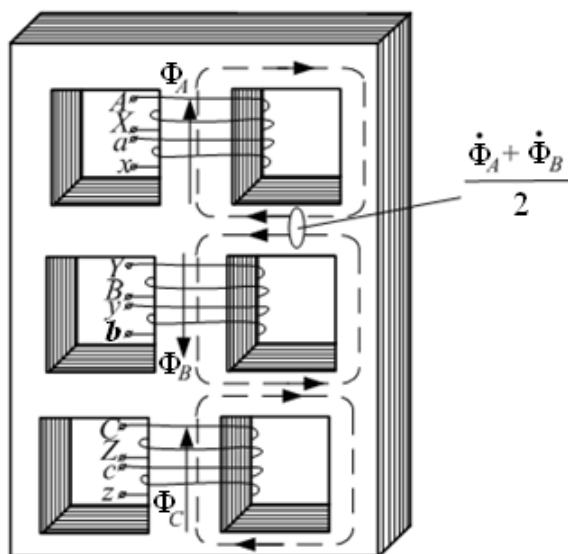


Рис. 5.2. Трёхфазный броневого трансформатор

Средняя фаза имеет обратное включение по сравнению с крайними фазами, для того, чтобы потоки в ярмах суммировались. Векторная диаграмма потоков в ярме приведена на рис. 5.3. Применяются такие трансформаторы достаточно редко из-за относительной сложности конструкции.

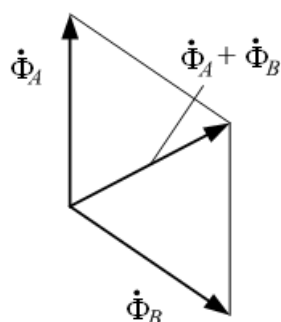


Рис. 5.3. Векторная диаграмма магнитных потоков в частично-связанной системе

1.1.3. Связанная магнитная система.

Примером связанной магнитной системы является бронестержневой трансформатор (рис.5.4).

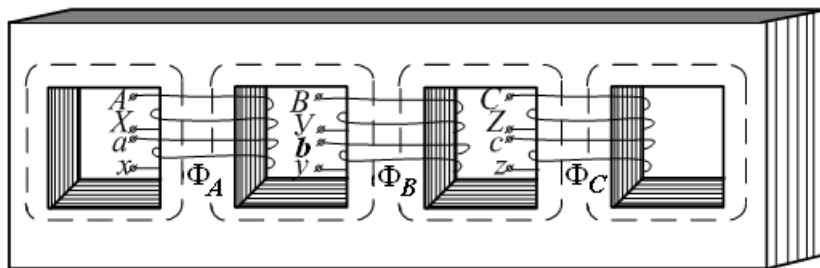


Рис. 5.4. Бронестержневой трансформатор

1.2. Трехстержневой трансформатор

Если на первичную обмотку подаётся симметричная система трёхфазных напряжений (рис.5.5, а), то по обмоткам протекают симметричные системы токов, следовательно, потоки трёх фаз также образуют симметричную систему, тогда

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0.$$

Следовательно, объединенный стержень можно убрать (рис. 5.5, б). Полученный таким образом трансформатор можно сделать более компактным, поместив все три стержня в одну плоскость (рис. 5.5, в).

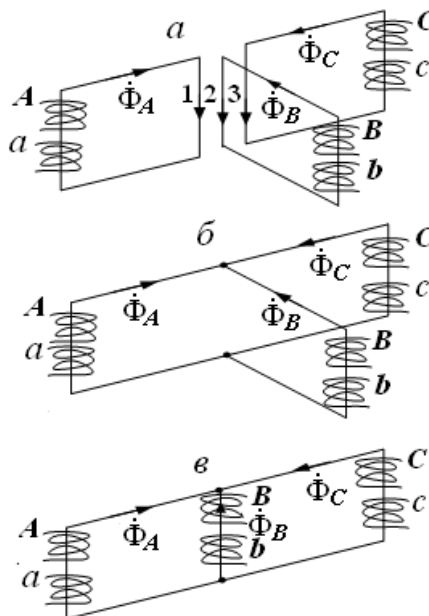


Рис. 5.5. Образование трёхстержневого трёхфазного трансформатора

Получившийся трансформатор называют трёхфазным стержневым трансформатором, или трёхстержневым. Вследствие уменьшения длины магнитной цепи, по которой замыкается поток фазы B , возникает некото-

рая магнитная несимметрия фаз, которая обычно невелика и будет сказываться только на режиме холостого хода, в частности, на токе холостого хода, который будет меньше в средней фазе, чем в крайних. Однако, как было показано ранее, при нагрузке ток холостого хода оказывает малое влияние на величины токов первичной и вторичной обмоток (см. лекцию № 3). Таким образом, можно считать, что при симметричном питающем напряжении и нагрузке все фазы трёхфазного трансформатора находятся в одинаковых условиях. Поэтому для каждой фазы справедливы комплексные уравнения, векторные диаграммы и схемы замещения, выведенные ранее. Исключение составляет только режим холостого хода, при котором сказывается схема соединения обмоток. Конструктивное устройство трёхфазного стержневого трансформатора представлено на рис. 5.6.

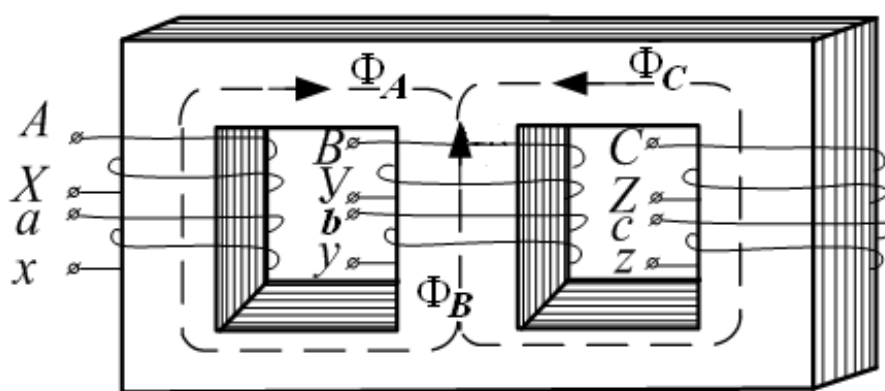


Рис. 5.6. Конструкция трёхстержневого трёхфазного трансформатора

2. Схемы и группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов

2.1. Схемы соединений обмоток

Первичная и вторичная обмотки трансформаторов могут быть соединены в «звезду» (Y), в «треугольник» (Δ). В схеме соединений – «звезда» может быть выведена нулевая точка (Y_0). Кроме того, существует схема соединений «зигзаг» (Z), которая применяется достаточно редко [2]. В схемах соединений «звезда» и «треугольник» любая фазная обмотка располагается на одном стержне трансформатора, в схеме соединений «зигзаг» некоторые фазные обмотки разделяются на части, которые располагаются на разных стержнях трансформатора..

Рассмотрим схемы соединений и их векторные диаграммы напряжений, на которых \vec{U}_{BA} , \vec{U}_{AC} , \vec{U}_{CB} обозначают векторы линейных напряжений; \vec{U}_A , \vec{U}_B , \vec{U}_C – векторы фазных напряжений; \vec{I}_A , \vec{I}_B , \vec{I}_C – векторы фазных токов.

Схема соединений – «звезда» (Y) рис. 5.7.

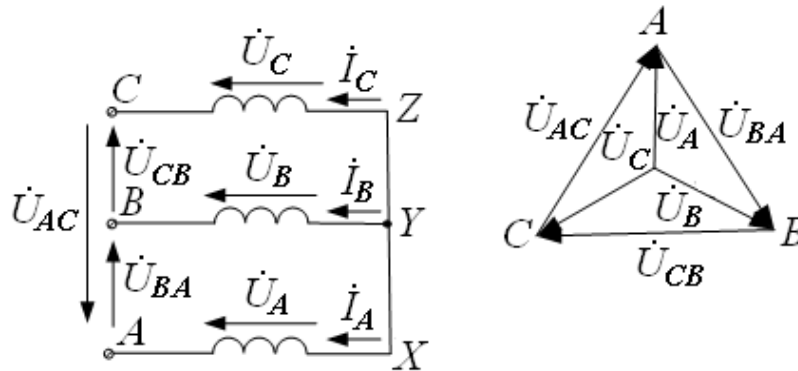


Рис. 5.7. Схема соединений обмоток трёхфазного трансформатора «звездой» (Y) и векторная диаграмма напряжений

Фазные и линейные напряжения, а также токи при соединении «звездой» находятся в следующих соотношениях:

$$U_{\Phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}; \quad I_{\Phi} = I_L.$$

Схема соединений – «треугольник» (Δ) рис. 5.8.

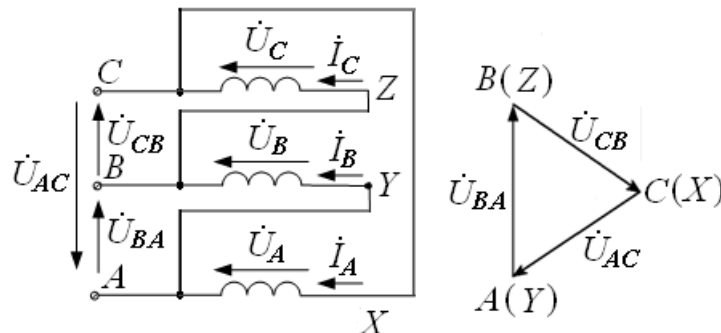


Рис. 5.8. Схема соединений обмоток трёхфазного трансформатора «треугольником» (Δ) и векторная диаграмма напряжений

Фазные и линейные напряжения, а также токи при соединении «треугольником» находятся в следующих соотношениях:

$$U_{\Phi} = U_L; \quad I_{\Phi} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}.$$

2.2. Группы соединений обмоток

Группа соединений обмоток трансформатора определяется углом сдвига между одноименными *линейными* первичными и вторичными электро-движущими силами обмоток. На практике величину угла сдвига принято характеризовать положением стрелок на часовом циферблате. Вектор первичной ЭДС E_1 изображают минутной стрелкой, постоянно установленной на цифре 12, а вектор вторичной ЭДС E_2 – часовой стрелкой, которая указывает номер группы соединений обмоток трансформатора (рис. 5.9). За единицу угла принимается центральный угол между соседними часовыми

делениями, равный 30° . Угол отсчитывается от минутной до часовой стрелки по ходу стрелок часов.

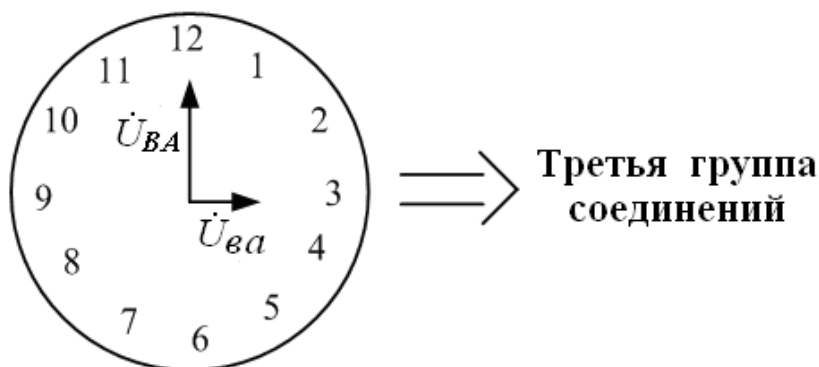


Рис. 5.9. Пример определения группы соединений трансформатора

Номер группы соединений зависит от направления намотки обмоток трансформатора, маркировки их выводов и схем соединения обмоток.

Например, для однофазных трансформаторов в зависимости от направления намотки катушек возможны две группы соединений (рис. 5.10);

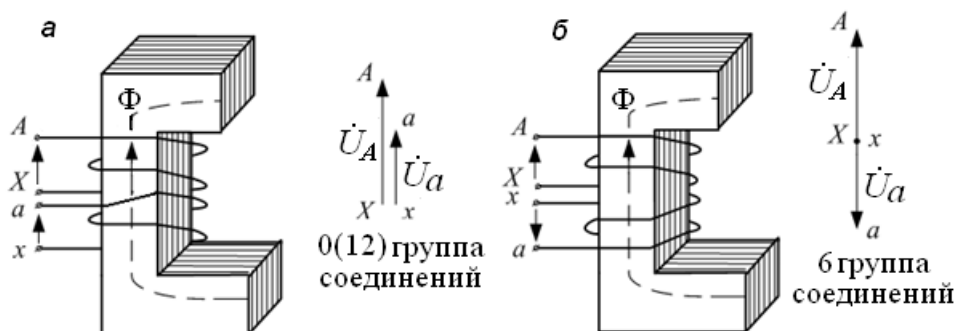


Рис. 5.10. Возможные группы соединений однофазных трансформаторов

В однофазных трансформаторах, обозначаемых как I/I, возможна как 0 группа – I/I-0, так и 6 группа – I/I-6. Стандартизированной является 0 группа.

В трёхфазных трансформаторах возможны 12 групп соединений обмоток. Стандартизованными являются 2 группы – Y/Y-0, Y/Δ-11. При одинаковых схемах соединений первичной и вторичной обмоток имеют место чётные группы, а при различных схемах соединений первичной и вторичной обмоток – нечётные группы. Примеры определения групп соединений с помощью векторных диаграмм показаны на рис. 5.11, рис. 5.12 и рис. 5.13.

Возможно опытное определение группы соединений обмоток трансформатора, которое можно осуществить с помощью различных измерительных приборов, например, гальванометра, фазометра, ваттметра или вольтметра [2, 3, 4].

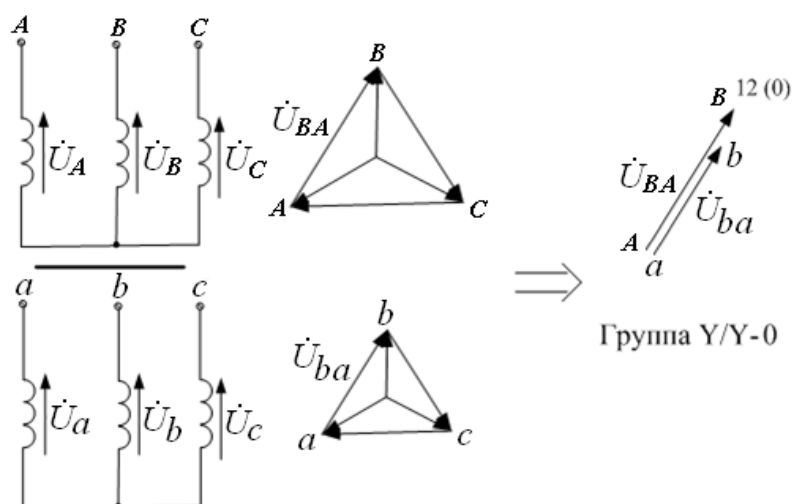


Рис. 5.11. Пример № 1 определения группы соединений

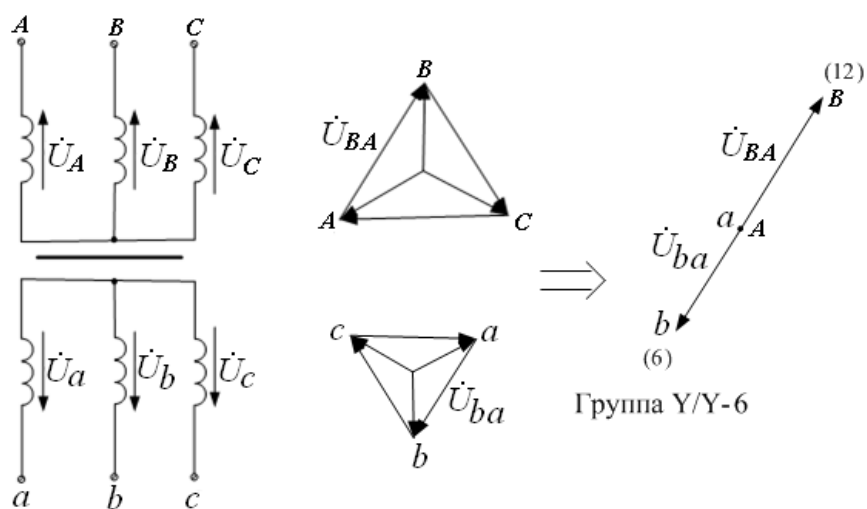


Рис. 5.12. Пример № 2 определения группы соединений

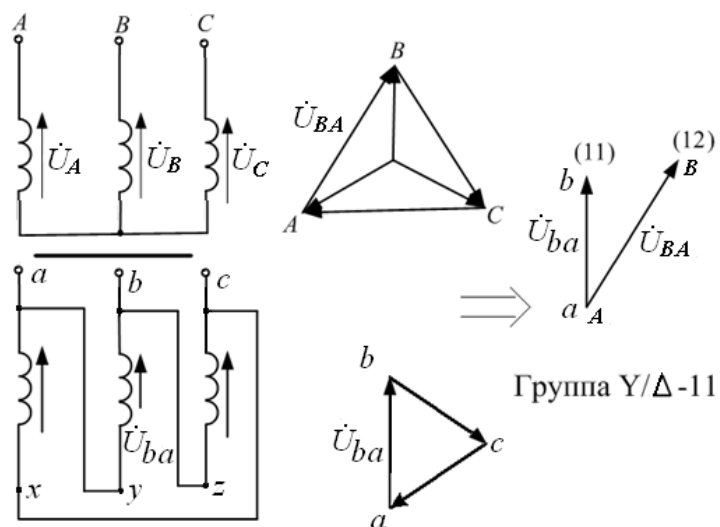


Рис. 5.13. Пример № 3 определения группы соединений

3. Особенности режима холостого хода трёхфазных трансформаторов

Процесс намагничивания трёхфазных трансформаторов зависит от типа магнитной системы и схемы соединения обмоток трансформатора. Рассмотрим их основные сочетания.

3.1. Трёхфазная трансформаторная группа – трансформатор с независимой магнитной системой и со схемой соединения – Y/Y (рис. 5.14).

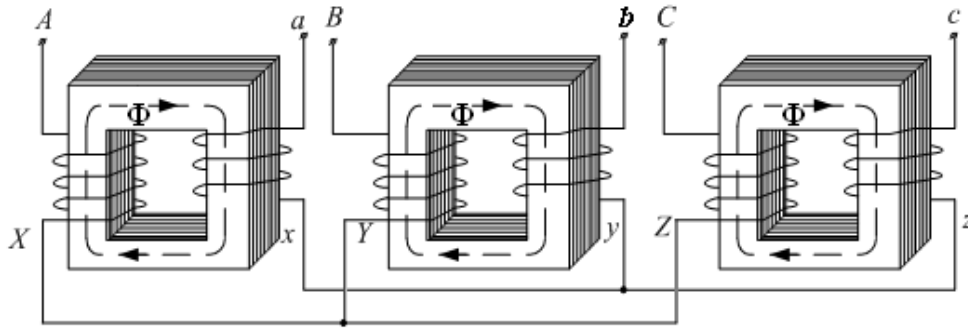


Рис. 5.14. Трёхфазная трансформаторная группа

Если на первичную обмотку подаётся трёхфазное синусоидальное напряжение $u_1 = U_1 \sin \omega t$, то ЭДС и поток также изменяются во времени по синусоидальному закону (см. лекцию № 3):

$$e_1 = E_1 \sin (\omega t - \pi); \quad \Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2).$$

Как было показано выше, в случае насыщения магнитной системы при синусоидальном потоке, ток холостого хода изменяется во времени несинусоидально, а, следовательно, кривую тока можно разложить в гармонический ряд, который содержит нечётные гармоники:

$$i_0 = i_{0(1)} + i_{0(3)} + i_{0(5)} + \dots + i_{0(v)}.$$

Наиболее выражена из высших гармоник – третья, поэтому учтём только её $i_0 = i_{0(1)} + i_{0(3)}$.

Первые гармоники тока холостого хода трёхфазной обмотки имеют сдвиг во времени на $2\pi/3$:

$$\begin{aligned} I_{A0(1)} &= I_{A0(1)m} \sin \omega t; \\ I_{B0(1)} &= I_{B0(1)m} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ I_{C0(1)} &= I_{C0(1)m} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Первые гармоники тока холостого хода трёхфазной обмотки:

$$\begin{aligned} I_{A0(3)} &= I_{A0(3)m} \sin (3\omega t); \\ I_{B0(3)} &= I_{B0(3)m} \sin \left(3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right) = I_{B0(3)m} \sin (3\omega t - 2\pi) = \\ &= I_{B0(3)m} \sin (3\omega t); \end{aligned}$$

$$I_{C0(3)} = I_{C0(3)m} \sin\left(3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) = I_{C0(3)m} \sin(3\omega t).$$

Таким образом, третьи гармоники каждой фазы и гармоники, кратные трём, в каждый момент времени будут совпадать по фазе (рис. 5.15), и поэтому они выпадают из кривой тока холостого хода, и кривая тока холостого хода будет приближаться к синусоиде.

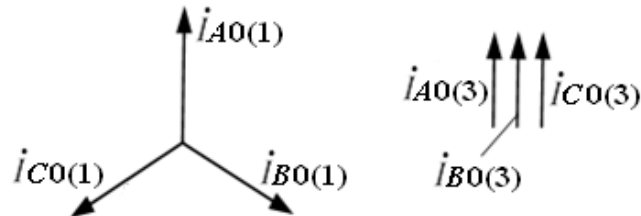


Рис. 5.15. Векторы первых и третьих гармоник тока холостого хода трехфазного трансформатора

Для получения синусоидально изменяющегося во времени магнитного потока при насыщении магнитопровода (см. лекцию № 3) намагничивающий ток должен содержать гармоники, кратные трём. Поскольку наличие таких гармоник невозможно, поток будет несинусоидальным.

Кривая потока будет иметь уплощённую форму, и кроме основной гармоники, из кривой потока можно выделить высшие гармоники, самая сильная из которых – третья (рис. 5.16). Фазные ЭДС и напряжения также несинусоидальны, и кроме основной гармоники содержат высшие. Частота третьей гармоники ЭДС $f_{(3)} = 3f_{(1)}$ и для промышленной частоты $f = f_{(1)} = 50$ Гц, $f_{(3)} = 150$ Гц.

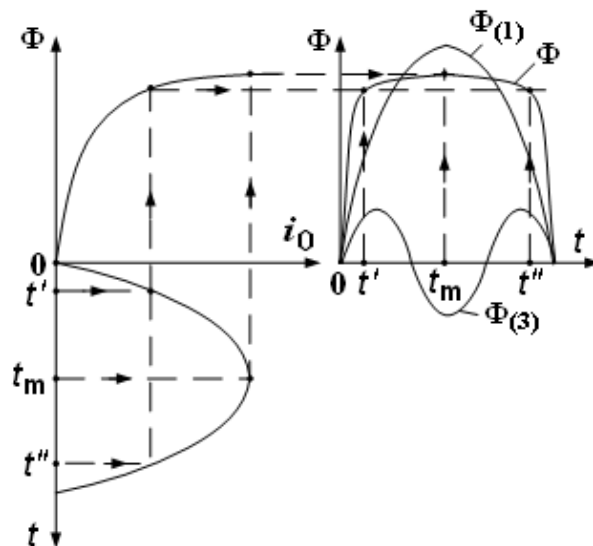


Рис. 5.16. Изменения тока холостого хода и магнитного потока трехфазного трансформатора

Фазная ЭДС из-за влияния третьей гармоники увеличивается на 45...60%. Это явление нежелательное и опасное для потребителей.

ГОСТом не допускается соединение по схеме Y/Y в трансформаторах с независимой магнитной системой. Следует отметить, что кривые линейных ЭДС не искажаются, так как в разности двух фазных ЭДС третьей гармоники исчезают.

3.2. Трёхфазный стержневой трансформатор со связанной магнитной системой, схема соединения Y/Y (рис. 5.17).

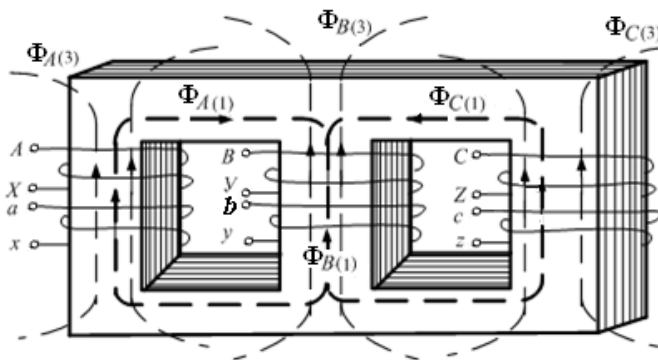


Рис. 5.17. Стержневой трёхфазный трансформатор

Аналогично, как и в случае с независимой магнитной системой, третьей гармоники тока выпадают из кривой тока холостого хода и появляются третьей гармоники потока (рис. 5.17).

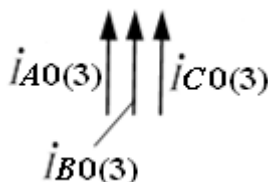


Рис. 5.17. Третьи гармоники тока холостого хода

Третьи гармоники потока по замкнутому пути в сердечнике замыкаться не могут, так как в каждый момент времени имеют одинаковое направление. Поэтому они замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло, воздух, крепёжные детали и стенки бака, что приводит к уменьшению величин третьих гармоники потока, и искажение фазных ЭДС будет незначительным. Но замыкание потока через крепёжные детали и стенки бака вызывает добавочные потери на вихревые токи, что приводит к уменьшению КПД.

3.3. Трёхфазный стержневой трансформатор со связанной магнитной системой, схема соединения Y_0/Y (рис. 5.18).

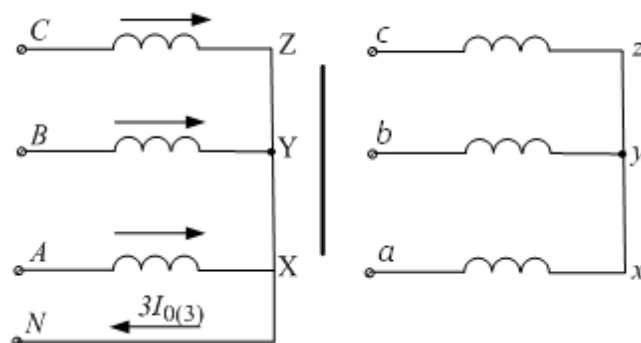


Рис. 5.18. Схема соединения трехфазного трансформатора Y_0/Y

Третьи гармоники тока замыкаются по нулевому проводу, при этом ток холостого хода в каждой фазе содержит третьи гармоники тока. А поскольку ток является несинусоидальной функцией времени, то поток изменяется во времени синусоидально, и процесс намагничивания происходит без особенностей.

3.4. Схема соединения Δ/Y при любой магнитной системе (рис. 5.19).

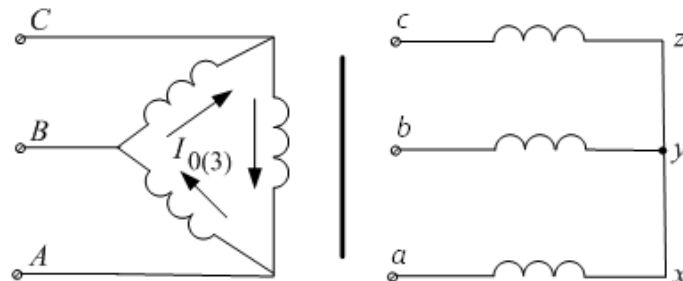


Рис. 5.19. Схема соединения трехфазного трансформатора Δ/Y

Так как третьи гармоники тока холостого хода могут замыкаться по контуру «треугольника», то они не выпадают из кривой тока холостого хода, а, значит, не появляются третьи гармоники потока, и не наблюдается искажения фазных ЭДС. Процесс намагничивания происходит без особенностей.

3.5. Схема соединения Y/Δ при любой магнитной системе (рис. 5.20).

Третьи гармоники тока холостого хода выпадают из кривой тока холостого хода, появляются третьи гармоники потока $\Phi_{(3)}$, которые наводят ЭДС третьей гармоники в первичной и вторичной обмотках: $e_{1(3)}$, $e_{2(3)}$.

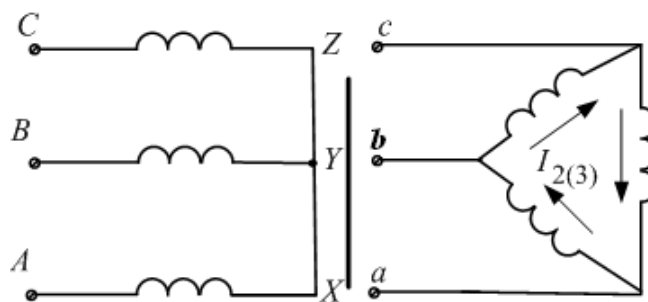


Рис. 5.20. Схема соединения трехфазного трансформатора Y/Δ

Под действием ЭДС $e_{2(3)}$ во вторичной обмотке будет протекать ток $i_{2(3)}$. Создаваемые этим током третьи гармоники потока вторичной обмотки $\Phi_{2(3)}$ будут почти полностью компенсировать потоки $\Phi_{(3)}$. Искажения фазных ЭДС и напряжений практически не будет – они синусоидальны. Векторная диаграмма потоков, ЭДС и токов третьей гармоники представлена на рис. 5.21.

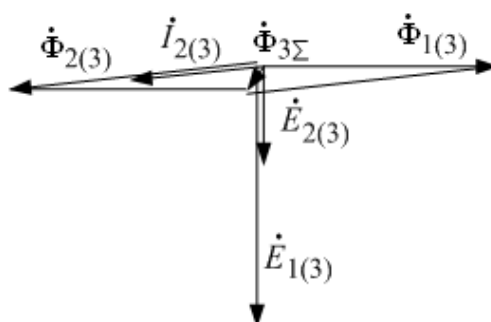


Рис. 5.21. Диаграмма ЭДС, потоков и токов (третьи гармоники) трехфазного трансформатора

Следовательно, чтобы избежать неблагоприятных явлений при намагничивании сердечника трансформатора, одну из обмоток рекомендуется соединять в «треугольник». Таким образом, в любых трехфазных трансформаторах с соединением Y/Y искажаются фазные напряжения, а в трехстержневых трансформаторах – также возникают добавочные потери от вихревых токов. Поэтому мощных трансформаторов с соединением обмоток Y/Y, как правило, не изготавливают. Если в отдельных случаях возникает потребность в таких трансформаторах (например, при необходимости заземления нулевых точек с обеих сторон), то в трансформаторе наматывается дополнительная, третичная обмотка с соединением в «треугольник», сечение которой рассчитано только на токи I_3 .

Лекция 6. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

1. Анализ режима работы трехфазного трансформатора методом симметричных составляющих.
2. Токи в трехфазном трансформаторе прямой, обратной и нулевой последовательности.
3. Схемы замещения трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности.
4. Несимметричный режим работы трехфазного трансформатора.

1. Анализ режима работы трехфазного трансформатора методом симметричных составляющих

Если трансформатор работает на симметричную нагрузку, то есть все три фазы загружены одинаково, то работу трёхфазного трансформатора можно анализировать по одной фазе. Симметричное короткое замыкание также анализируется аналогично короткому замыканию однофазного трансформатора.

При эксплуатации трансформатора в энергосистемах часто нагрузка по фазам может быть неодинаковой (неравномерное распределение нагрузки по фазам, подключение к трёхфазному трансформатору однофазной нагрузки и т.д.), что искажает систему напряжений трансформатора, приводит к добавочным потерям в обмотках и в магнитопроводе. Кроме того, несимметричные режимы работы имеют место при авариях – одно и двухфазном коротком замыкании в сетях, питающихся от трансформатора.

Для исследования несимметричных режимов работы применяется *метод симметричных составляющих*. При этом считается, что трансформатор подключён к сети бесконечно большой мощности, первичные напряжения образуют симметричную систему, а система вторичных токов определяется несимметричной нагрузкой.

При допущении условия, что магнитная проницаемость магнитных цепей трансформатора $\mu = \text{const}$, можно использовать «принцип наложения» токов в обмотках

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}. \end{cases}$$

Тогда несимметричную систему вторичных токов можно разложить на три симметричные системы – прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 6.1).

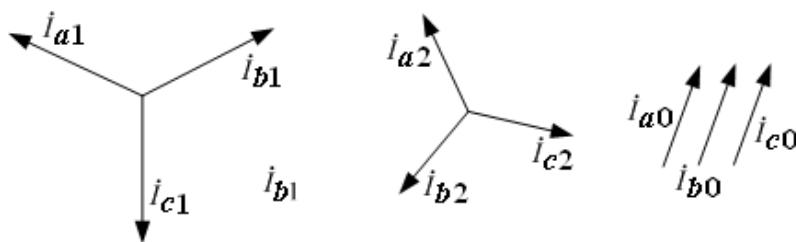


Рис. 6.1. Симметричные системы токов прямой, обратной и нулевой последовательности

Векторы \dot{I}_{a1} , \dot{I}_{b1} , \dot{I}_{c1} токи прямой последовательности, имеют прямое чередование фаз, то есть то же, что и заданная система векторов \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c ; \dot{I}_{a2} , \dot{I}_{b2} , \dot{I}_{c2} – токи обратной последовательности, имеют обратное чередование фаз; \dot{I}_{a0} , \dot{I}_{b0} , \dot{I}_{c0} – токи нулевой последовательности.

В приведенной выше системе уравнений приняты соотношения

$$\begin{cases} \dot{I}_{b1} = a^2 \dot{I}_{a1}; & \dot{I}_{c1} = a \dot{I}_{a1}; \\ \dot{I}_{b2} = a \dot{I}_{a2}; & \dot{I}_{c2} = a^2 \dot{I}_{a2}. \end{cases}$$

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0},$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$, $1+a+a^2 = 0$.

С учётом принятых соотношений, получим значения векторов:

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a \dot{I}_b + a^2 \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{cases}$$

Из системы векторов получаем

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3 \dot{I}_{a0}.$$

Таким образом, при наличии токов нулевой последовательности сумма токов трёх фаз отлична от нуля. Отсюда следует, что в трансформаторе токи нулевой последовательности могут возникать только тогда, когда хотя бы одна из обмоток имеет нулевой провод (или при заземлении нулевой точки).

После разложения токов на симметричные составляющие применяется метод наложения, и работа трансформатора анализируется отдельно для токов прямой, обратной и нулевой последовательности.

2. Токи в трехфазном трансформаторе прямой, обратной и нулевой последовательности

2.1. Сопротивление трансформатора для токов прямой и обратной последовательности

2.1.1. Сопротивление трансформатора для токов прямой последовательности

Рассмотрим для схемы соединения Y/Y (рис. 6.2).

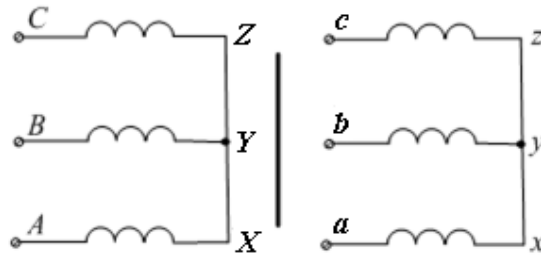


Рис. 6.2. Схема соединения Y/Y трехфазного трансформатора

В этом случае протекают только токи прямой последовательности:

$$\dot{I}_a, \quad \dot{I}_b = a^2 \dot{I}_a, \quad \dot{I}_c = a \dot{I}_a.$$

Если подставить значения указанных векторов тока, то получим

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \dot{I}_a; \\ \dot{I}_{a2} = 0; \\ \dot{I}_{a0} = 0. \end{cases}$$

Следовательно, в схеме существуют только токи прямой последовательности. Схемы замещения трансформатора для токов прямой последовательности показаны на рис. 6.3.

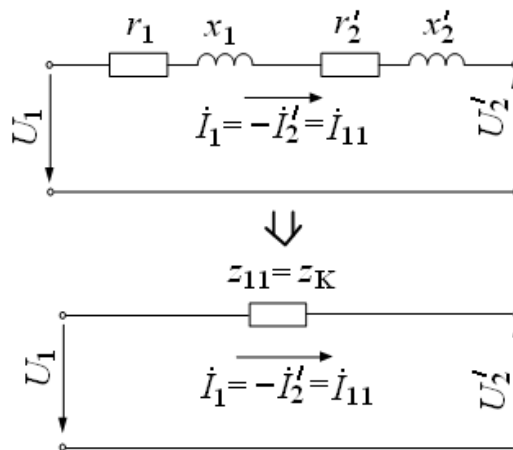


Рис. 6.3. Схемы замещения трехфазного трансформатора для токов прямой последовательности

Следовательно, сопротивление трансформатора для токов прямой последовательности равно

$$z_{11} = z_K.$$

2.1.2. Сопротивление трансформатора для токов обратной последовательности

Если у трансформатора поменять чередование фаз B и C , b и c , то режим работы не изменится, но чередование токов будет соответствовать обратной последовательности (рис. 6.4).

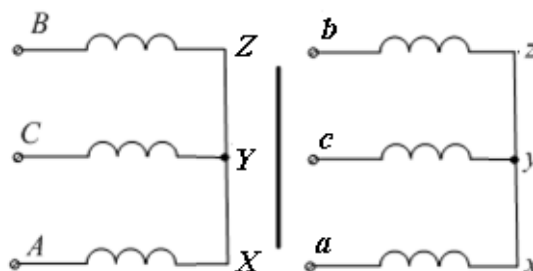


Рис. 6.4. Схема соединения Y/Y трехфазного трансформатора при обратном чередовании фаз

В этом случае:

$$\dot{I}_a, \quad \dot{I}_b = a\dot{I}_a, \quad \dot{I}_c = a^2\dot{I}_a.$$

Тогда

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = 0; \\ \dot{I}_{a2} = \dot{I}_a; \\ \dot{I}_{a0} = 0. \end{cases}$$

То есть, протекают токи только обратной последовательности и схемы замещения трансформатора для токов обратной последовательности показаны на рис. 6.5.

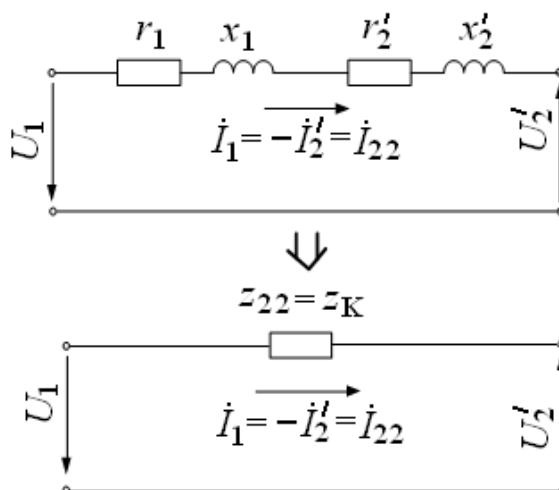


Рис. 6.5. Схема замещения трехфазного трансформатора для токов обратной последовательности

Тогда сопротивление трансформатора для токов обратной последовательности равно:

$$z_{22} = z_K.$$

2.2. Токи и потоки нулевой последовательности

В обмотках, соединённых в звезду, токи нулевой последовательности могут возникать только при наличии нулевого провода, т.е. в схеме Y_0 (рис. 6.6). Роль нулевого провода может играть также земля, если нулевая точка заземлена.

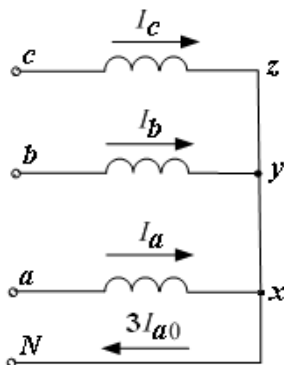


Рис. 6.6. Схема Y_0 трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Следовательно,

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3 \dot{I}_{a0}.$$

В обмотках, соединённых в треугольник, токи $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ составляют ток, циркулирующий по замкнутому контуру треугольника (рис. 6.7), следовательно, токи нулевой последовательности могут возникать только в результате их индуцирования другой обмоткой трансформатора.

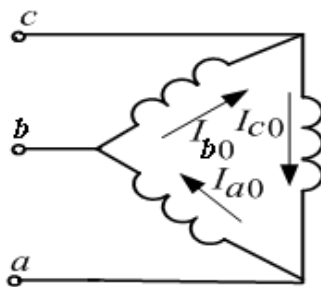


Рис. 6.7. Схема Δ трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности $I_{0п}$, протекая во всех фазах обмотки, создают потоки нулевой последовательности $\Phi_{0п}$, которые во времени совпадают по фазе. В этом отношении они аналогичны третьим гармоникам потока, возникающим из-за насыщения магнитной цепи. В трансформаторах с броневой и бронестержневой конструкцией, в трёхфазной трансформаторной группе, потоки $\Phi_{0п}$ замыкаются по замкнутым сталь-

ным сердечникам, магнитное сопротивление которых мало, и уже небольшие по величине токи $I_{0п}$ создают значительные потоки $\Phi_{0п}$.

В трёхстержневом трансформаторе потоки нулевой последовательности направлены в любой момент времени одинаково, и поэтому замыкаются от одного ярма к другому через воздух, масло и бак трансформатора, магнитное сопротивление относительно велико, а в стенках бака индуцируются вихревые токи, и возникают дополнительные потери.

Потоки нулевой последовательности $\Phi_{0п}$ индуцируют во вторичной и первичной обмотках ЭДС само- и взаимной индукции нулевой последовательности $E_{0п}$. Для токов нулевой последовательности можно построить Т-образную схему замещения.

3. Схемы замещения трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Вид схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности зависит от схем соединения первичной и вторичной обмоток. Рассмотрим основные варианты схем.

3.1. Схема соединения Y_0/Y_0 (рис. 6.8).

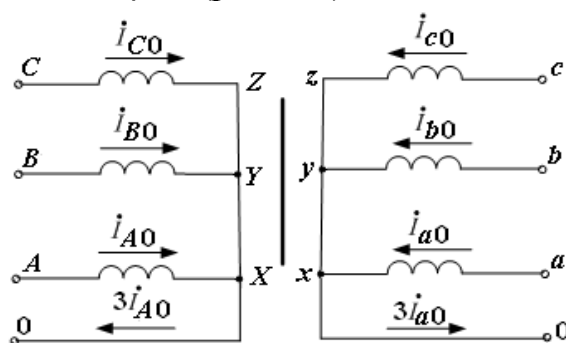


Рис. 6.8. Схема Y_0/Y_0 трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности соединений Y_0/Y_0 показана на рис.6.9.

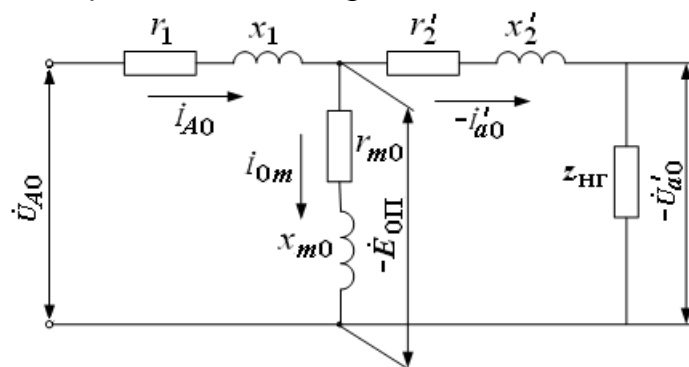


Рис. 6.9. Схема замещения (Y_0/Y_0) трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

На схеме замещения \dot{I}_{0m} – ток намагничивающего контура нулевой последовательности; r_{m0} , x_{m0} – активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура для токов нулевой последовательности. Учитывая, что $\dot{I}_{0m} = (1...2) \% \dot{I}_{A0}$, то намагничивающим контуром можно пренебречь и упростить схему замещения (рис. 6.10).

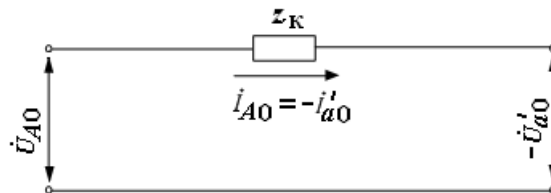


Рис. 6.10. Упрощённая схема замещения (Y_0/Y_0) трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Сопротивление трансформатора для токов нулевой последовательности в схеме соединения Y_0/Y_0 равно:

$$z_{0П} = z_K = z_1 + z/2.$$

3.2. Схема соединения Y_0/Δ (рис. 6.11).

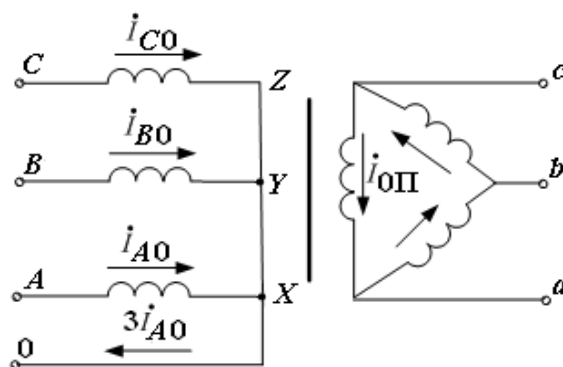


Рис. 6.11. Схема Y_0/Δ трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности соединений Y_0/Δ показана на рис.6.12.

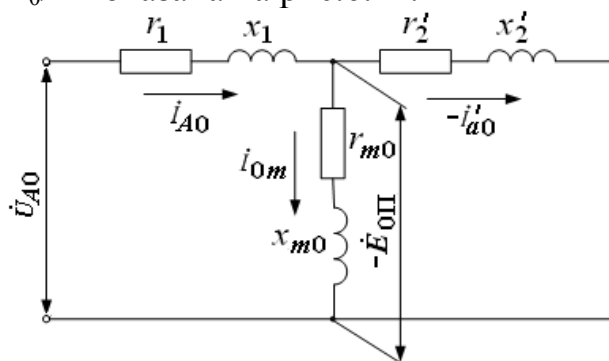


Рис. 6.12. Схема замещения (Y_0/Δ) трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Учитывая, что $I_{0m} = (1...2) \% I_{A0}$, то намагничивающим контуром можно пренебречь и упростить схему замещения (рис. 6.13).

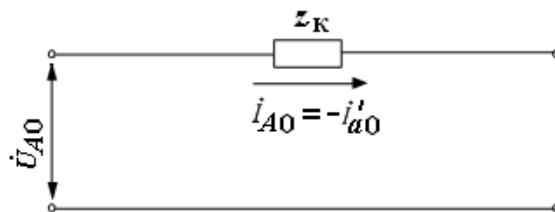


Рис. 6.13. Упрощённая схема замещения (Y_0/Δ) трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Сопротивление трансформатора для токов нулевой последовательности в схеме соединения Y_0/Δ равно:

$$z_{0П} = z_K = z_1 + z/2.$$

3.3. Схема соединения Y/Y_0 (рис. 6.14).

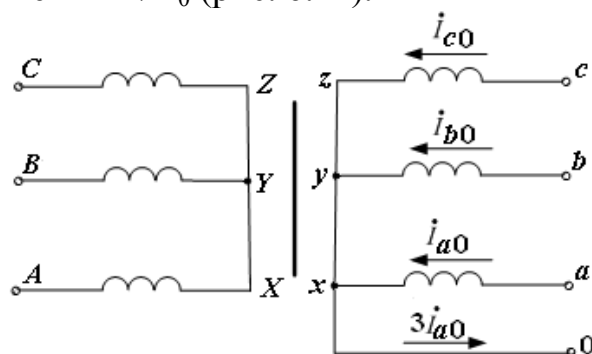


Рис. 6.14. Схема Y/Y_0 трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности соединений Y/Y_0 показана на рис.6.15.

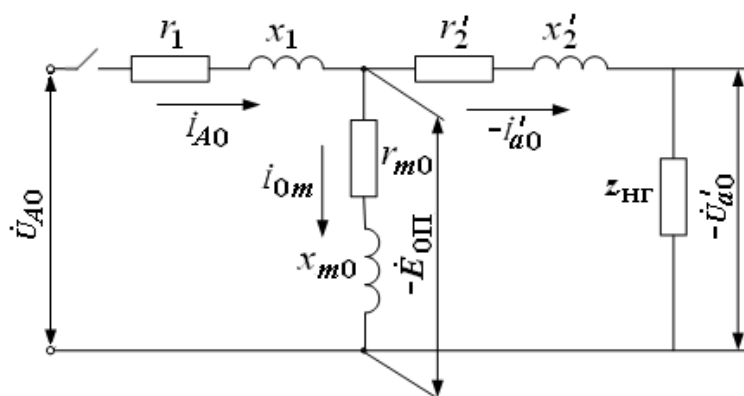


Рис. 6.15. Схема замещения Y/Y_0 трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Поскольку токи нулевой последовательности по схеме «звезда» без нулевого провода протекать не могут, то есть первичная обмотка разомкнута для токов нулевой последовательности, то схему замещения можно изобразить следующим образом (рис. 6.16).

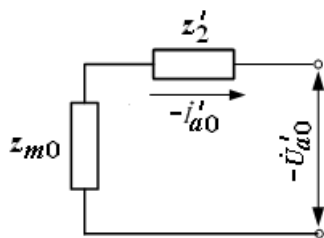


Рис. 6.16. Схема замещения Y/Y_0 трехфазного трансформатора для токов нулевой последовательности

Сопротивление трансформатора для токов нулевой последовательности в схеме соединения Y/Y_0 равно:

$$z_{0\Pi} = z_{m0} + z'_2.$$

Следовательно, $z_{0\Pi}$ в этих схемах достигает значительных величин.

4. Несимметричный режим работы трехфазного трансформатора

4.1. Несимметричный режим работы при наличии токов нулевой последовательности

Рассмотрим несимметричный режим работы для схемы соединения Y/Y_0 . Как было показано ранее,

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \end{cases}$$

Токи нулевой последовательности протекают только по вторичной обмотке и являются чисто намагничивающими, т.к. они не уравниваются токами нулевой последовательности в первичной обмотке. Токи нулевой последовательности создают магнитный поток нулевой последовательности, частоты f_1 , который индуцирует в обеих обмотках ЭДС нулевой последовательности:

$$\dot{I}_{0\Pi} \rightarrow \dot{\Phi}_{0\Pi} \rightarrow \dot{E}_{0\Pi} = -z_{0\Pi} \dot{I}_{0\Pi}.$$

ЭДС нулевой последовательности суммируется с ЭДС прямой последовательности, в результате чего фазные ЭДС будут:

$$\begin{cases} \dot{E}_A = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{0\Pi}; \\ \dot{E}_B = \dot{E}_{B1} + \dot{E}_{0\Pi}; \\ \dot{E}_C = \dot{E}_{C1} + \dot{E}_{0\Pi}. \end{cases}$$

Если пренебречь падением напряжения в обмотке, то фазные напряжения будут равны:

$$\begin{cases} \dot{U}_A \approx -\dot{E}_A; \\ \dot{U}_B \approx -\dot{E}_B; \\ \dot{U}_C \approx -\dot{E}_C. \end{cases}$$

На векторной диаграмме видно искажение системы фазных напряжений (рис. 6.17).

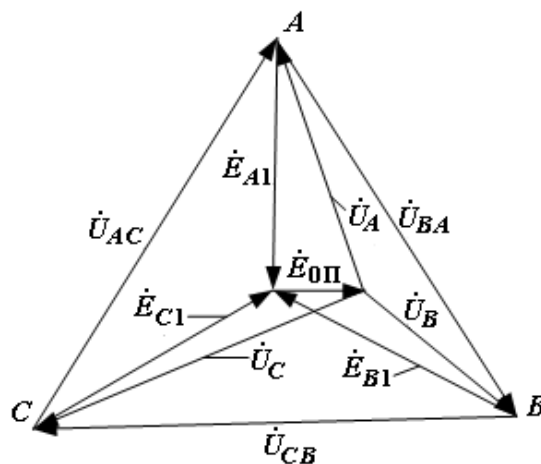


Рис. 6.17. Векторная диаграмма фазных напряжений трехфазного трансформатора при несимметричном режиме работы

Диаграмма вторичных напряжений будет иметь аналогичный вид. Направление и величина вектора ЭДС нулевой последовательности зависит от фазы токов нулевой последовательности и определяется условиями нагрузки. На величину линейных напряжений ЭДС нулевой последовательности не влияет, так как в разности фазных напряжений нулевые составляющие исчезают.

Таким образом, в броневых и бронестержневых трансформаторах соединение Y/Y_0 не применяют, так как искажение системы фазных напряжений бывает уже при незначительных токах нулевой последовательности, или же в данных трансформаторах должна наматываться дополнительная трехфазная третичная обмотка, которая соединяется в «треугольник» и предназначенная для уравнивания токов нулевой последовательности, концы данной обмотки наружу не выводятся. Если она рассчитана также для нагрузки и ее концы выводятся наружу, то получается трехобмоточный трансформатор.

В стержневых трансформаторах с соединением Y/Y_0 искажение системы фазных напряжений меньше, так как $z_{0П} < z_m$. В трансформаторах такого типа соединение Y/Y_0 применяют до мощности $S_H \leq 6\,000$ кВА, при этом ток в нулевом проводе $3I_{0П} \leq 25\% I_H$.

Отметим, что наличие нулевого провода или заземления с обеих сторон трансформатора с соединением обмоток Y_0/Y_0 не дает гарантии уравнивания токов нулевой последовательности, так как сопротивление первичного контура для этих токов может оказаться большим.

4.2. Несимметричные режимы работы при отсутствии токов нулевой последовательности

Если токи нулевой последовательности равны нулю $I_{0п} = 0$, то есть

$$\begin{aligned} I_{A0} = 0; \quad I_{B0} = 0; \quad I_{C0} = 0; \\ I_{a0} = 0; \quad I_{b0} = 0; \quad I_{c0} = 0. \end{aligned}$$

то системы токов первичной и вторичной и обмоток:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2}, \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}; \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2}; \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2}. \end{cases}$$

Если пренебречь намагничивающим током, и считать, что $w_1 = w_2$ (или вторичная обмотка приведена к первичной), то

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{a1}; \\ \dot{I}_{B1} = -\dot{I}_{b1}; \\ \dot{I}_{C1} = -\dot{I}_{c1}, \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{a2}; \\ \dot{I}_{B2} = -\dot{I}_{b2}; \\ \dot{I}_{C2} = -\dot{I}_{c2}. \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} \dot{I}_A = -\dot{I}_a; \\ \dot{I}_B = -\dot{I}_b; \\ \dot{I}_C = -\dot{I}_c. \end{cases}$$

Таким образом, МДС и токи уравниваются в каждой фазе, влияние одних фаз на другие отсутствует, и каждую фазу можно рассматривать в отдельности. Для каждой фазы действительны схемы замещения.

Из сказанного следует, что токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах различной конструкции и с различными соединениями обмоток проявляются и действуют аналогично третьим гармоникам намагничивающего тока и потока. Разница заключается лишь в том, что первые изменяются с основной, а вторые – с трехкратной частотой.

Согласно ГОСТ, система трёхфазных токов считается симметричной, если составляющая обратной последовательности составляет не более 5% от прямой последовательности при отсутствии токов нулевой последовательности.

Лекция 7. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

План лекции

1. Параллельная работа трансформаторов.
2. Специальные типы трансформаторов.

1. Параллельная работа трансформаторов

На повышающих и понижающих трансформаторных подстанциях обычно несколько трансформаторов могут включаться параллельно друг другу для обеспечения следующих требований:

- 1) повышение надёжности электроснабжения;
- 2) создание резерва на случай аварии или ремонта;
- 3) уменьшение потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путём отключения части работающих трансформаторов.

Для оптимизации работы трансформаторов необходимо выполнение следующих условий:

1. Общая нагрузка подстанции должна распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям;

2. В трансформаторах не должно возникать уравнительных токов, а также бросков тока;

3. При подключении трансформаторов на параллельную работу должна быть обеспечена правильная фазировка выводов, то есть на одну и ту же шину включаются такие выводы, напряжения которых совпадают по фазе.

Таким образом, при параллельном включении трансформаторов необходимо обеспечивать следующее.

1. Равенство коэффициентов трансформации трансформаторов:

$$U_{1Н1} = U_{1НII} = \dots = U_{1Нn}; \quad U_{2Н1} = U_{2НII} = \dots = U_{2Нn},$$

или

$$k_I = k_{II} = \dots = k_n,$$

где n – число трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

2. Одинаковые группы соединения обмоток трансформаторов.

3. Равные номинальные напряжения коротких замыканий трансформаторов

$$U_{кН1} = U_{кНII} = \dots = U_{кНn}.$$

Если данные условия не выполняются, то в обмотках трансформаторов при параллельной работе начинают протекать уравнительные токи, которые, если даже невелики и не приводят к аварии, вызывают неравномерную нагрузку, а также излишние потери и нагрев обмоток.

Схема включения трансформаторов на параллельную работу показана на рис. 7.1.

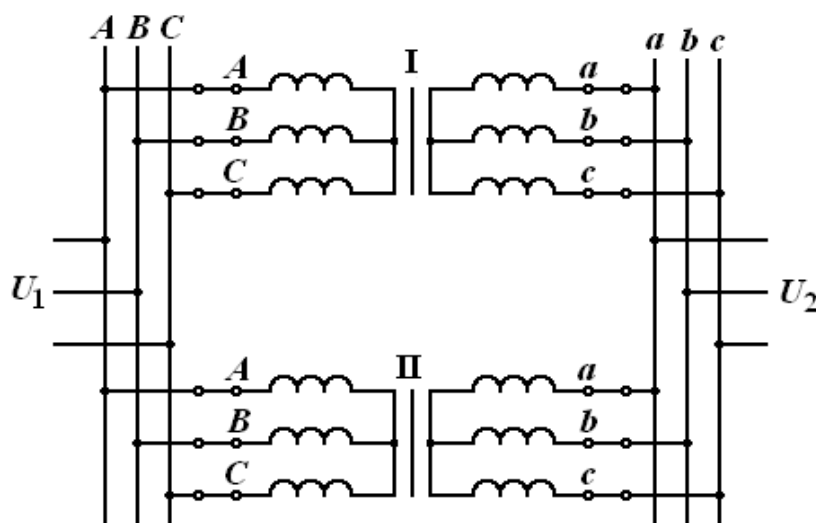


Рис. 7.1. Схема включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу

Первичные обмотки трансформаторов подключаются параллельно на общую сеть, а вторичные – к нагрузке.

При первом включении трансформаторов на параллельную работу необходимо проверить их фазировку, то есть убедиться в том, что на одну и ту же шину включаются такие фазы отдельных трансформаторов, которые совпадают по фазе. Такую простейшую проверку применительно, например, к схеме на рис.7.1 можно провести следующим образом. Включить все указанные на схеме соединители за исключением, например, b и c трансформатора II. Затем при $U_1 \neq 0$ измерить напряжение между выводами каждого разомкнутого соединителя b и c . Если эти напряжения равны нулю, то фазировка правильная.

Рассмотрим необходимость выполнения всех трех условий включения.

1. Равенство коэффициентов трансформации.

Если не выполняется это условие, т.е. $k_I < k_{II}$, то

$$\frac{U_{1ЛI}}{U_{2ЛI}} < \frac{U_{1ЛII}}{U_{2ЛII}}.$$

Так как трансформаторы подключаются на общую сеть, то

$$U_{1ЛI} = U_{1ЛII} = U_{\text{СЕТИ}}.$$

Тогда

$$\frac{U_{\text{СЕТИ}}}{U_{2ЛI}} < \frac{U_{\text{СЕТИ}}}{U_{2ЛII}}, \quad \frac{1}{U_{2ЛI}} < \frac{1}{U_{2ЛII}} \Rightarrow U_{2ЛI} > U_{2ЛII} \Rightarrow E_{2ЛI} > E_{2ЛII}.$$

Следовательно, в замкнутом контуре вторичных обмоток действует разность ЭДС:

$$\Delta \vec{E} = \vec{E}_{2ЛI} - \vec{E}_{2ЛII}.$$

Под действием ЭДС возникает уравнивающий ток (рис. 7.2):

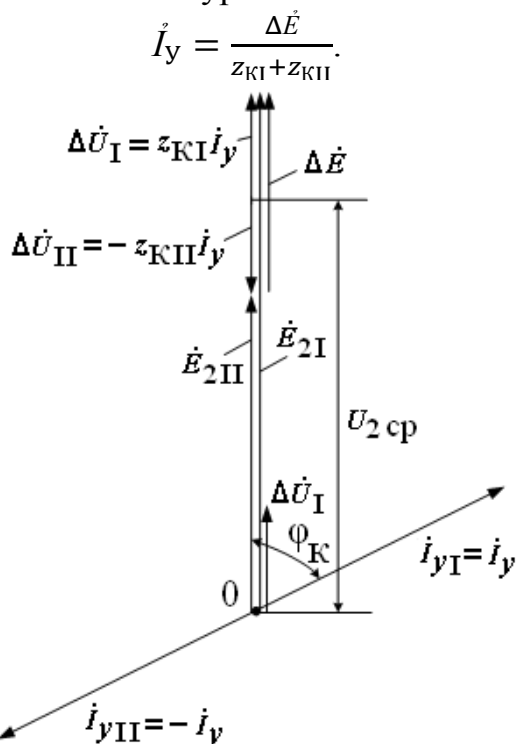


Рис. 7.2. Векторная диаграмма уравнивающего тока

Этот уравнивающий ток имеет во вторичных обмотках трансформатора различные относительно действующих в них ЭДС направления: первый трансформатор отдаёт уравнивающий ток, второй – потребляет. Падения напряжения, вызываемые уравнивающими токами в обмотках, выравнивают вторичные напряжения обмоток. Уравнивающие токи протекают по обмоткам даже в режиме холостого хода. При включении нагрузки в трансформаторе протекают токи нагрузки $I_{HI} = I_{HII} = I_{HG}$. Складываясь с ними, уравнивающие токи вызывают неравенство результирующих токов $I_{2I} \neq I_{2II}$ и неравномерную нагрузку трансформатора (рис. 7.3):

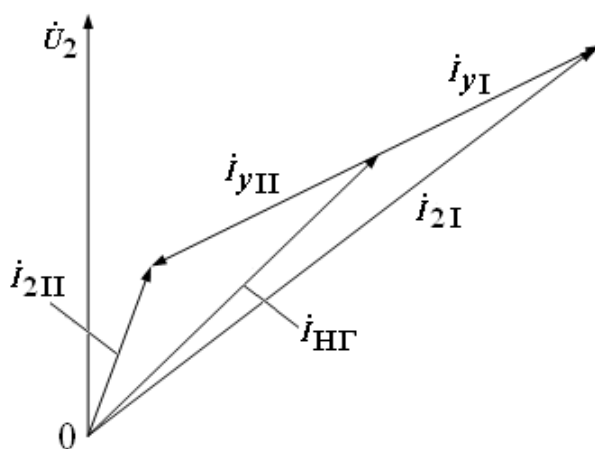


Рис. 7.3. Векторная диаграмма токов при неравномерной нагрузке трансформатора

Таким образом, трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации перегружается, с большим – недогружается. Нормальной работы на общую нагрузку не получается. ГОСТ допускает разницу коэффициентов трансформации не более 1%.

2. Одинаковые группы соединения трансформаторов.

Допустим, на параллельную работу включены два трансформатора со следующими группами:

трансформатор I – Y/Y-0;

трансформатор II – Y/Y-2.

Тогда вторичные ЭДС соответствующих фаз этих трансформаторов будут равны по величине и сдвинуты на 60° (рис. 7.4). Из-за сдвига этих векторов по фазе образуется разница ЭДС, под действием которой протекает уравнивающий ток:

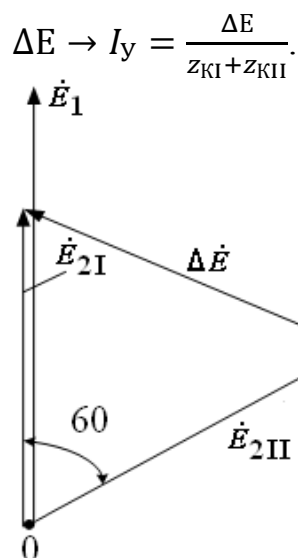


Рис. 7.4. Векторная диаграмма вторичных ЭДС при различии групп соединения трансформаторов

Уравнивающий ток в этом случае: $I_y = (10...20) I_H$, т.е. наличие такого уравнивающего тока в обмотке равносильно режиму короткого замыкания. Таким образом, включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения крайне опасно и недопустимо по требованиям ГОСТ.

3. Одинаковые номинальные напряжения короткого замыкания.

Рассмотрим параллельную работу, когда включены два трансформатора с равными номинальными напряжениями короткого замыкания, с одинаковыми коэффициентами трансформации и группами соединения. Схема подключения показана на рис. 7.5.

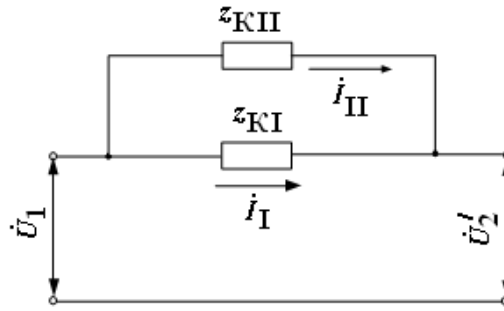


Рис. 7.5. Схема подключения трансформаторов, учитывающая напряжения коротких замыканий

Согласно схеме можно записать

$$I_I z_{KI} = I_{II} z_{KII},$$

где z_{KI} , z_{KII} – комплексные сопротивления короткого замыкания первого и второго трансформаторов.

Следовательно,

$$\frac{\dot{I}_I}{\dot{I}_{II}} = \frac{z_{KII}}{z_{KI}} = \frac{z_{KII} e^{j\varphi_{KI}}}{z_{KI} e^{j\varphi_{KII}}} = \frac{z_{KII}}{z_{KI}} e^{j(\varphi_{KI} - \varphi_{KII})}.$$

Поскольку $\varphi_{KI} \approx \varphi_{KII}$, то

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{KII}}{z_{KI}} = \frac{1}{z_{KI}} : \frac{1}{z_{KII}}.$$

Умножим и разделим правую часть последнего уравнения на $I_{HI} I_{HII}$:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{I_{HI}}{I_{HI} z_{KI}} : \frac{I_{HII}}{I_{HI} z_{KII}}.$$

Также умножим и разделим правую и левую части уравнения на U_H :

$$\frac{I_I U_H}{I_{II} U_H} = \frac{I_{HI} U_H}{I_{HI} z_{KI}} : \frac{I_{HII} U_H}{I_{HII} z_{KII}}.$$

Учтём, что

$$\begin{aligned} I_{HI} z_{KI} &= U_{KI}, \quad I_{HII} z_{KII} = U_{KII}, \\ I_I U_H &= S_I, \quad I_{II} U_H = S_{II}, \\ I_{HI} U_H &= S_{HI}, \quad I_{HII} U_H = S_{HII}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{S_{HI}}{U_{KI}} : \frac{S_{HII}}{U_{KII}}.$$

Откуда следует, что

$$\frac{S_I}{S_{HI}} : \frac{S_{II}}{S_{HII}} = \frac{1}{U_{KI}} : \frac{1}{U_{KII}}.$$

Из последнего выражения можно сделать вывод, что относительные полные мощности – то есть относительная нагрузка – параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания. Если напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов равны, то трансформаторы нагружены рав-

номерно и при повышении нагрузки достигают номинальной мощности одновременно. Если же напряжения короткого замыкания не равны, то при повышении нагрузки номинальной мощности, прежде всего, достигает трансформатор с наименьшим напряжением короткого замыкания. Другие трансформаторы при этом ещё будут недогружены, и в то же время дальнейшее повышение их нагрузки недопустимо, т.к. первый трансформатор будет перегружаться. Таким образом, установленная мощность трансформаторов останется недоиспользованной. Рекомендуется включать на параллельную работу такие трансформаторы, у которых разница напряжений короткого замыкания удовлетворяет условию:

$$\Delta U_{KI} \leq 10\% \left(\frac{U_{KI} + U_{KII} + \dots + U_{Kn}}{n} \right),$$

где n – число трансформаторов, работающих параллельно.

При этом отношение номинальных мощностей должно быть в пределах: 1:3. Допустимые перегрузки трансформаторов нормируются ГОСТом.

2. Специальные типы трансформаторов

2.1. Автотрансформаторы

Автотрансформаторы – это такие трансформаторы, в которых первичная и вторичная обмотки имеют не только электромагнитную связь, но и электрическую. И если в трансформаторах передача энергии осуществляется только за счёт магнитного поля, то в автотрансформаторах – ещё и за счёт электрической связи. В автотрансформаторах первичная обмотка включена в сеть параллельно, а вторичная – последовательно, при этом устройство обмоток и их расположения на стержнях такое же, как и в обычных трансформаторах. Автотрансформатор может служить как для повышения, так и для понижения напряжения. Электрические схемы повышающего трансформатора представлены на рис. 7.6.

В любом случае,

$$\dot{U}_{BH} = \dot{U}_{HH} + \dot{U}_2.$$

Пренебрежём потерями, падениями напряжения в обмотках и намагничивающим током. Тогда ЭДС, ток и напряжения связаны так:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = K_{AT}.$$

С другой стороны, коэффициент трансформации напряжений и токов первичной и вторичной сетей автотрансформатора:

$$K_{TP} = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{I_{HH}}{I_{BH}} \neq \frac{w_1}{w_2}.$$

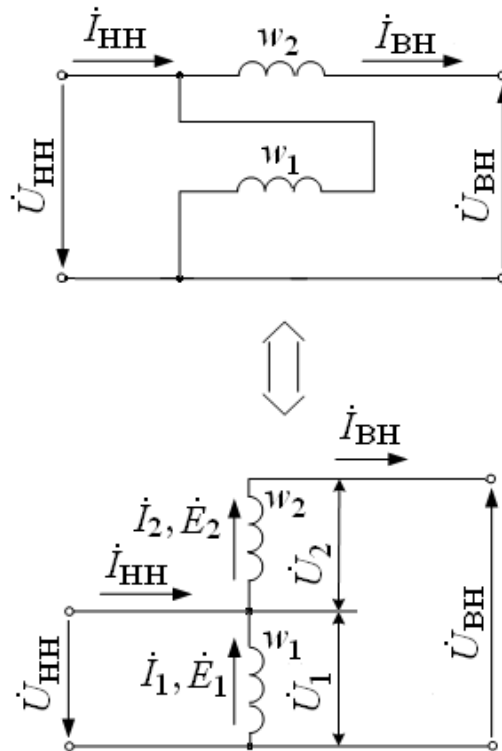


Рис. 7.6. Электрические схемы повышающего трансформатора

В автотрансформаторах не вся мощность передаётся посредством магнитного поля, часть мощности передаётся электрическим путём, следовательно, в автотрансформаторах различают мощности:

1. Проходная (внешняя) мощность, передаваемая из одной сети в другую:

$$S_{\text{ПР}} = U_{\text{НН}} I_{\text{НН}} = U_{\text{ВН}} I_{\text{ВН}}.$$

Расчётная (внутренняя) мощность, передаваемая посредством магнитного поля из первичной обмотки во вторичную:

$$S_{\text{Р}} = E_1 I_1 = E_2 I_2.$$

Проходная мощность больше расчётной $S_{\text{ПР}} > S_{\text{Р}}$, т.к. часть мощности передаётся электрическим путём. Расход материалов, габариты и стоимость автотрансформатора определяется расчётной мощностью, и поэтому в принципе применение автотрансформаторов выгоднее, чем применение обычных двухобмоточных трансформаторов, у которых $S_{\text{ПР}} = S_{\text{Р}}$.

В автотрансформаторах:

$$\frac{S_{\text{Р}}}{S_{\text{ПР}}} = \frac{E_2 I_2}{U_{\text{ВН}} I_{\text{ВН}}} = \frac{(U_{\text{ВН}} - U_{\text{НН}}) I_{\text{ВН}}}{U_{\text{ВН}} I_{\text{ВН}}} = 1 - \frac{1}{K_{\text{ТР}}}.$$

Отсюда следует, что применение автотрансформаторов тем выгоднее, чем ближе $K_{\text{ТР}}$ к единице. Обычно $K_{\text{ТР}} \leq 2,5$. Если обозначить расход (вес) активных материалов автотрансформатора как $G_{\text{АТ}}$, а обычного двухобмоточного трансформатора как $G_{\text{ТР}}$, то

$$G_{AT} = G_{TP} \left(1 - \frac{1}{K_{TP}}\right).$$

Допустим, $K_{TP} = 2$, тогда $G_{AT} = G_{TP} \left(1 - \frac{1}{2}\right) = 0,5G_{TP}$, то есть расход активных материалов автотрансформатора меньше в два раза, чем у обычного двухобмоточного трансформатора.

Напряжения короткого замыкания автотрансформатора и трансформатора связаны аналогичным соотношением:

$$U_{КАТ} = U_{КТР} \left(1 - \frac{1}{K_{TP}}\right).$$

Отсюда, напряжение короткого замыкания автотрансформатора меньше, чем обычного двухобмоточного трансформатора. Это недостаток автотрансформатора, так как ток короткого замыкания больше, чем обычного двухобмоточного трансформатора. Вместе с этим, электрические потери в автотрансформаторе меньше, так как

$$p_{ЭЛ.АТ} = p_{ЭЛ.ТР} \left(1 - \frac{1}{K_{TP}}\right).$$

Следовательно, КПД автотрансформатора больше, чем у обычного двухобмоточного трансформатора.

Потери и напряжение короткого замыкания, отнесенные к расчетной мощности и к номинальному напряжению вторичной обмотки автотрансформатора, примерно такие же, как и в обычных трансформаторах. Однако, если эти величины отнести к проходной мощности и к номинальному напряжению сети, то они примерно в $S_{ПР}/S_P$ меньше, чем в обычных трансформаторах. Это объясняется тем, что обмотка с числом витков w_2 рассчитана только на часть напряжения U_2 и поэтому ее сопротивление меньше, чем в обычном трансформаторе, а в обмотке с числом витков w_1 протекает только часть тока $I_{НН}$. Поэтому КПД передачи энергии при применении автотрансформатора увеличивается, а падение напряжения уменьшаются. Вместе с тем увеличиваются также токи короткого замыкания.

В трехфазных установках обмотки автотрансформаторов обычно соединяют в «звезду». При этом для устранения третьих гармоник в потоках и ЭДС фаз применяется третичная обмотка малой мощности с соединением в «треугольник». Также же находят применение трехобмоточные трансформаторы, в которых обмотки высшего и среднего напряжения имеют автотрансформаторную связь.

Таким образом, применение автотрансформаторов в принципе выгоднее, чем обычных трансформаторов, т.к. у них меньше вес, габариты, потери, выше КПД, чем у обычных двухобмоточных трансформаторов, но необходимо изоляцию каждой обмотки относительно корпуса рассчитывать на напряжение сети высокого напряжения, а также изоляцию потребителей необходимо рассчитать на высокое напряжение.

2.2. Трёхобмоточные трансформаторы

Трёхобмоточные трансформаторы используются на электростанциях для питания распределительных сетей с различными номинальными напряжениями и позволяют достичь экономии в капитальных затратах за счёт установки меньшего числа трансформаторов. Трёхобмоточные трансформаторы могут иметь одну первичную обмотку и две вторичных или две первичных обмотки и одну вторичную. Наиболее распространены трёхобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками. Конструктивное устройство такого трансформатора представлено на рис. 7.7.

При этом на одном стержне располагается несколько обмоток (в случае многообмоточного трансформатора), или 3 обмотки – у трёхобмоточного трансформатора – обмотка низкого напряжения (ОНН), обмотка среднего напряжения (ОСН), обмотка высокого напряжения (ОВН).

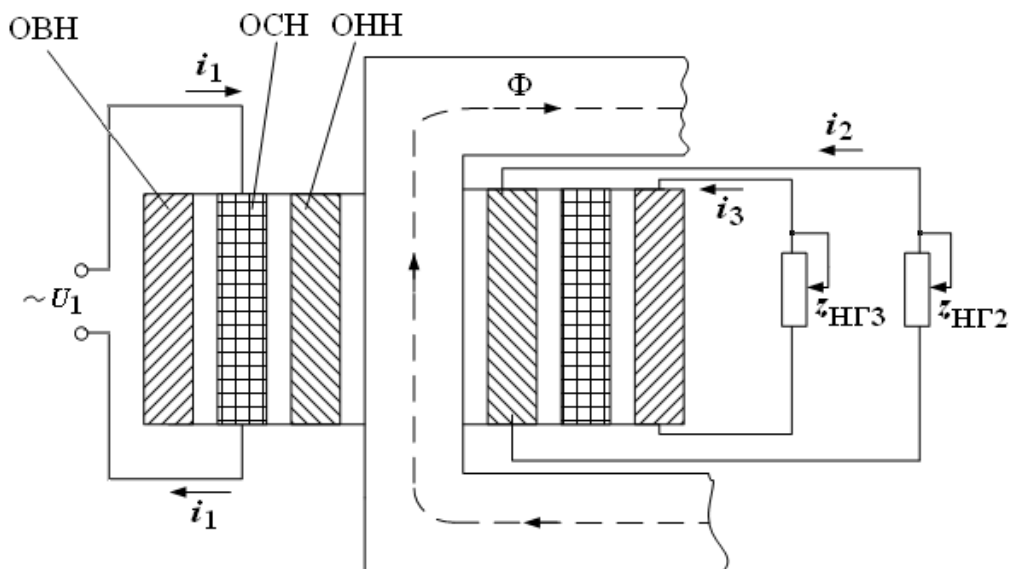


Рис. 7.7. Конструкция трёхобмоточного трансформатора

Обозначим индексами 2 и 3 вторичные обмотки, а первичную – 1. Тогда коэффициенты трансформации будут равны:

$$K_{12} = \frac{U_1}{U_2}; \quad K_{13} = \frac{U_1}{U_3}.$$

Если привести числа вторичных обмоток к числу витков первичной обмотки, то получим уравнения напряжений и токов трёхобмоточного трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2'(r_2' + jx_2') = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2'; \\ \dot{U}_3' = \dot{E}_3' - \dot{I}_3'(r_3' + jx_3') = \dot{E}_3' - \dot{I}_3' z_3'; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' - \dot{I}_3'. \end{cases}$$

Если пренебречь намагничивающим контуром, то получим упрощённую схему замещения (рис. 7.8), векторная диаграмма которой приведена на рис. 7.9.

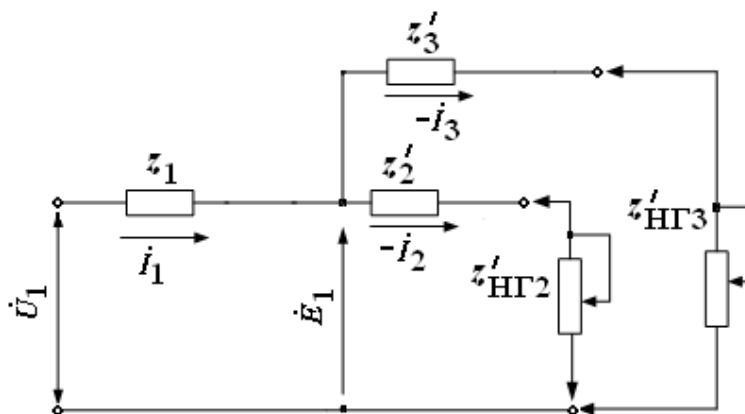


Рис. 7.8. Упрощённая схема замещения трёхобмоточного трансформатора

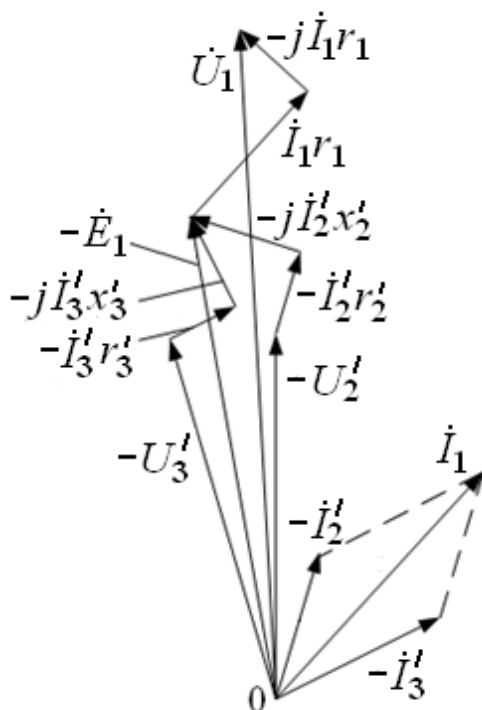


Рис. 7.9. Векторная диаграмма трёхобмоточного трансформатора

Векторная диаграмма показывает, что вторичные цепи взаимно связаны. При изменении нагрузки в одной из вторичных цепей, допустим, \dot{I}'_2 увеличится, ток \dot{I}'_1 также возрастет (согласно правилу Ленца), тогда $\dot{I}'_1 z_1$ тоже увеличится, а, значит, согласно первому уравнению выше приведённой системы уравнений, $-\dot{E}'_1$ уменьшится. Изменение ЭДС влечёт за собой изменение напряжения на обеих вторичных обмотках.

Параметры схемы замещения определяются из опытов короткого замыкания. При этом необходимо провести три опыта короткого замыкания, замыкая по очереди каждую обмотку. Сопротивления намагничивающего контура определяются из опыта холостого хода, как для двухобмоточного трансформатора. Следует отметить, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки расположенной между двумя другими, близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, что формально эквивалентно емкостному сопротивлению, а физически обусловлено особенностями распределения магнитных полей рассеяния.

В настоящее время производятся трёхобмоточные трансформаторы со следующими соотношениями номинальных мощностей трёх обмоток.

100%; 100%; 100%.

100%; 100%; 67%.

100%; 67%; 100%.

67%; 67%; 100%.

За номинальную мощность таких трехобмоточных трансформаторов принимается мощность наиболее мощной (первичной) обмотки. К этой мощности приводятся напряжения короткого замыкания $u_{k12}\%$, $u_{k13}\%$, и $u_{k23}\%$, указываемые в документации трансформатора.

В трёхобмоточных трансформаторах приняты следующие стандартные схемы соединений – $Y/Y_0/\Delta-0-11$; $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. Обмотки указаны в следующей последовательности: ВН, СН (среднего напряжения), НН. Однофазные трансформаторы имеют схему соединения $I/I/I-0-0$.

Трёхобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками и одной вторичной применяются на мощных электростанциях. При этом первичные обмотки имеют одинаковое номинальное напряжение и к ним присоединяется по одному мощному генератору, а вторичная обмотка, имеющая две параллельных ветви, соединяется через подстанцию с линиями электропередач.

Лекция 8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

План лекции

1. Переходный процесс при включении трансформатора.
2. Переходный процесс при коротком замыкании трансформатора.

1. Переходный процесс при включении трансформатора

Переходные процессы в трансформаторе возникают при любом изменении нагрузки или напряжения сети. Во время переходных процессов токи трансформатора могут во много раз превышать их номинальные значения, что может привести к недопустимому возрастанию электромагнитных сил, действующих на обмотки, и температуры обмоток. Анализ переходных процессов в трансформаторе позволяет принимать обоснованные решения при разработке его конструкции и формировании требований к условиям эксплуатации трансформатора и средствам его защиты.

Рассмотрим переходный процесс при включении однофазного трансформатора в сеть с напряжением $u_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \psi)$. Вторичную обмотку для простоты будем полагать разомкнутой (рис.8.1). При этих условиях процессы в трансформаторе описываются уравнением

$$u_1 = r_1 i_\mu + w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

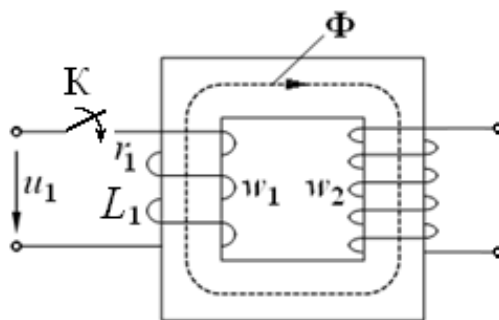


Рис.8.1. Схема включения трансформатора

Связь потока взаимной индукции Φ с током i_μ определяется нелинейной магнитной характеристикой $\Phi(i_\mu)$, поэтому приведенное выше уравнение не имеет строгого аналитического решения. Учитывая, что в силовых трансформаторах падение напряжения $r_1 i_\mu$ незначительно из-за малости активного сопротивления r_1 , заменим ток i_μ , используя линеаризованную магнитную характеристику

$$i_{\mu} \cong \frac{w_1 \Phi}{L_1},$$

где L_1 – статическая индуктивность первичной обмотки, соответствующая среднему значению потока в переходном процессе.

Такая замена позволяет линеаризовать вышеприведенное уравнение напряжения u_1 :

$$\frac{u_1}{w_1} = \frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}.$$

Решение данного уравнения записывается в виде суммы двух составляющих потока:

$$\Phi = \Phi_{уст} + \Phi_{св}.$$

Установившееся значение потока $\Phi_{уст}$ определяется из линеаризованного уравнения напряжения u_1 при $d/dt = j\omega$:

$$\Phi_{уст} = \frac{U_{1m} \cos(\omega t + \psi - \varphi)}{w_1 \sqrt{\left(\frac{r_1}{L_1}\right)^2 + \omega^2}} \approx \frac{U_{1m} \cos(\omega t + \psi - 90^\circ)}{\omega w_1}.$$

Свободная составляющая $\Phi_{св} = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t}$ представляет собой решение однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{d\Phi_{св}}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi_{св} = 0.$$

Постоянная интегрирования C определяется из начальных условий: $\Phi(0) = 0$.

Подставляя полученные значения в уравнение потока Φ , получим

$$0 = \frac{U_{1m} \cos(\psi - 90^\circ)}{\omega w_1} + C.$$

Отсюда

$$C = -\Phi_m \sin \psi,$$

где $\Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega w_1}$.

С учетом полученных соотношений решение линеаризованного уравнения напряжения u_1 можно представить в виде

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi) - \Phi_m \sin \psi \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t}.$$

Следует отметить, что свободный ток представляет собой реакцию инерционной, обладающей индуктивностью цепи на импульс, стремящийся изменить ее режим. Этот свободный ток «сглаживает» переход к новому режиму, не допуская мгновенных конечных по значению изменений тока, которые в инерционной цепи невозможны.

Характер переходного процесса зависит от начальной фазы ψ напряжения сети в момент включения трансформатора. При $\psi = 0^\circ$ свободная составляющая тока равна нулю и в цепи сразу формируется установившийся

режим. При $\psi = \pm 90^\circ$ свободная составляющая имеет наибольшее значение (рис. 8.2). В этом случае поток Φ через полпериода после включения $\omega t = \pi$ имеет максимальное значение $\Phi_{\max} \approx 2\Phi_m$, так как свободная составляющая затухает очень медленно из-за малости r_1 . Почти удвоенное значение потока Φ приводит к сильному насыщению магнитопровода трансформатора.

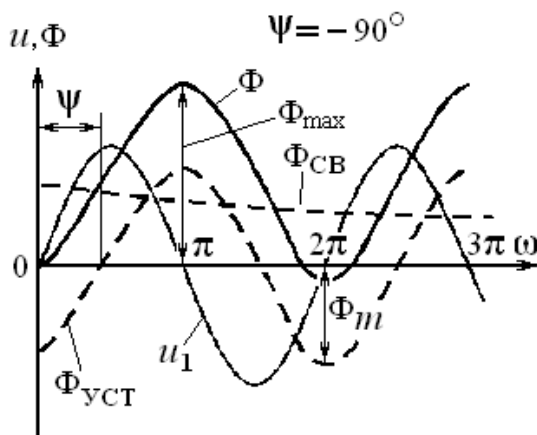


Рис.8.2. Переходной процесс включения трансформатора

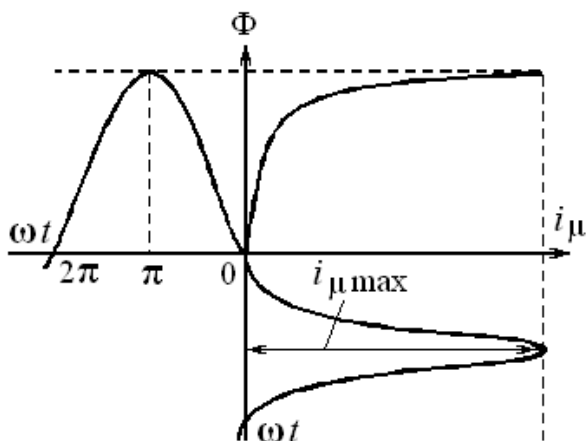


Рис.8.3 Изменение тока включения трансформатора при насыщенном магнитопроводе

Практика показывает, что во многих случаях при насыщении магнитопровода максимальные значения тока включения могут превышать амплитуду установившегося тока холостого хода в 100...150 раз (рис. 8.3) и, соответственно в несколько раз амплитуду номинального тока. Такие броски тока включения вызывают осложнения при конструировании и настройке защитных токовых реле трансформаторов, так как могут вызвать ложное срабатывание этих реле при включении трансформатора на холостом ходу.

2. Переходный процесс при коротком замыкании трансформатора

В условиях эксплуатации короткие замыкания обычно возникают внезапно в результате различного рода аварий в электрических сетях. При этом в трансформаторе происходит переходный процесс, сопровождающийся большими значениями токов в обмотках. Анализ переходного процесса позволяет при внезапном коротком замыкании оценить уровень этих токов в зависимости от различных влияющих факторов.

Ограничимся рассмотрением процесса короткого замыкания однофазного трансформатора, работавшего до этого в режиме холостого хода (рис. 8.4). Примем допущение, что напряжение сети $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$, не зависит от режима работы трансформатора, а также будем полагать, что магнитопровод трансформатора во время короткого замыкания не

насыщен, поскольку поток взаимоиндукции Φ при коротком замыкании снижается почти вдвое из-за сильного размагничивающего действия токов вторичной обмотки (см. п. 1 в лекции № 4 «Режим короткого замыкания и параметры трансформатора»).

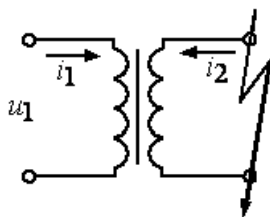


Рис.8.4. Схема короткого замыкания трансформатора

Указанное допущение позволяет пренебречь током намагничивания и положить в основу расчета тока внезапного короткого замыкания упрощенную схему замещения (рис. 8.5). Процессы в этой схеме описываются линейным дифференциальным уравнением

$$u_1 = r_k i_1 + L_k \frac{di_1}{dt}.$$

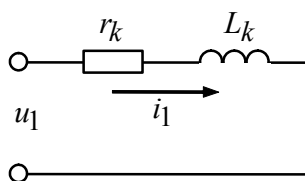


Рис. 8.5. Упрощенная схема замещения трансформатора при коротком замыкании

Решение данного уравнения имеет вид

$$i_1 = i_{1\text{уст}} + i_{1\text{св}}.$$

Установившаяся составляющая $i_{1\text{уст}}$ представляет собой частное решение вышеприведенного уравнения напряжения u_1 :

$$i_{1\text{уст}} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) = I_{km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k),$$

где φ_k – фазный угол при коротком замыкании.

Свободная составляющая $i_{1\text{св}} = C e^{-\frac{r_k}{L_k} t}$ определяется из однородного дифференциального уравнения

$$r_k i_{1\text{св}} + L_k \frac{di_{1\text{св}}}{dt} = 0.$$

Для нахождения постоянной интегрирования C зададим начальные условия в момент возникновения короткого замыкания: $i_1(0) = 0$.

Подставляя полученные значения в уравнение тока i_1 , получим

$$0 = I_{km} \sin(\psi - \varphi_k) + C.$$

Отсюда $C = -I_{km} \sin(\psi - \varphi_k)$. С учетом полученных соотношений выражение для тока короткого замыкания i_1 можно представить в виде

$$i_1 = I_{km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{km} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{r_k t}{L_k}}.$$

Полученное выражение показывает, что свободная составляющая тока короткого замыкания i_1 имеет нулевое значение при $\psi = \varphi_k$ и $\psi = \varphi_k - \pi$ и ток короткого замыкания сразу приобретает установившееся значение. При $\psi = \varphi_k + \pi/2$ свободный ток имеет наибольшее значение, и ток короткого замыкания достигает своего максимального значения приблизительно через полпериода после момента короткого замыкания, то есть при $\omega t \approx \pi$. Переходные процессы практически заканчиваются у малых трансформаторов в течение одного периода, а у больших – в течение 6 – 7 периодов.

Изменение тока i_1 при коротком замыкании для случая $\psi = \varphi_k + \pi/2$ показано на рис. 8.6. При этих условиях максимальное, или *ударное*, значение тока короткого замыкания $i_{1\max}$ почти в два раза превышает его установившееся значение $i_{1\text{уст}}$

$$i_{1\max} = I_{km} \left(1 + e^{-\frac{r_k}{\omega L_k} \pi} \right).$$

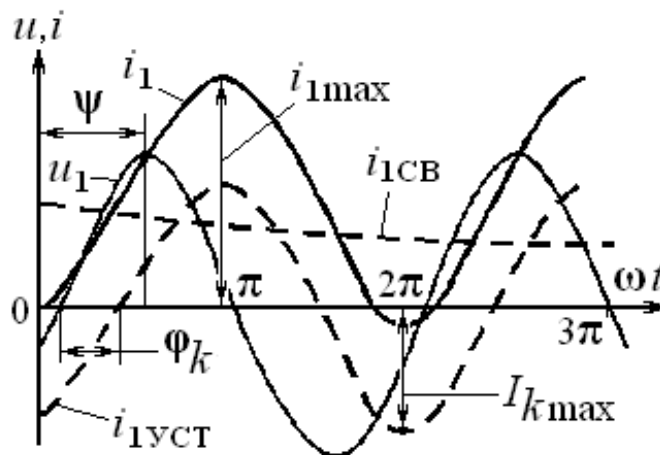


Рис.8.6. Изменение тока короткого замыкания трансформатора

Множитель в скобках последнего выражения называется *ударным коэффициентом* и показывает во сколько раз ударный ток короткого замыкания больше амплитуды установившегося тока короткого замыкания. В зависимости от значения $r_k/\omega L_k$ этот коэффициент может изменяться в пределах $k_{уд} = 1 \dots 2$. Для мощных трансформаторов $k_{уд} = 1,7 \dots 1,8$, а для малых $k_{уд} = 1,2 \dots 1,3$.

Ток I_{km} можно выразить через напряжение короткого замыкания трансформатора,

$$I_{km} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1H}}{u_k^*},$$

а коэффициент затухания $\frac{r_k}{\omega L_k}$ через его составляющие,

$$\frac{r_k}{\omega L_k} = \frac{u_{ka}^*}{u_{kr}^*}.$$

Для силовых трансформаторов

$$u_k^* = 0,05 \dots 0,1; \quad u_{ka}^*/u_{kr}^* = 0,15 \dots 0,2.$$

При этих параметрах максимальный ток может достигать значений

$$i_{1\max} = (20 \dots 35) I_H.$$

Действие этого тока выражается в увеличении нагрева обмоток и в значительном возрастании электромагнитных сил, действующих на обмотки. В современных энергосистемах применяют быстродействующую релейную защиту, отключающую аварийный участок за $0,3 \dots 0,5$ с. За это время трансформатор не успеет нагреться до предельно допустимой температуры.

Более опасным является действие электромагнитных сил, обусловленных взаимодействием поля рассеяния обмоток трансформатора с током, протекающим по этим обмоткам. На обмотки действуют электромагнитные силы двоякого рода:

радиальные силы, стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть наружную обмотку в радиальном направлении;

аксиальные силы, стремящиеся сжать обмотку в аксиальном направлении.

При отключении части витков (например, при регулировании напряжения) распределение сил меняется, что также приводит к изменению действующих электромагнитных сил. При этом заметно возрастают аксиальные силы.

Сила, приходящаяся на единицу длины проводника, определяется произведением индукции поля рассеяния на ток $F = Bi$. В нормальных режимах эта сила невелика. Например, при токе $i = 100$ А и индукции $B = 0,1$ Тл сила $F = 0,1 \cdot 100 = 10$ Н/м. Такая сила не представляет опасности для проводника.

При коротком замыкании произведение Bi возрастает пропорционально i^2 , поэтому электромагнитные силы превышают их значения в рабочих режимах в сотни раз. Эти силы пульсируют с частотой 100 Гц, вызывая вибрацию и деформацию обмоток. При механических напряжениях, превышающих $50 \dots 60$ Н/мм², деформации становятся необратимыми и обмотка разрушается. Поэтому обмотку трансформатора необходимо конструировать таким образом, чтобы ее витки и катушки были прочно укреплены и способны без заметных деформаций выдерживать большие механические силы, возникающие в процессе короткого замыкания.

Раздел 3

ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ЗНАНИЙ

- 3.1. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к лабораторным работам.*
- 3.2. Тесты, используемые при допуске к лабораторным работам и их защите.*
- 3.3. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к экзамену.*
- 3.4. Тесты, используемые при поступлении в магистратуру.*
- 3.5. Тесты и задачи, используемые на студенческих олимпиадах.*

Первый, второй и третий представленные фонды предназначены для оценки знаний студентов высших учебных заведений, обучающихся по основной образовательной программе бакалавриата с направлением подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация 140400.62 «бакалавр»).

Четвертый фонд используется для оценки знаний раздела «Трансформаторы», у поступающих в магистратуру с направлением подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация 140400.68 «магистр»).

Пятый фонд может быть использован для подготовки обучающихся к участию во Всероссийских студенческих олимпиадах по электромеханике.

3.1. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к лабораторным работам

Изучение раздела «Трансформаторы» предусматривает выполнение двух лабораторных работ – № 4 «Исследование трёхфазного двухобмоточного трансформатора» и № 5 «Параллельная работа трансформаторов» [3, 4].

3.1.1. При подготовке к лабораторной работе № 4 необходимо, используя конспект лекций и рекомендуемую литературу, ответить на следующие контрольные вопросы.

3.1.1.1. Что такое коэффициент трансформации трансформатора и как он определяется?

3.1.1.2. Что такое номинальный режим работы трансформатора и какие номинальные величины указываются в паспортных данных?

3.1.1.3. Какие параметры трансформатора нормируются ГОСТом?

3.1.1.4. Для чего служит ферромагнитный магнитопровод в трансформаторе?

- 3.1.1.5. Что такое приведённый трансформатор?
- 3.1.1.6. Параметры схемы замещения трансформатора и их соотношение.
- 3.1.1.7. Основные уравнения приведённого трансформатора.
- 3.1.1.8. Ток холостого хода и его составляющие. В каких пределах находится относительное значение тока холостого хода?
- 3.1.1.9. Является ли зависимость $I_0 = f(U_1)$ прямолинейной или криволинейной и почему?
- 3.1.1.10. На что расходуется подводимая активная мощность P_0 в режиме холостого хода?
- 3.1.1.11. Что называется номинальным напряжением короткого замыкания трансформатора?
- 3.1.1.12. Из какого опыта можно определить электрические потери трансформатора?
- 3.1.1.13. Как зависят составляющие напряжения короткого замыкания от мощности трансформатора?
- 3.1.1.14. Как изменяются электрические и магнитные потери в зависимости от напряжения?
- 3.1.1.15. Почему при индуктивной нагрузке вторичное напряжение трансформатора уменьшается, а при емкостной – увеличивается?
- 3.1.1.16. При каком условии КПД трансформатора имеет максимальное значение?

3.1.2. *При подготовке к лабораторной работе № 5 необходимо, используя конспект лекций и рекомендуемую литературу, ответить на следующие контрольные вопросы.*

- 3.1.2.1. Какие схемы соединения обмоток трёхфазных трансформаторов вы знаете?
- 3.1.2.2. Какой принцип положен в основу определения групп соединений обмоток трансформаторов.
- 3.1.2.3. От каких факторов зависит группа соединений обмоток трансформаторов? Сколько групп возможно у трёхфазных трансформаторов? Назовите стандартные группы соединений обмоток трансформаторов.
- 3.1.2.4. Какие существуют методы опытного определения группы соединений обмоток трансформатора? В чём заключается сущность метода вольтметра.
- 3.1.2.5. Какие условия необходимо выполнить для параллельной работы трансформаторов?
- 3.1.2.6. Почему при неодинаковых коэффициентах трансформации нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно?

3.1.2.7. С какими различиями коэффициентов допустима параллельная работа трансформаторов?

3.1.2.8. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами при неодинаковых напряжениях короткого замыкания.

3.1.2.9. Какое различие между напряжениями короткого замыкания допускается при параллельной работе трансформаторов? В каких пределах при этом должно находиться отношение номинальных мощностей трансформаторов?

3.1.2.10. Почему недопустимо включение на параллельную работу трансформаторов с различными группами соединения обмоток?

3.2. Тесты, используемые при допуске к лабораторным работам и их защите

Для определения готовности студентов к проведению лабораторных работ по разделу «Трансформаторы» проводится тестирование. Вопросы, используемые в тестах, приведены ниже. Тесты также могут использоваться преподавателем при защите отчетов по результатам лабораторных работ.

На каждый вопрос теста предлагается от трех до восьми ответов, причем правильных ответов может быть несколько. При ответе отмечаются все правильные ответы на каждый вопрос. Как правило, тест считается сданным удовлетворительно при наличии **всех правильных ответов** на **три** вопроса из пяти.

3.2.1. Как при росте емкостной (или индуктивной) нагрузки изменяется напряжение U_2 трансформатора (при $U_1 = \text{const}$)?

- 1) Не изменяется.
- 2) Уменьшается.
- 3) Увеличивается.

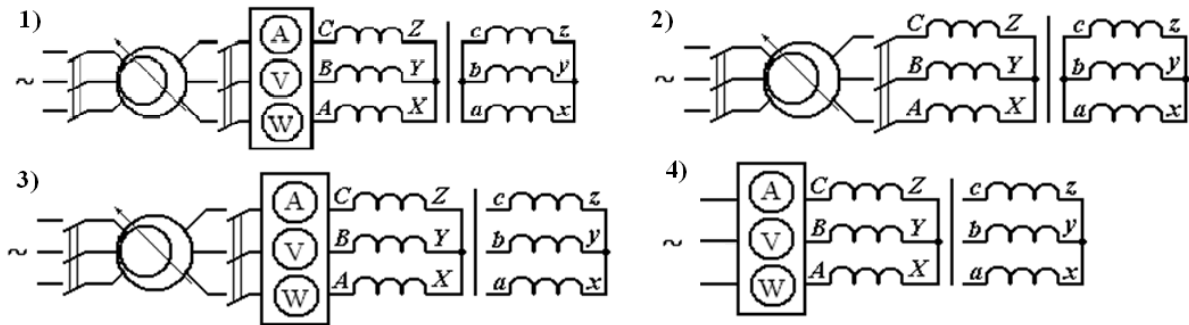
3.2.2. Как определяются электрические (или магнитные) потери трансформатора?

- 1) Из опыта нагрузки.
- 2) Из опыта короткого замыкания.
- 3) Из опыта холостого хода.
- 4) Из паспортных данных трансформатора.
- 5) Все ответы правильные.
- 6) Нет правильного ответа.

3.2.3. Как может быть записано номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора?

- 1) $U_{K\alpha\%} = \frac{I_{1H} \cdot r_{K75^\circ}}{U_{1H}} \cdot 100\%$.
- 2) $U_{K\%} = \frac{I_{1H} \cdot Z_{K75^\circ}}{U_{1H}} \cdot 100\%$.
- 3) $U_{K\%} = \frac{U_{1H}}{I_{1H} \cdot Z_{K75^\circ}} \cdot 100\%$.
- 4) $U_{K\%} = \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}} \cdot 100\%$.
- 5) $U_{K\%} = \frac{P_{1H}}{I_{1H}} \cdot 100\%$.
- 6) $U_{K\%} = \frac{U_{1K} \cdot I_{1K}}{P_{1K}} \cdot 100\%$.
- 7) Нет правильного ответа.

3.2.4. Какой вид имеет схема для проведения опыта холостого хода трансформатора?



3.2.5. Какие параметры схемы замещения трансформатора можно определить из опыта холостого хода?

- 1) $(z_1 \text{ и } z_2)$. 2) $(r_1 \text{ и } r_2)$. 3) $(z_1 + z_m) \text{ и } (r_1 + r_m)$.
 4) $(z_2 + z_m) \text{ и } (r_2 + r_m)$. 5) $(z_1 + z_2) \text{ и } (r_1 + r_2)$.

3.2.6. Как изменяются магнитные потери при увеличении подводимого напряжения?

- 1) Потери увеличиваются. 2) Потери уменьшаются.
 3) Потери не изменяются.

3.2.7. Как можно записать коэффициент мощности трехфазного трансформатора, работающего в режиме холостого хода? (Здесь U_1 – фазное напряжение холостого хода).

- 1) $\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{10}}$. 2) $\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{Q_{10}}$. 3) $\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{3 \cdot U_1 \cdot I_{10}}$.
 4) $\cos \varphi_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{10}}{P_{10}}$. 5) $\cos \varphi_0 = \frac{Q_{10}}{P_{10}}$. 6) $\cos \varphi_0 = \frac{3 \cdot U_1 \cdot I_{10}}{P_{10}}$.

3.2.8. Как при росте индуктивной нагрузки изменяется напряжение U_2 трансформатора (при $U_1 = \text{const}$)?

- 1) Не изменяется. 2) Уменьшается. 3) Увеличивается.

3.2.9. При каком условии КПД трансформатора имеет максимальное значение?

- 1) При коэффициенте нагрузки равном единице.
 2) При электрических потерях равных магнитным потерям.
 3) При полном сопротивлении намагничивающего контура равном полному сопротивлению обмоток.
 4) При коэффициенте мощности равном единице.

3.2.10. Какой опыт необходимо провести, чтобы определить коэффициент трансформации?

- 1) Опыт холостого хода.
- 2) Опыт короткого замыкания.
- 3) Опыт нагрузки.
- 4) Опыт несимметричного питания.

3.2.11. Какие параметры трансформатора не нормируются ГОСТом?

- 1) Номинальное линейное напряжение.
- 2) Ток холостого хода при номинальном напряжении.
- 3) Номинальное напряжение короткого замыкания.
- 4) Полная номинальная мощность.
- 5) Номинальное сопротивление короткого замыкания.

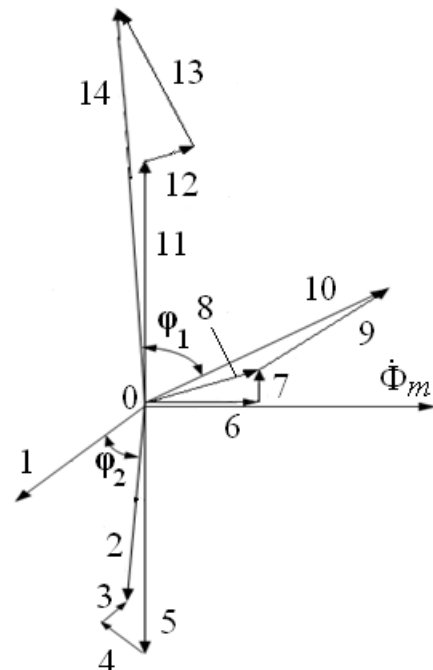
3.2.12. Какие сопротивления являются параметрами короткого замыкания трансформатора?

- 1) $(r_1, x_1 \text{ и } z_1)$.
- 2) $(r'_2, x'_2 \text{ и } z'_2)$.
- 3) $(r_m, x_m \text{ и } z_m)$.
- 4) $(r_1 + r'_2, x_1 + x'_2 \text{ и } z_1 + z'_2)$.
- 5) $(r_1 + r_m, x_1 + x_m \text{ и } z_1 + z_m)$.
- 6) Все ответы правильные.
- 7) Нет правильного ответа.

3.2.13. Как изменяются электрические потери трансформатора при увеличении подводимого напряжения U_1 ?

- 1) Увеличиваются.
- 2) Уменьшаются.
- 3) Не изменяются.

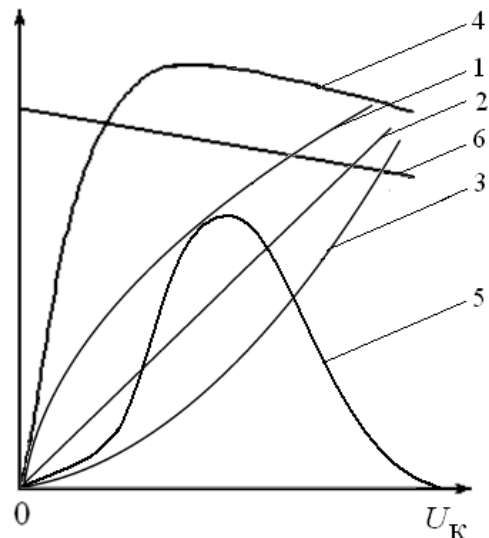
3.2.14. Укажите на диаграмме вектор намагничивающего тока (или вектор тока вторичной обмотки, или вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния вторичной обмотки) трансформатора.



3.2.15. Каким образом можно определить активное и полное сопротивление намагничивающего контура схемы замещения?

- 1) Из опыта нагрузки.
- 2) Из опыта короткого замыкания.
- 3) Из опыта холостого хода.
- 4) Из паспортных данных трансформатора.
- 5) Все ответы правильные.
- 6) Нет правильного ответа.

3.2.16. Укажите на рисунке зависимость тока короткого замыкания $I_K = f(U_K)$ (или зависимость мощности короткого замыкания $P_K = f(U_K)$) трансформатора.



3.2.17. Номинальным напряжением короткого замыкания трансформатора называется следующее определение.

1) Напряжение трансформатора, подводимое в режиме короткого замыкания к первичной обмотке, при котором по обеим обмоткам протекают ударные токи короткого замыкания.

2) Напряжение, подводимое в режиме короткого замыкания к первичной обмотке, при котором по обеим обмоткам протекают номинальные токи.

3) Напряжение, подводимое в режиме короткого замыкания к первичной обмотке, при котором по первичной обмотке протекает номинальный ток;

4) Номинальное напряжение трансформатора;

5) Максимально допустимое напряжение, которое можно подать в режиме короткого замыкания на первичную обмотку.

3.2.18. В уравнениях напряжения приведенного трансформатора, выражение E_1 расшифровывается следующим определением.

1) ЭДС, наводимая потоком рассеяния первичной обмотки в первичной обмотке.

2) ЭДС, наводимая потоком рассеяния вторичной обмотки в первичной обмотке.

3) ЭДС, наводимая результирующим магнитным потоком в первичной обмотке.

3.2.19. Для чего (принципиально) служит ферромагнитный магнито-провод в трансформаторе?

- 1) Для увеличения КПД.
- 2) Для увеличения подводимой мощности.
- 3) Для повышения коэффициента мощности.
- 4) Для создания и проведения магнитного потока.
- 5) Для проведения электрического тока.

3.2.20. Как изменяют подводимое напряжение U_1 при проведении опыта короткого замыкания?

- 1) Подводимое напряжение увеличивают до значения, при котором ток короткого замыкания становится равным $(25 \dots 50)\% I_{1H}$.
- 2) Подводимое напряжение увеличивают до значения $(1,25 \dots 1,5) U_{1H}$.
- 3) Подводимое напряжение увеличивают до значения, при котором ток короткого замыкания становится равным $(1,25 \dots 1,5) I_{1H}$.
- 4) Подводимое напряжение увеличивают до значения, $(5 \dots 10)\% U_{1H}$.

3.2.21. Действие трансформатора основано на принципе, изложенном в следующем законе.

- 1) В первом законе Кирхгофа.
- 2) Во втором законе Кирхгофа.
- 3) В законе Ома.
- 4) В законе Кулона.
- 5) В законе электромагнитной индукции.
- 6) В законе полного тока.

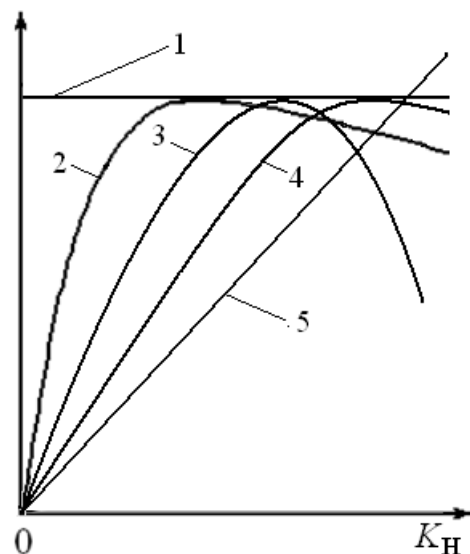
3.2.22. Укажите правильное соотношение между активной и реактивной мощностью трансформатора, работающего в режиме холостого хода (или в режиме короткого замыкания).

- 1) $P_0 > Q_0$.
- 2) $P_0 = Q_0$.
- 3) $P_0 \sim Q_0$.
- 4) $P_0 < Q_0$.

3.2.23. В каких пределах допускается регулировать напряжение U_1 подводимое к трансформатору, работающему в режиме холостого хода?

- 1) $(0,5 \dots 1) \% \cdot U_H$.
- 2) $(2 \dots 10) \% \cdot U_H$.
- 3) $(20 \dots 50) \% \cdot U_H$.
- 4) $(0,5 \dots 1,25) \cdot U_H$.
- 5) $(1,25 \dots 2) \cdot U_H$.

3.2.24. Укажите на рисунке зависимость КПД от нагрузки: $\eta = f(K_H)$.



3.2.25. Как определяется коэффициент полезного действия трансформатора?

1) Как отношение активной мощности на входе первичной обмотки к полной мощности на входе первичной.

2) Как отношение активной мощности на входе первичной обмотки к активной мощности на выходе вторичной.

3) Как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки к активной мощности на входе первичной обмотки.

4) Как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки к полной мощности на выходе вторичной обмотки.

3.2.26. В каких пределах находится номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора?

1) $U_K = (0,5 \dots 1)\% \cdot U_N$.

2) $U_K = (5 \dots 10)\% \cdot U_N$.

3) $U_K = (10 \dots 20)\% \cdot U_N$.

4) $U_K = (20 \dots 50)\% \cdot U_N$.

5) $U_K = U_N$.

6) $U_K = (1,2 \dots 1,5) \cdot U_N$.

3.2.27. Какие параметры схемы замещения трансформатора можно определить из опыта холостого хода?

1) $(z_1 \text{ и } z'_2)$.

2) $(r_1 \text{ и } r'_2)$.

3) $(z_1 + z_m) \text{ и } (r_1 + r_m)$.

4) $(z'_2 + z_m) \text{ и } (r'_2 + r_m)$.

5) $(z_1 + z'_2) \text{ и } (r_1 + r'_2)$.

3.2.28. Приведенным называется следующий трансформатор.

1) Трансформатор, холостой ход которого близок или равен 0.

2) Трансформатор, относительная мощность которого равна 1.

3) трансформатор, вторичное напряжение которого равно 0.

4) Трансформатор, коэффициент трансформации которого равен 1.

3.2.29. Относительное значение тока холостого хода находится в следующем диапазоне.

1) $0,005 \dots 0,04$.

2) $0,04 \dots 0,10$.

3) $0,1 \dots 0,4$.

4) $0,4 \dots 1$.

5) $0,25 \dots 1,25$.

6) $0,5 \dots 4$.

3.2.30. Как изменяются намагничивающий и первичный токи трансформатора в случае увеличения вторичного тока при активно-индуктивном характере нагрузки?

1) I_1 увеличивается, I_0 уменьшается.

2) I_1 уменьшается, I_0 увеличивается.

3) I_1 не изменяется, I_0 уменьшается.

4) I_1 увеличивается, I_0 не изменяется.

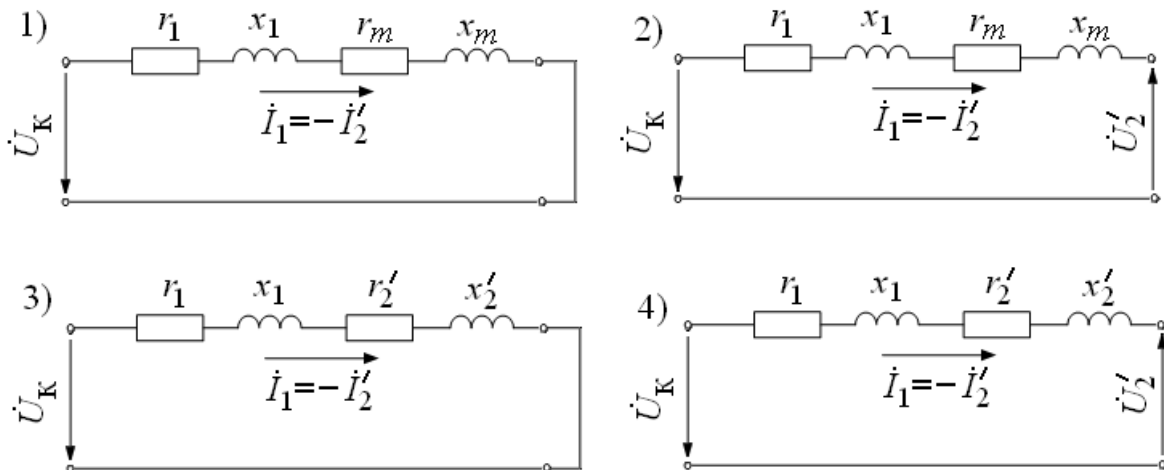
3.2.31. Из опыта короткого замыкания можно определить следующие параметры схемы замещения:

- 1) $(z_1 + z_m)$ и $(r_1 + r_m)$. 2) $(z'_2 + z_m)$ и $(r'_2 + r_m)$. 3) $(z_1 + z'_2)$ и $(r_1 + r'_2)$.

3.2.32. Укажите неправильное соотношение следующих параметров схемы замещения трансформатора.

- 1) $z_1 \sim z_m$. 2) $r_m \sim r_1$. 3) $z'_2 \sim z_1$. 4) $z'_2 \sim z_m$. 5) $r_m \sim r'_2$.

3.2.33. Укажите схему замещения трансформатора в режиме короткого замыкания.

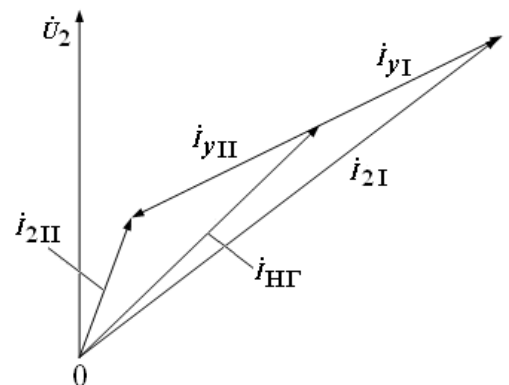


3.2.34. Как определяется коэффициент мощности трансформатора?

- 1) Как отношение потребляемой мощности к полезной.
- 2) Как отношение полезной мощности к потребляемой.
- 3) Как отношение полной мощности к активной.
- 4) Как отношение полной мощности к реактивной.
- 5) Как отношение реактивной мощности к полной.
- 6) Как отношение активной мощности к полной.
- 7) Как отношение активной мощности к реактивной.
- 8) Как отношение реактивной мощности к активной.

3.2.35. На параллельную работу включены трансформаторы I и II. Векторная диаграмма токов вторичных обмоток приведена на рисунке. Какой вывод следует из диаграммы?

- 1) Трансформаторы нагружены равномерно.
- 2) Трансформаторы работают без нагрузки.
- 3) Трансформатор I перегружен.
- 4) Трансформатор II перегружен.



3.2.36. Укажите правильное соотношение параметров параллельно работающих трансформаторов.

- 1) $\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{1}{U_{KI}} : \frac{1}{U_{KII}}$.
 2) $\frac{S_{HII}}{S_{HI}} = \frac{U_{KI}}{U_{KII}}$.
 3) $\frac{S_I}{S_{HI}} : \frac{S_{II}}{S_{HII}} = \frac{1}{U_{KI}} : \frac{1}{U_{KII}}$.
 4) $\frac{S_I}{S_{HI}} : \frac{S_{II}}{S_{HII}} = U_{KI} : U_{KII}$.

3.2.37. Допускается ли подключать на параллельную работу следующие трансформаторы?

I трансформатор: $U_{2\Phi} = 220$ В; $z_{KI} = 10,2$ Ом; группа Y/Δ-11.

II трансформатор: $U_{2\Phi} = 220$ В; $z_{KII} = 10,2$ Ом; группа Y/Δ-11.

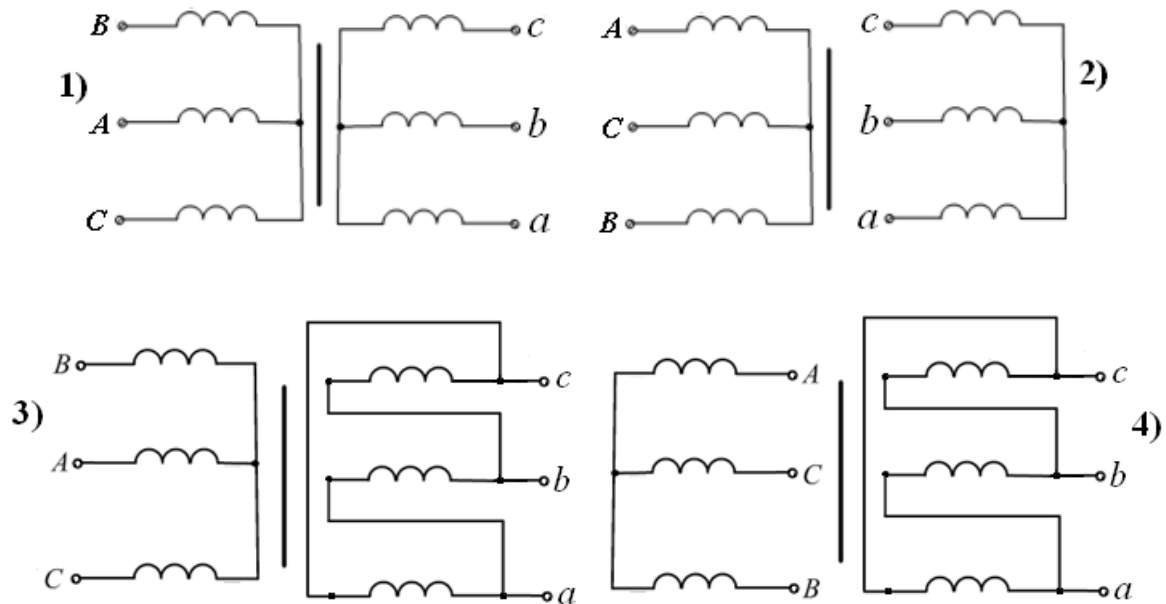
$U_{\text{СЕТИ}} = 380$ В.

- 1) Допускается. 2) Не допускается.
 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.2.38. Вторичные ЭДС двух трансформаторов имеют сдвиг на 90° . Эти трансформаторы могут иметь следующие группы.

- 1) 0 и 11. 2) 3 и 6. 3) 5 и 7. 4) 8 и 9. 5) 10 и 2.

3.2.39. Определить группу соединений обмоток в каждом из трансформаторов.



3.2.40. Как проводятся опыты параллельной работы двух трансформаторов?

1) Регулятором напряжения изменяют напряжение сети от 0 до $1,25 U_H$, при номинальной нагрузке, записывая при этом показания приборов.

2) В режиме холостого хода регулятором напряжения изменяют напряжение сети от 0 до $1,25 U_H$, записывая при этом показания приборов.

3) Поддерживая (с помощью регулятора напряжения) неизменным напряжением сети, нагрузку изменяют от холостого хода до $1,25 I_H$, записывая при этом показания приборов.

3.2.41. При каких из указанных отношений полных номинальных мощностей трансформаторов допускается подключать их на параллельную работу (указать правильные ответы).

1) 1: 5,5.

2) 1: 2,2.

3) 1: 3,3.

4) 1: 1,1.

3.2.42. Какие из нижеперечисленных пар трансформаторов (при выполнении прочих необходимых условий) можно включать на параллельную работу?

1) I трансформатор группы Y/Δ-11,
II трансформатор группы Y/Δ-11.

2) I трансформатор группы Y/Y-11,
II трансформатор группы Y/Δ-9.

3) I трансформатор группы Y/Y-9,
II трансформатор группы Y/Y-6.

4) I трансформатор группы Y/Y-6,
II трансформатор группы Y/Δ-0.

3.2.43. Определить величину уравнивающего тока, если на параллельную работу включены следующие трансформаторы:

I трансформатор – $U_{2\Phi} = 220$ В, $z_{KI} = 3$ Ом, группа Y/Y-0;

II трансформатор – $U_{2\Phi} = 220$ В, $z_{KI} = 2$ Ом, группа Y/Y-6.

$U_{\text{СЕТИ}} = 380$ В.

1) 300 А. 2) 200 А. 3) 100 А. 4) 50 А 5) Нет правильного ответа.

3.2.44. Действие трансформатора основано на принципе, изложенном в следующем законе.

1) В законе электромагнитной индукции. 2) В законе Кулона.

3) В законе Ома.

4) В законе полного тока.

5) В первом законе Кирхгофа.

6) Во втором законе Кирхгофа.

3.2.45. Определить величину уравнивающего тока, если на параллельную работу включены следующие трансформаторы:

I трансформатор – $U_{2\Phi} = 220 \text{ В}$, $z_{KI} = 2,2 \text{ Ом}$, группа Y/Δ-11;

II трансформатор – $U_{2\Phi} = 220 \text{ В}$, $z_{KII} = 2,0 \text{ Ом}$, группа Y/Δ-11.

$U_{\text{СЕТИ}} = 380 \text{ В}$.

1) 80 А. 2) 75 А. 3) 5 А. 4) 2,5 А 5) Нет правильного ответа.

3.2.46. Для определения группы соединений обмоток опытным путем в лабораторных условиях необходимы следующие измерительные приборы.

1) Амперметр. 2) Амперметр и вольтметр. 3) Вольтметр.

4) Амперметр, вольтметр и ваттметр. 5) Ваттметр. 6) Фазометр.

3.2.47. Что можно сказать о нагрузке двух трансформаторов при их параллельной работе?

I трансформатор – $U_{2\Phi} = 200 \text{ В}$, $U_{KI\%} = 5 \%$, группа Y/Y-0,

II трансформатор – $U_{2\Phi} = 200 \text{ В}$, $U_{KII\%} = 5 \%$, группа Y/Y-0.

$U_{\text{СЕТИ}} = 380 \text{ В}$.

1) Трансформаторы нагружены равномерно.

2) Трансформатор I перегружен. 3) Трансформатор II перегружен.

3.2.48. Группа соединений обмоток трансформатора определяется на векторной диаграмме величиной угла между следующими векторами.

1) Углом между первичными линейными токами и ЭДС.

2) Углом между первичными линейными напряжениями и ЭДС.

3) Углом между одноименными первичными и вторичными ЭДС.

4) Углом между одноименными первичными и вторичными токами.

3.2.49. Допускается ли подключать на параллельную работу следующие трансформаторы?

I трансформатор – $U_{2\Phi} = 220 \text{ В}$, $U_{KI\%} = 5 \%$, группа Y/Δ-11,

II трансформатор – $U_{2\Phi} = 180 \text{ В}$, $U_{KII\%} = 5 \%$, группа Y/Δ-11.

$U_{\text{СЕТИ}} = 380 \text{ В}$.

1) Допускается. 2) Не допускается.

3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.2.50. Что можно сказать о нагрузке двух трансформаторов при их параллельной работе?

I трансформатор – $U_{2\Phi} = 220 \text{ В}$, $U_{KI\%} = 4,5 \%$, группа Y/Y-0,

II трансформатор – $U_{2\Phi} = 200 \text{ В}$, $U_{KII\%} = 5 \%$, группа Y/Y-0.

$U_{\text{СЕТИ}} = 380 \text{ В}$.

1) Трансформаторы нагружены равномерно.

2) Трансформатор I перегружен. 3) Трансформатор II перегружен.

3.3. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к экзамену

Качество изучения раздела «Трансформаторы» оценивается, как правило, экзаменом с теоретическими вопросами по следующей тематике.

- 3.3.1. Устройство и принцип действия, назначение трансформаторов.
- 3.3.2. Выражение для ЭДС первичной и вторичной обмоток. Коэффициент трансформации.
- 3.3.3. Режим холостого хода однофазного трансформатора. Кривая тока холостого хода. Уравнения напряжений. Векторная диаграмма. Схема замещения.
- 3.3.4. Работа однофазного трансформатора при нагрузке. Физические условия работы трансформатора при нагрузке. Векторная диаграмма МДС и токов.
- 3.3.5. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной. Уравнения напряжений и токов приведенного трансформатора. Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной нагрузке.
- 3.3.6. Схем замещения приведенного трансформатора.
- 3.3.7. Режим короткого замыкания однофазного трансформатора. Схема замещения. Параметры короткого замыкания. Треугольник короткого замыкания. Напряжение короткого замыкания.
- 3.3.8. Изменение вторичного напряжения трансформатора.
- 3.3.9. Потери и КПД трансформатора. Условие максимума КПД.
- 3.3.10. Трехфазные трансформаторы. Типы магнитных систем. Схемы соединения обмоток.
- 3.3.11. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.
- 3.3.12. Режим холостого хода и короткого замыкания трехфазного трансформатора.
- 3.3.13. Параллельная работа трансформаторов. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
- 3.3.14. Трехобмоточные трансформаторы.
- 3.3.15. Автотрансформаторы.

3.4. Тесты, используемые при поступлении в магистратуру

При поступлении в магистратуру с направлением подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация 140400.68 «магистр») проводится тестирование. Вопросы, используемые в тестах по разделу «Трансформаторы», приведены ниже.

3.4.1. Что характеризует группа соединений обмоток трансформатора?
1) Количество обмоток на стержнях магнитопровода трансформатора.
2) Сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмотками.
3) Соотношение плотностей токов между первичной и вторичной обмотками трансформатора.

4) Соотношение площадей сечений проводников между первичной и вторичной обмотками трансформатора.

3.4.2. Какие материалы используются для обмоток трансформаторов?

- 1) Изотропная электротехническая сталь, алюминий.
- 2) Анизотропная электротехническая сталь, латунь.
- 3) Медь, алюминий.
- 4) Латунь, медь.

3.4.3. Какие материалы используются для магнитопроводов трансформаторов?

- 1) Листовая латунь.
- 2) Листовой алюминий.
- 3) Листовая медь.
- 4) Листовая электротехническая сталь

3.4.4. Чем является ток холостого хода трансформатора в первом приближении?

- 1) Реактивным, намагничивающим током.
- 2) Активным током первичной обмотки.
- 3) Током, создающим магнитный поток рассеяния вторичной обмотки.
- 4) Током, создающим магнитный поток рассеяния первичной обмотки.

3.4.5. При каких схемах соединений обмоток трехфазного трансформатора происходят наибольшие искажения фазных напряжений?

- 1) Y/ Δ .
- 2) Y/Y.
- 3) Δ /Y.
- 4) Δ / Δ .

3.4.6. С какой целью проводится приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной обмотке?

1) Для уменьшения коэффициента взаимоиנדукции между первичной и вторичной обмотками.

2) Для расчета оптимального количества витков вторичной обмотки трансформатора.

3) Для представления трансформатора в виде единой расчетной электрической схемы.

4) Для определения точного коэффициента трансформации

3.4.7. Какова основная схема замещения трансформатора?

- 1) Н-образная схема.
- 2) П-образная схема.
- 3) Г-образная схема.
- 4) Т-образная схема.

3.4.8. Как определяются параметры схемы замещения трансформатора?

- 1) По данным опытов холостого хода и короткого замыкания.
- 2) По данным опыта при входном напряжении равным 0,5 от U_H .
- 3) По данным опыта при токе вторичной обмотки равным 0,5 от I_H .
- 4) По данным опыта при выделении номинальной мощности во вторичной обмотке.

3.4.9. Какие параметры фиксируются в опыте короткого замыкания однофазного трансформатора?

- 1) Входное напряжение трансформатора, мощность и ток во вторичной обмотке.
- 2) Входное напряжение трансформатора, мощность и ток в первичной обмотке.
- 3) Токи и температуры первичной и вторичной обмоток.
- 4) Входное напряжение трансформатора и $\cos\varphi$ во вторичной обмотке.

3.4.10. Какие параметры фиксируются в опыте холостого хода однофазного трансформатора?

- 1) Ток и температура первичной обмотки.
- 2) Выходное напряжение трансформатора и мощность во вторичной обмотке.
- 3) Входное и выходное напряжение трансформатора, мощность и ток в первичной обмотке.
- 4) Входное и выходное напряжение трансформатора и сдвиг фаз между ними.

3.4.11. Как изменяется магнитный поток в трансформаторе при изменении тока нагрузки от холостого хода до номинального?

- 1) Зависит от соотношения активной и реактивной составляющих нагрузки.
- 2) Увеличивается в несколько раз.
- 3) Уменьшается в несколько раз.
- 4) Остается постоянным.

3.4.12. Подключение какого вида нагрузки увеличивает выходное напряжение трансформатора?

- 1) Активно-емкостного вида.
- 2) Активно-индуктивного вида.
- 3) Активного вида.
- 4) Индуктивного вида.

3.4.13. Что называется изменением напряжения трансформатора?

- 1) Отношение выходных напряжений при холостом ходе и при номинальном выходном токе.
- 2) Арифметическая разность выходных напряжений при холостом ходе и при номинальной нагрузке.
- 3) Арифметическая разность между номинальным напряжением питания и напряжением короткого замыкания.
- 4) Арифметическая разность выходных напряжений при холостом ходе и при коротком замыкании.

3.4.14. Что используется в трансформаторах при регулировании напряжения под нагрузкой?

- 1) Дугогасящие камеры.
- 2) Трехпозиционные переключатели.
- 3) Токоограничивающие реакторы.
- 4) Охлаждаемые радиаторы нагрузки.

3.4.15. Укажите величину возможного регулирования выходного напряжения промышленного трансформатора путем переключением числа витков?

- 1) 15 %.
- 2) 7,5 %.
- 3) 10 %.
- 4) 5 %.

3.4.16. В каких режимах работы трансформатора возможно использование метода симметричных составляющих?

- 1) При несимметричной нагрузке.
- 2) При номинальной симметричной нагрузке.
- 3) При номинальной мощности в выходной обмотке.
- 4) При температуре обмоток достигающей 75 °С.

3.4.17. Токи каких последовательностей используются для расчета трансформатора методом симметричных составляющих?

- 1) Прямой, переменной и нулевой последовательностей.
- 2) Прямой, обратной и нулевой последовательностей.
- 3) Прямой, обратной и единичной последовательностей.
- 4) Обратной, переменной и нулевой последовательностей.

3.4.18. Искажения фазных напряжений трансформаторов при расчете методом симметричных составляющих в основном определяются токами каких последовательностей?

- 1) Обратной последовательности.
- 2) Прямой последовательности.
- 3) Нулевой последовательности.
- 4) Переменной последовательности.

3.4.19. Какая из обмоток трехобмоточного трансформатора располагается ближе всех к стержням трансформатора?

- 1) Величина напряжение обмотки не имеет значения.
- 2) Обмотка высшего напряжения.
- 3) Обмотка промежуточного напряжения между низшим и высшим напряжениями.
- 4) Обмотка низшего напряжения.

3.4.20. В чем заключается отличие автотрансформатора от трансформатора?

- 1) В автотрансформаторе энергия передается электрическим и электромагнитным путем.
- 2) В автотрансформаторе энергия передается электрическим путем.
- 3) В автотрансформаторе энергия передается электромагнитным путем.
- 4) В автотрансформаторе энергия передается магнитным путем.

3.4.21. Как варьируется величина тока включения ненасыщенного трансформатора при подключении к питающему напряжению при изменениях моментов времени подключения относительно фазы питающего напряжения?

- 1) Ток включения располагается в диапазоне от двух до пяти номинальных токов.
- 2) Ток включения располагается в диапазоне от одного до двух номинальных токов.
- 3) Величина тока включения трансформатора не зависит от момента включения.
- 4) Ток включения располагается в диапазоне от пяти до десяти номинальных токов

3.4.22. Как варьируется величина тока включения насыщенного трансформатора при подключении к питающему напряжению при изменениях моментов времени подключения относительно фазы питающего напряжения?

- 1) Диапазон тока включения трансформатора определяется плотностью тока в проводниках первичной обмотки.
- 2) Величина тока включения трансформатора не зависит от момента включения.
- 3) Диапазон тока включения определяется степенью насыщения сердечника трансформатора.
- 4) Ток включения располагается в диапазоне от одного до двух номинальных токов.

3.5. Тесты и задачи, используемые на студенческих олимпиадах

По направлению подготовки 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ежегодно проводятся Всероссийские студенческие олимпиады. Тесты и задачи по разделу «Трансформаторы», использованные Уфимским государственным авиационным техническим университетом в 2013 г. на III туре Всероссийской студенческой олимпиады, приведены ниже.

3.5.1. Тестовые вопросы

5.1.1. Укажите причину нормального гудения трансформатора.

- 1) Неплотно стянутые листы сердечника.
- 2) Магнитострикция.
- 3) Межвитковое замыкание в обмотках.

3.5.1.2. Индуктированный ток препятствует:

- 1) уменьшению магнитного потока, пронизывающего контур;
- 2) увеличению магнитного потока, пронизывающего контур;
- 3) изменению магнитного потока, пронизывающего контур.

3.5.1.3. Принцип действия трансформатора основан на:

- 1) принципе Ленца;
- 2) законе электромагнитной индукции;
- 3) законе Ампера.

3.5.1.4. Какое из приведенных условий не определяет режим холостого хода трансформатора?

- 1) Ток нагрузки равен нулю.
- 2) Ток в первичной обмотке равен нулю.
- 3) К первичной обмотке подведено номинальное напряжение.
- 4) Частота тока в обмотках равна номинальной частоте.

3.5.1.5. Основой поток замыкается в стальном сердечнике трансформатора. Можно ли основной поток считать пропорциональным току первичной обмотки?

- 1) Можно.
- 2) Нельзя.
- 3) Можно, но только на линейном участке кривой намагничивания сердечника.

1) Можно. 2) Нельзя.
3) Можно, но только на линейном участке кривой намагничивания сердечника.

- 1) опережает по фазе основной магнитный поток на небольшой угол;
- 2) отстает по фазе от основного магнитного потока на небольшой угол;
- 3) отстает по фазе от основного магнитного потока на 90° ;
- 4) опережает по фазе основной магнитный поток на 90° .

A graph with a vertical axis and a horizontal axis labeled U_1 . A convex curve is plotted, representing an indifference curve. The curve is downward-sloping and convex to the origin.

- 1) Резко увеличится ток холостого хода.
- 2) Резко увеличится ток холостого хода и потери в стали.
- 3) Резко увеличится ток холостого хода и потери в стали, уменьшится коэффициент мощности.
- 4) Резко уменьшится $\cos\varphi$.

$$1) F = F_1 + F_2; \quad 2) \bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2; \quad 3) \bar{F} = \bar{F}_1 - \bar{F}_2; \quad 4) F = F_1 - F_2.$$

1) Увеличится. 2) Не изменится.
3) Уменьшится. 4) Увеличится незначительно.

1) Увеличится. 2) Не изменится. 3) Уменьшится.

3.5.1.13. Определите приведенное значение тока во вторичной обмотке, если $I_2 = 10 \text{ A}$, $k = 0,5$.

- 1) $I'_2 = 5 \text{ A}$. 2) $I'_2 = 10 \text{ A}$. 3) $I'_2 = 20 \text{ A}$.

3.5.1.14. Определите приведенное значение активного сопротивления вторичной обмотки, если $r_2 = 1 \text{ Ом}$ и $k = 0,5$.

- 1) $r'_2 = 3 \text{ Ом}$. 2) $r'_2 = 0,5 \text{ Ом}$. 3) $r'_2 = 0,25 \text{ Ом}$.

3.5.1.15. Как направлен на векторной диаграмме вектор $I'_2 \cdot x'_2$ падения напряжения на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора?

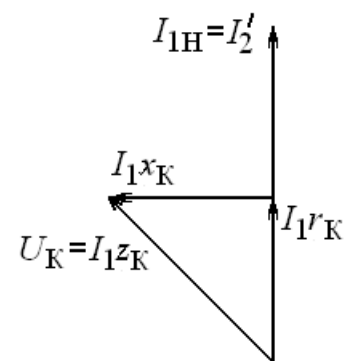
- 1) Совпадает по направлению с вектором тока \bar{I}_2 .
2) Опережает вектор тока \bar{I}_2 на 90° .
3) Отстает от вектора тока \bar{I}_2 на 90° .
4) Направлен против вектора тока \bar{I}_2 .

3.5.1.16. Как направлен на векторной диаграмме вектор ЭДС рассеяния вторичной обмотки трансформатора?

- 1) Совпадает по направлению с вектором тока \bar{I}_2 .
2) Опережает вектор тока \bar{I}_2 на 90° .
3) Отстает от вектора тока \bar{I}_2 на 90° .

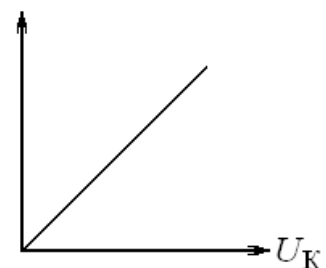
3.5.1.17. На рисунке изображена:

- 1) векторная диаграмма трансформатора;
2) упрощенная векторная диаграмма трансформатора;
3) упрощенная векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания;
4) упрощенная векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода.



3.5.1.18. Изображена характеристика короткого замыкания трансформатора. Какая величина откладывается по оси ординат?

- 1) I_k . 2) P_k . 3) $\cos \varphi_k$. 4) U_2 .



3.5.1.19. Изображена характеристика короткого замыкания трансформатора. Какая величина откладывается по оси ординат?

- 1) I_k . 2) P_k . 3) $\cos\varphi_k$. 4) U_2 .



3.5.1.20. В каком случае трансформатор нагревается больше?

- 1) В опыте холостого хода. 2) В опыте короткого замыкания.
3) При номинальной нагрузке.
4) Во всех перечисленных случаях нагрев трансформатора примерно одинаков.

3.5.1.21. В опыте короткого замыкания однофазного трансформатора вольтметр показывает 5 В, амперметр 1 А, ваттметр 3 Вт. Определить z_K и r_K .

- 1) $z_K = 5 \text{ Ом}$, $r_K = 3 \text{ Ом}$. 2) $z_K = 1 \text{ Ом}$, $r_K = 3 \text{ Ом}$.
3) $z_K = 5 \text{ Ом}$, $r_K = 1 \text{ Ом}$. 4) $z_K = 3 \text{ Ом}$, $r_K = 5 \text{ Ом}$.

3.5.1.22. Каков характер нагрузки трансформатора, если $\Delta U = -20 \text{ В}$ при уменьшении тока от номинального до нуля?

- 1) Активный. 2) Индуктивный.
3) Емкостной. 4) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.23. Как зависят от коэффициента нагрузки трансформатора а) потери в меди, б) потери в стали?

- 1) Пропорциональны квадрату $k_{НГ}$. 2) Не зависят от $k_{НГ}$.
3) а) пропорциональны квадрату $k_{НГ}$, б) не зависят от $k_{НГ}$.
4) а) зависит линейно, б) пропорциональны квадрату $k_{НГ}$.

3.5.1.24. На сердечнике трансформатора размещены а) цилиндрическая двухслойная и б) многослойные обмотки. Какая обмотка низкого, а какая высокого напряжения?

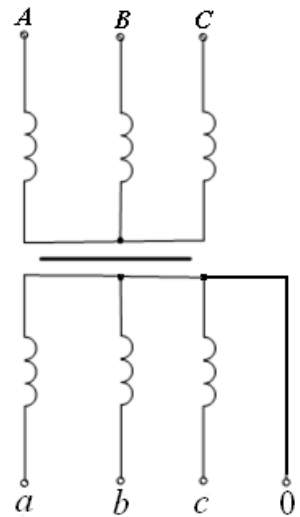
- 1) а) низкого, б) высокого. 2) а) высокого, б) низкого.
3) для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.25. Обмотка трансформатора рассчитана на напряжение 690 В. Какая это обмотка?

- 1) Высшего напряжения. 2) Низшего напряжения.
3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.26. Укажите группу соединений обмоток трансформатора, показанных на рисунке, если фазные обмотки на каждом стержне намотаны встречно.

- 1) Y/Y₀-0. 2) Y/Y₀-6. 3) Y/Y-0. 4) Y/Y-6.

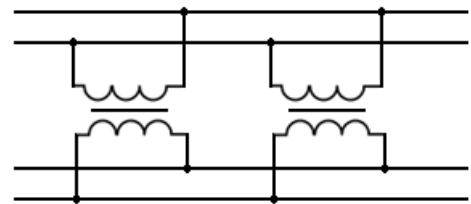


3.5.1.27. Обмотки трансформатора соединены по схеме Y/Δ. Фазные обмотки на каждом стержне намотаны встречно. Определите группу соединений обмоток.

- 1) 5. 2) 6. 3) 11. 4) 7.

3.5.1.28. Можно ли сказать, что трансформаторы на рисунке включены на параллельную работу?

- 1) Можно. 2) Нельзя.
3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.



3.5.1.29. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы, напряжение короткого замыкания которых равны?

- 1) Можно. 2) Нельзя.
3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

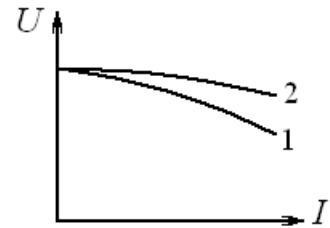
3.5.1.30. Что произойдет, если включить на параллельную работу нефазированные трансформаторы?

- 1) На выходных шинах появится удвоенное напряжение.
2) Через обмотки трансформаторов потечет большой ток, даже при отключенной нагрузке.
3) Ничего.

3.5.1.31. Мощности параллельно работающих трансформаторов одинаковы. ЭДС вторичной обмотки первого трансформатора больше ЭДС вторичной обмотки второго трансформатора. Где протекает большой ток?

- 1) Во вторичной обмотке первого трансформатора.
2) В обмотках первого трансформатора.
3) В обмотках второго трансформатора.
4) Во вторичной обмотке второго трансформатора;

3.5.1.32. Трансформаторы, характеристики которых изображены на рисунке, включены на параллельную работу. Какой трансформатор нагружен больше?



- 1) Первый.
- 2) Второй.
- 3) Оба трансформатора нагружены одинаково.
- 4) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.33. Известны напряжения короткого замыкания трансформаторов: $U_{K1} = 11$ В, $U_{K2} = 10$ В. Можно ли эти трансформаторы включить на параллельную работу, если другие условия выполнены?

- 1) Можно.
- 2) Нельзя.

3.5.1.34. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы, обмотки которых соединены по схемам Y/Y_0 и Y/Y_0 , если прочие условия параллельной работы выполнены?

- 1) Можно.
- 2) Нельзя.
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.35. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы, обмотки которых соединены по схемам Y/Y_0 и Y/Δ , если прочие условия параллельной работы выполнены?

- 1) Можно.
- 2) Нельзя.
- 3) Для ответа на вопрос недостаточно данных.

3.5.1.36. Можно ли опыт холостого хода высоковольтного трансформатора провести при пониженном напряжении, безопасном для жизни оператора?

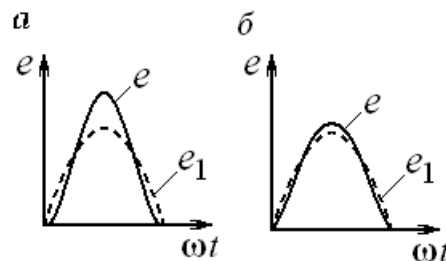
- 1) Можно, если подобрать соответствующие приборы.
- 2) Нельзя.

3.5.2. Олимпиадные задачи

3.5.2.1. Во сколько раз необходимо увеличить число витков в фазе обмотки трансформатора при соединении в «зигзаг», чтобы получить такое же фазное напряжение, как при соединении «звездой»? Покажите решение.

3.5.2.2. Максимальная взаимная индуктивность между фазой первичной и вторичной обмоток $L_m = 0,03$ Гн. Чему равны главные взаимные индуктивности L_{Aa} , L_{Ab} и L_{Ac} , если в рассматриваемый момент времени электрический угол между осями обмоток равен $\pi/6$?

3.5.2.3. На рисунке показана форма кривой фазной ЭДС трехфазного трансформатора со схемой соединения Y/Y для двух различных конструктивных исполнений магнитопровода. Каким конструкциям магнитопровода соответствуют приведенные кривые? Поясните.



3.5.2.4. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов, соединенные в «треугольник», подключены к трехфазной сети 220 кВ. Три вывода вторичной обмотки соединены в общую точку. При одинаковых фазных напряжениях на вторичной обмотке $U_{ax} = U_{by} = U_{cz} = 10$ кВ линейные напряжения различны $U_{ab} = U_{bc} = 10$ кВ, $U_{ca} = 17,32$ кВ. Чем объясняется несимметричность линейных напряжений, какие переключения в схеме соединений обмоток необходимо осуществить?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов /А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 319 с.
2. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы: учеб. для вузов / Г.Н. Петров. – М.; Энергия, 1974. – 240 с.
3. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы: методические указания к лабораторным работам / составитель Б.Д. Шумаков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 75 с.
4. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторным работам/ сост. Б.Д. Шумаков; Юж.-Урал. гос. ун-т, каф. электромеханики и электромеханических систем; ЮУрГУ Челябинск, 2013. – 75 с. – http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000503222&dtype=F&etype=pdf.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел 1. Введение в электромеханику

<i>Лекция 1. Область применения и основы электромеханики</i>	<i>3</i>
--	----------

Раздел 2. Трансформаторы

<i>Лекция 2. Назначение, принцип действия и устройство однофазного трансформатора</i>	<i>15</i>
<i>Лекция 3. Режимы действия однофазного трансформатора</i>	<i>28</i>
<i>Лекция 4. Режим короткого замыкания и параметры Трансформатора</i>	<i>40</i>
<i>Лекция 5. Трехфазные трансформаторы</i>	<i>50</i>
<i>Лекция 6. Режимы работы трехфазного трансформатора</i>	<i>62</i>
<i>Лекция 7. Параллельная работа и специальные типы Трансформаторов</i>	<i>73</i>
<i>Лекция 8. Переходные процессы в трансформаторе</i>	<i>84</i>

Раздел 3. Фонды оценочных средств знаний

<i>3.1. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к лабораторным работам</i>	<i>90</i>
<i>3.2. Тесты, используемые при допуске к лабораторным работам и их защите</i>	<i>92</i>
<i>3.3. Контрольные вопросы, используемые при подготовке к экзамену</i>	<i>102</i>
<i>3.4. Тесты, используемые при поступлении в магистратуру</i>	<i>102</i>
<i>3.5. Тесты и задачи, использованные на студенческих олимпиадах</i>	<i>107</i>
<i>Библиографический список</i>	<i>113</i>

Шумаков Борис Дмитриевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
Часть I.
ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ.
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Курс лекций

Издательский центр Южно-Уральского
государственного университета