

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. Л. Встовский
С. А. Встовский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие

Красноярск
ИПК СФУ
2009

УДК 31.261(075)
ББК 621.313я73
В84

Рецензенты:

А. Н. Грунов, канд. техн. наук, доц. директор ООО «Электростроймонтаж»

А. В. Бастрон, канд. техн. наук, доц. зав. кафедрой электроснабжения
КрасГАУ

Встовский, А. Л.

В84 Электрические машины. Трансформаторы : учеб. пособие / А. Л. Встовский, С. А. Встовский. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 168 с.
ISBN 978-5-7638-1899-4

Рассмотрены физические и теоретические основы электромеханического преобразования энергии в электрических машинах, излагаются вопросы теории электромагнитных процессов, конструкции магнитопроводов, обмоток, изоляции, систем охлаждения, регулирования напряжения и методов испытания современных трансформаторов общего и специального назначения, анализируются их потребительские и эксплуатационные характеристики и качества.

Предназначено для студентов, обучающихся по программам подготовки дипломированных специалистов, бакалавров и магистров укрупненной группы 140000 «Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника».

УДК 31.261(075)
ББК 621.313я73

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Учебное издание

А. Л. Встовский, С. А. Встовский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Учебное пособие

Редактор И. Н. Байкина
Компьютерная верстка: Д. Р. Мифтахутдинова

Подписано в печать 29.12.2009. Печать плоская. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 9,76. Тираж 400 экз. Заказ № 1366/09
Издательско-полиграфический комплекс Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

ISBN 978-5-7638-1899-4

© Сибирский федеральный университет, 2009
© Оформление, оригинал-макет ИПК СФУ, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие посвящено теории и практике трансформаторов в последовательности изложения материала, принятой для электроэнергетических и электротехнических специальностей.

Для облегчения понимания принципа действия, особенностей конструкции, режимов работы трансформаторов в первой главе приведена классификация электрических машин и трансформаторов. Здесь же рассматриваются основные законы электромеханического преобразования энергии и некоторые, необходимые для изучения всей дисциплины «Электрические машины» («Электромеханика»), понятия из курса теоретических основ электротехники. Введение этой главы в пособие по трансформаторам объясняется тем, что для большинства специальностей изучение дисциплины «Электрические машины» начинается именно с раздела «Трансформаторы».

Методически пособие выстроено таким образом: сначала рассматриваются физические процессы преобразования энергии, а затем дается их математическое описание. По мнению авторов, не один год читающих лекции по рассматриваемой дисциплине, такое построение способствует лучшему пониманию материала будущими инженерами, призванными обслуживать электрические машины, производить выбор и ремонт электрооборудования. При разработке новых электрических машин такое базовое образование позволит специалисту самостоятельно изучить необходимые разделы теории и практики электрических машин.

Математическое описание электромагнитных процессов трансформаторов составлено с использованием современного математического аппарата через результирующие комплексные функции величин электрических цепей или через их проекции на оси пространственной комплексной плоскости.

В пособии подробно рассмотрены принцип действия и особенности конструкции силовых общепромышленных, некоторых специальных типов трансформаторов, а также трансформаторов, работающих на выпрямительную нагрузку. Приведен вывод основных формул и уравнений, необходимых для изучения особенностей рабочих режимов работы трансформаторов, а также возможных их аварийных режимов. Даются определение и вид основных характеристик трансформатора: магнитной, внешней, холостого хода и опытного короткого замыкания.

Вопросы, связанные с условиями включения трансформаторов на параллельную работу, подробно приведены в отдельной главе, как представляющие практический интерес для специалистов электроэнергетики.

Отдельные главы посвящены работе трансформаторов при несимметричных нагрузках, представляющих опасность для их целостности и для потребителей электроэнергии.

Серьезное внимание уделено изучению переходных процессов: включению трансформатора в сеть, внезапному короткому замыканию в линии потребителя, атмосферному перенапряжению. Показана необходимость проектирования трансформаторов с учетом внезапности возникновения, быстрым протеканием опасных для трансформатора процессов, необходимости и технической невозможности почти мгновенного отключения его от сети.

Авторы выражают надежду, что предлагаемое пособие окажется полезным и понятным для студентов и с благодарностью примут любые замечания и пожелания.

1. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ

1.1. Общие сведения о электромеханических преобразователях энергии

Дисциплина «*Электромеханика*» изучает основные законы электромеханического преобразования энергии, а также конструкции и принцип действия устройств, осуществляющих электромеханическое преобразование энергии. Такие устройства называются *электромеханическими преобразователями* (ЭМП) или *электрическими машинами* (ЭМ).

Электрическая машина предназначена для *преобразования энергии*: механической в электрическую (электрический генератор), электрической в механическую (электрический двигатель), а также электрической энергии в электрическую (трансформатор).

Преобразование энергии в ЭМ может осуществляться магнитным полем (сама машина при этом называется *индуктивной*) или электрическим полем (машина называется *ёмкостной*). Возможно также совместное использование магнитного и электрического полей (*индуктивно-ёмкостные* машины). На практике наибольшее распространение получили индуктивные машины. Магнитное поле в индуктивных электрических машинах создается постоянными магнитами, постоянным и переменным токами, протекающими по обмоткам ЭМ. В обмотках машин переменного тока протекают активные и реактивные токи. Реактивные токи (реактивная мощность) создают магнитное поле, а активные токи определяют активную мощность машины.

Для получения более сильных магнитных полей в ЭМ применяют ферромагнитные сердечники (магнитопроводы), являющиеся неотъемлемой частью машины. При переменных магнитных полях магнитопроводы выполняют из тонких листов электротехнической стали с целью уменьшения потерь энергии от вихревых токов и гистерезиса.

Преобразование энергии в ЭМ неизбежно связано с потерями мощности (нагревом различных частей машины). При работе ЭМ нагреваются обмотки (электрические потери мощности), магнитопровод (магнитные потери мощности), а также вращающиеся части машины – вал, подшипники, вентиляционные лопасти (механические потери мощно-

сти). Поэтому коэффициент полезного действия (КПД) ЭМ не может быть равен 100 %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} < 100 \%,$$

где P_2 – выходная мощность ЭМ; P_1 – входная мощность ЭМ. Для генераторов P_1 – это механическая мощность, а P_2 – электрическая мощность. Для двигателей P_1 – это электрическая мощность, а P_2 – механическая мощность. Для трансформаторов P_1 и P_2 – электрические мощности различных напряжений и токов. Но всегда выходная мощность P_2 меньше входной мощности на величину суммарных потерь мощности:

$$\Sigma P = P_1 - P_2.$$

КПД электрической машины увеличивается с ростом мощности. Так, у машин мощностью 10–50 Вт $\eta = 20 - 40 \%$. КПД мощных машин (1000 МВт и более) достигает 99 %. Наибольшим КПД обладают неподвижные электрические машины – трансформаторы. В мощных трансформаторах достигнут КПД $\eta = 99,8 \%$.

Все электрические машины по мощности условно можно разделить на следующие группы:

1. Микромашины (мощность до 600 Вт).
2. Машины малой мощности (мощность от 0,6 до 20 кВт).
3. Машины средней мощности (мощность от 20 до 250 кВт).
4. Машины большой мощности (мощность свыше 250 кВт).

Наибольшие мощности в современных электрических машинах достигнуты в турбогенераторах – до 1600 МВт.

В процессе работы электрической машины её конструктивные элементы и узлы подвергаются тепловым, термомеханическим, электродинамическим, механическим и другим воздействиям, что при определенных условиях может привести к повреждению отдельных узлов и выходу из строя всей машины. Величина таких воздействий зависит от мощности P , частоты вращения n , вращающего момента на валу M_2 , тока в обмотках машины I , напряжения U . Каждой машине завод-изготовитель устанавливает *номинальные значения* P_n , n_n , M_{2n} , I_n , U_n , при которых гарантируется работоспособность ЭМ в течение всего срока службы (срок службы ЭМ 15–20 лет). Обычно номинальные значения указываются на паспортной табличке машины.

Все электрические машины обладают *принципом обратимости*. Этот принцип обусловлен универсальностью магнитного поля как энергоносителя. Любой генератор может работать в режиме двигателя, а любой двигатель может работать в режиме генератора. Любой трансформатор может работать как повышающий или как понижающий. Однако каждая ЭМ проектируется для работы в одном определенном режиме. Этим добиваются наилучшего использования материалов машины, т.е. получают наибольшую мощность на единицу массы машины.

1.2. Классификация электрических машин

Классифицируют электрические машины по назначению, а также по роду тока и принципу действия.

По *назначению* ЭМ делятся на генераторы, электрические двигатели, трансформаторы, электромашинные преобразователи, электромашинные усилители.

Генераторы преобразуют механическую энергию вращательного движения в электрическую энергию. Механическая энергия подводится к валу генератора от приводного двигателя или приводной турбины. В качестве приводного двигателя используют электрические двигатели постоянного либо переменного тока или двигатели внутреннего сгорания. Приводная турбина приводится во вращение потоком воды, паром или газом. Генераторы устанавливают на электростанциях (стационарных и передвижных), различных транспортных установках (автомобили, самолеты, поезда, корабли и т.д.). Генераторы используют также в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники.

Электрические двигатели преобразуют электрическую энергию, потребляемую от источника питания, в механическую энергию вращательного или поступательного движения. Электрические двигатели приводят во вращение различные механизмы и устройства в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, военном деле, системах автоматики и бытовой электротехнике.

Трансформаторы повышают или понижают напряжение переменного тока, изменяют число фаз и преобразуют частоту переменного тока. Трансформаторы применяют в системах передачи и распределения электроэнергии переменного тока и напряжения, преобразовательной технике, различных технологических установках (сварочные, электропечные), устройствах автоматики и связи, измерительных устройствах.

Электромашинные преобразователи преобразуют переменный ток в постоянный и наоборот, изменяют значения напряжения постоянного и переменного тока, частоту, число фаз.

Электромашинные усилители усиливают электрические сигналы малой мощности за счет подаваемой на вал усилителя механической энергии.

В настоящее время *электромашинные преобразователи и электромашинные усилители* в промышленности и на транспорте применяются *всё реже*, поскольку их роль выполняют *статические полупроводниковые преобразователи*. Однако в военном деле и спецтехнике *электромашинные усилители и преобразователи* по-прежнему используются широко, так как обладают *значительно большей радиационной устойчивостью*, чем *полупроводниковые устройства*.

Электромашинные компенсаторы осуществляют генерирование или потребление реактивной мощности в электрических установках для улучшения электрических показателей источников и приемников электрической энергии.

По *роду тока и принципу действия* выделяют электрические машины переменного и постоянного тока (рис. 1.1).

Машины переменного тока в зависимости от электромагнитной схемы делятся на трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, коллекторные машины.

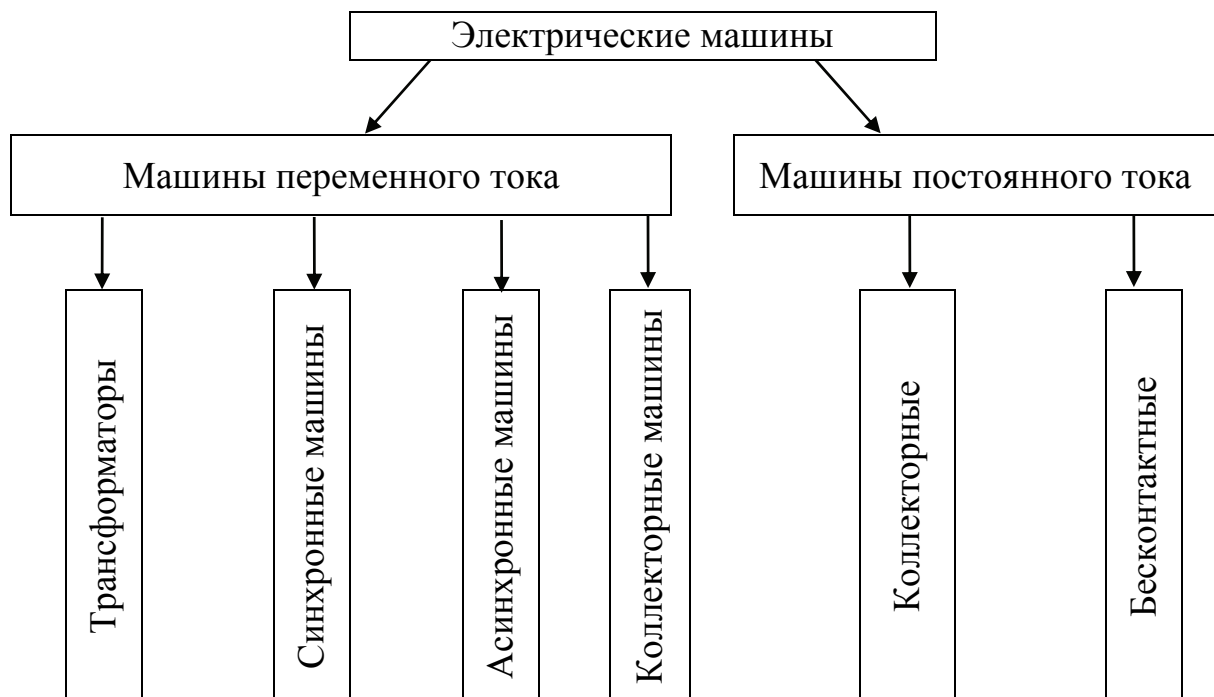


Рис. 1.1. Классификация ЭМ по роду тока и принципу действия

Трансформаторы – статические электромагнитные преобразователи энергии переменного тока. Обмотки трансформаторов относительно друг друга в процессе работы неподвижны. Преобразование энергии в трансформаторах осуществляется за счет меняющегося потокоцепления между обмотками.

Асинхронные и синхронные машины выполняются с неподвижной обмоткой статора и вращающейся обмоткой ротора. В машинах переменного тока магнитное поле вращается с частотой вращения n_1 (об/мин):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

где f_1 – промышленная частота сети (для России и большинства стран мира $f_1 = 50$ Гц); p – число пар полюсов (количество пар электромагнитов или магнитов).

В *синхронных машинах* ротор вращается с частотой вращения n , равной частоте вращения магнитного поля:

$$n_1 = n.$$

Так, например, в двухполюсной ($p = 1$) синхронной машине при питании обмотки статора напряжением промышленной частоты ротор вращается с частотой вращения $n = n_1 = 300$ (об/мин). Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электростанциях и в автономных энергетических установках. Синхронные двигатели используют в электроприводах большой мощности при постоянной частоте вращения приводного механизма. Кроме того, синхронные машины работают как компенсаторы реактивной мощности.

В *асинхронных машинах* частота вращения ротора и магнитного поля статора отличаются на величину скольжения s :

$$n = n_1 (1 - s).$$

Величина скольжения s в трехфазных асинхронных машинах не превышает 1–3 %.

Так, например, в двухполюсном асинхронном двигателе при скольжении $s = 0,02$ магнитное поле вращается с частотой $n_1 = 300$ (об/мин), а ротор с частотой вращения $n = 2940$ (об/мин). Асинхронные машины используют в основном в качестве электрических двигателей промышленных и бытовых электроприводов. Асинхронные двигатели потребляют более половины всей электроэнергии, вырабатываемой синхронными генераторами. В режиме генераторов асинхронные машины используют преимущественно в автономных энергетических установках совместно с батареей конденсаторов (для создания магнитного поля). Асинхронный генератор может работать и параллельно с сетью, но при этом из сети будет потреблять реактивную мощность для создания магнитного поля.

Коллекторные машины переменного тока отличаются от асинхронных и синхронных машин наличием коллектора, который соединен с обмоткой статора или ротора. Коллектор в машинах переменного тока является механическим преобразователем частоты и числа фаз. За счет коллектора частота вращения ротора коллекторных машин переменного тока значительно выше, чем асинхронных и синхронных машин. Такие машины применяют в качестве двигателей быстроходных электроприводов небольшой мощности, главным образом в бытовой электротехнике.

Машины постоянного тока (МПТ) делятся на коллекторные и бесконтактные.

Коллектор в МПТ – это механический выпрямитель (в генераторах постоянного тока) или механический инвертор (в двигателях постоянного тока). Генераторы постоянного тока применяют для питания двигателей постоянного тока и в качестве возбuditелей или подвозбудителей синхронных генераторов. Двигатели постоянного тока позволяют осуществлять плавное и экономичное регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Такие двигатели находят применение в электроприводах прокатных станов, металлообрабатывающих станков, электрического транспорта и других системах автоматизированного электропривода.

Бесконтактные машины постоянного тока – это униполярные (однополярные) низковольтные генераторы постоянного тока и бесконтактные двигатели постоянного тока. Бесконтактные двигатели постоянного тока еще называются вентильными двигателями. В таких двигателях роль коллектора выполняет статический полупроводниковый коммутатор, управляемый датчиком положения ротора (фототранзисторы, электромагнитные датчики или элементы Холла).

1.3. Основополагающие законы электромеханического преобразования энергии в индуктивных электрических машинах

Закономерности преобразования энергии в индуктивных ЭМ определяются физическими законами, устанавливающими связи между различными величинами и параметрами электрических, магнитных и механических процессов. Важнейшими законами, определяющими работу любой электрической машины, являются законы электромагнитной индукции (в формулировке М. Фарадея и в формулировке Д. Максвелла) и закон электромагнитных сил (закон Ампера). В процессе изучения ЭМ необходимо также знать и понимать закон Ома для электрической цепи, закон Ома для магнитной

цепи, закон полного тока, закон Ленца, законы Кирхгофа для электрических и магнитных цепей. Напомним кратко эти законы в терминах и понятиях, наиболее часто употребляемых в теории электрических машин.

Закон электромагнитной индукции устанавливает закономерность возникновения *электродвижущей силы* (ЭДС) в отдельных проводниках или в электрических контурах, находящихся в магнитном поле.

При определении ЭДС, индуцированной в отдельных проводниках обмоток электрической машины, удобно этот закон использовать в формулировке М.Фарадея:

Если проводник длиной l перемещать в магнитном поле с индукцией B с линейной скоростью v перпендикулярно силовым линиям магнитного поля или магнитное поле перемещать относительно неподвижного проводника с той же скоростью, то в проводнике индуцируется ЭДС $e_{пр}$.

Величина индуцированной ЭДС, В,

$$e_{пр} = B \cdot l \cdot v, \quad (1.1)$$

где B – магнитная индукция, Тл; l – длина проводника, м; v – скорость движения проводника (пересечения проводником магнитных линий), м/с.

При постоянной магнитной индукции ЭДС зависит только от скорости пересечения проводником магнитных линий и не зависит от материала, формы и размеров поперечного сечения проводника.

Направление этой ЭДС определяется по правилу «правой руки», как показано на рис. 1.2, а: если линии индукции B входят в раскрытую ладонь правой руки, а большой палец совпадает с направлением движения v , то вытянутые остальные четыре пальца ладони укажут направление ЭДС e .

При определении ЭДС, индуцированной в отдельном электрическом контуре, удобнее пользоваться законом электромагнитной индукции в формулировке Максвелла:

Значение ЭДС e , наведённой в контуре, пропорционально скорости изменения потокосцепления ψ или скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего этот контур.

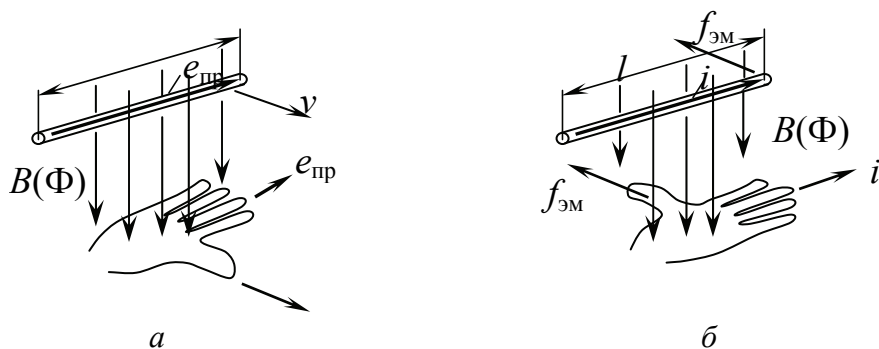


Рис. 1.2. Определение ЭДС и электромагнитной силы Ампера:
а – правило «правой руки»; б – правило «левой руки»

Величина индуцированной ЭДС, В,

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w_k \frac{d\Phi}{dt} = -L_k \frac{di}{dt}, \quad (1.2)$$

где $\psi = w_k \cdot \Phi = L_k \cdot i$ – потокосцепление контура; w_k – число витков контура; L_k – индуктивность контура; i – ток, протекающий по виткам электрического контура.

Как следует из формулы (1.2), величина ЭДС зависит только от скорости изменения потока (тока) и не зависит от материала, формы и размеров проводников, из которых сделаны витки контура.

Закон электромагнитных сил (закон Ампера), или *закон электромагнитного взаимодействия*, устанавливает закономерность возникновения электромагнитной (электродинамической) силы, действующей на проводник с электрическим током или на ферромагнитное тело, расположенные в магнитном поле.

Электромагнитную силу, действующую на проводник с электрическим током в магнитном поле, удобно определять по закону Ампера:

На проводник с током i в однородном магнитном поле с индукцией B действует электромагнитная сила $f_{\text{эм}}$, Н,

$$f_{\text{эм}} = B \cdot l \cdot i, \quad (1.3)$$

где B – магнитная индукция, Тл; l – длина проводника, м; i – ток, А.

Направление электромагнитной силы определяется по правилу «левой руки» (рис. 1.2, б): если линии индукции \vec{B} входят в раскрытую ладонь левой руки, а пальцы вытянуты по направлению тока i , то большой палец показывает направление электромагнитной силы $f_{\text{эм}}$.

Если необходимо определить электромагнитную силу или электромагнитный момент в магнитной системе, образованной одним или несколькими электрическими контурами, то удобнее исходить из полной энергии магнитного поля W_M . Силу, действующую в направлении геометрической координаты g , определяющей положение системы в пространстве, можно определить по одному из двух тождественных выражений:

$$f_{\text{эм}} = -\left(\frac{W_M}{g}\right)_{\psi_k=\text{const}} = \left(\frac{W_M}{g}\right)_{i_k=\text{const}}. \quad (1.4)$$

Первое выражение указывает, что электромагнитная сила, стремящаяся изменить данную координату, равна убыли энергии магнитного поля, отнесённой к единице производимого силой изменения координаты, в предположении, что потокоцепления контуров сохраняются неизменными. Второе выражение указывает, что электромагнитная сила, стремящаяся изменить данную координату, равна увеличению энергии магнитного поля, отнесённому к единице производимого силой изменения координаты, в предположении, что токи в контурах поддерживаются неизменными. Целесообразность применения одного из двух выражений определяется конкретными условиями поставленной задачи.

Электромагнитные силы действуют не только на проводники с током, но и на ферромагнитные тела, находящиеся в магнитном поле. Проявляются эти силы в виде сил магнитного тяжения трубок магнитного потока. Удельное значение такой силы, действующей на единицу ферромагнитной поверхности,

$$f_{\text{эм}} = \frac{B_{\text{п}} \cdot H_{\text{п}}}{2} = \frac{B_{\text{п}}^2}{2 \cdot \mu_0}, \quad (1.5)$$

где $B_{\text{п}}$ и $H_{\text{п}}$ — соответственно, магнитные индукция и напряженность на поверхности ферромагнитного тела; μ_0 — магнитная проницаемость немагнитной среды (обычно воздух, окружающий магнитное тело).

Закон Ома для электрической цепи, не содержащей источник ЭДС (рис. 1.3, а), устанавливает связь между разностью электрических потенциалов $\varphi_a - \varphi_b$ (напряжением \dot{U}_{ab} , В, или ЭДС E_{ab} , В), полным электрическим сопротивлением цепи Z , Ом, и величиной тока \dot{I} , А, на этом участке. Применительно к рис. 1.3, а падение напряжения (напряжение на сопротивлении Z)

$$\dot{U}_{ab} = Z \cdot \dot{I}$$

или

$$\dot{I} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{Z} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z} = \frac{\dot{E}_{ab}}{Z}. \quad (1.6)$$

Из формулы (1.6) следует, что электрический ток возникает при наличии разности потенциалов (напряжения, ЭДС) и цепи с конечным сопротивлением.

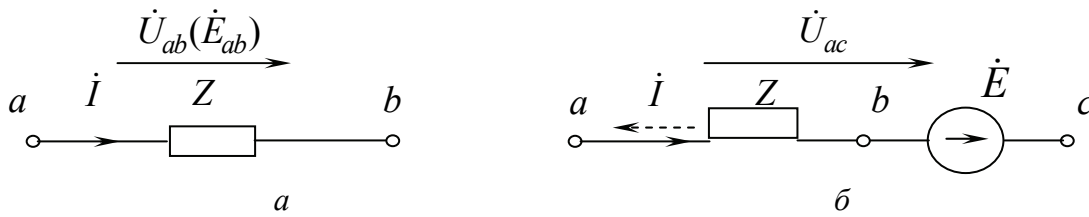


Рис. 1.3. Закон Ома: *a* – электрическая цепь без источника ЭДС;
б – электрическая цепь с источником ЭДС

Закон Ома для электрической цепи, содержащей источник ЭДС, позволяет найти ток этой цепи по известной разности потенциалов $(\varphi_a - \varphi_c)$ на концах цепи и имеющейся в этой цепи ЭДС \dot{E} . Для схемы (рис. 1.3, б) запишем

$$\dot{I} = \frac{\varphi_a - \varphi_c \pm E}{Z} = \frac{\dot{U}_{ac} \pm \dot{E}}{Z}. \quad (1.7)$$

В формуле (1.7) знак «+» ставят, если ток \dot{I} и ЭДС \dot{E} совпадают по направлению (в ЭМ обычно в режиме генератора), знак «−» ставят, если ток \dot{I} и ЭДС \dot{E} направлены встречно (в ЭМ обычно в режиме двигателя). В частном случае при $\dot{E} = 0$ уравнение (1.7) переходит в уравнение (1.6).

Закон Ома для магнитной цепи устанавливает связь между магнитодвижущей силой (МДС) F , созданной катушкой или обмоткой, магнитным сопротивлением магнитопровода или участка магнитной цепи R_μ и величиной магнитного потока Φ . Для замкнутого магнитопровода с постоянным сечением S магнитный поток

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu} = \frac{wI}{R_\mu}, \quad (1.8)$$

где w – число витков катушки или обмотки. МДС F в (1.8) называют также магнитным напряжением, или потенциалом магнитного поля, т.е. причиной возникновения этого поля. Магнитное сопротивление R_μ зависит от размеров и магнитных свойств магнитопровода:

$$R_\mu = \frac{l_{cp}}{\mu_a \cdot S}, \quad (1.9)$$

где l_{cp} – длина средней силовой линии, м; S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²; $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость

магнитопровода, показывающая, во сколько раз индукция в стальном магнитопроводе больше, чем в вакууме; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость стального магнитопровода (или магнитная проницаемость).

Из соотношений (1.7)–(1.9) следует формальное соответствие физических величин электрических и магнитных цепей (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Соответствие физических величин электрических и магнитных цепей

Электрическая цепь	Z , Ом	I , А	U , E , В	J , А/м ²	E , В/м
Магнитная цепь	R_μ , А/Вб	Φ , Вб	F , А	B , Тл	H , А/м

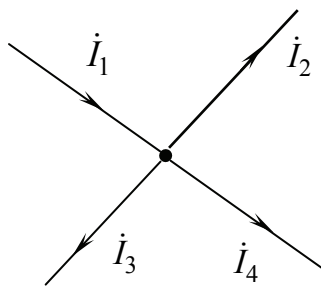


Рис. 1.4. Иллюстрация закона Кирхгофа

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа показывает, что движение зарядов в электрической цепи происходит так, что ни в одном из узлов цепи эти заряды не скапливаются.

Алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю или: сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих из узла токов.

Для рис. 1.4 считаем, что подтекающие к узлу токи положительные, а утекающие – отрицательные, тогда

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 - \dot{I}_4 = 0$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4.$$

Второй Закон Кирхгофа: *алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме электродвижущих сил вдоль того же контура:*

$$\sum I \cdot R = \sum E.$$

Закон полного тока устанавливает связь между токами i_1, i_2, \dots, i_n и напряжённостью магнитного поля \bar{H} , образованного этими токами в окружающем пространстве, в виде

$$\oint \bar{H} d\bar{l} = \sum_n i = i_1 + i_2 + \dots + i_n. \quad (1.10)$$

Согласно выражению (1.10), закон полного тока гласит:

Интеграл по произвольному замкнутому контуру l_i от произведения напряжённости магнитного поля \bar{H} на элемент длины контура $d\bar{l}$ равен сумме токов, находящихся внутри контура интегрирования.

Если путь интегрирования в формуле (1.10) совпадает с магнитной линией, то под знаком интеграла $\bar{H} d\bar{l} = H dl$.

В случае катушки с числом витков w и током I интегрирование любой из магнитных линий (например, средней с длиной l_{cp}), даёт в правой части интеграла (1.10) сумму токов $\sum i = wi = F$, равную МДС катушки. Закон полного тока является опытным законом. Экспериментально его можно проверить путём измерения $\oint \bar{H} d\bar{l}$ с помощью магнитного пояса (устройство, известное из курса физики).

При расчете магнитных цепей электрических машин интегральную сумму в (1.10) заменяют алгебраической суммой. Разбивая магнитную цепь на участки, в пределах которых магнитная напряженность \bar{H} может быть принята постоянной, а длина l конечной величиной:

$$\sum_1^i H_i \cdot l_i = w \cdot i, \quad (1.11)$$

где $\sum_1^i H_i \cdot l_i = \sum F$ – сумма МДС i -х участков магнитной цепи ЭМ. Значения напряжённости H_i на отдельных участках магнитопровода машины определяют по таблицам или кривым зависимости $H_i = f(B_i)$ для стали, из которой изготовлен магнитопровод. При заданных геометрических размерах и величине магнитного потока магнитная индукция

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i}, \quad (1.12)$$

где S_i – площадь поперечного сечения участка магнитопровода.

Магнитное напряжение любого из последовательно включенных участков

$$F_i = H_i \cdot l_i, \quad (1.13)$$

где H_i – среднее значение напряженности на данном участке; l_i – средняя длина магнитной линии данного участка.

Так как $H_i = (1 / \mu_i) B_i$, а $B_i = \Phi / S_i$, где S_i – площадь расчетного сечения участка магнитопровода, то

$$F_i = \Phi l_i / (S_i \mu_i). \quad (1.14)$$

Введя понятие *магнитного сопротивления*

$$R_{mi} = l_i / (S_i \mu_i), \quad (1.15)$$

из выражения (1.14) получим формулу закона Ома магнитной цепи:

$$F_i = \Phi R_{mi}. \quad (1.16)$$

Формула (1.15) показывает, что при малом значении магнитной проницаемости μ (например, прохождении магнитного потока через воздушный зазор при $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м) требуется магнитодвижущая сила большой величины. Для проведения магнитного потока по стальным участкам магнитной цепи с $\mu_{ст} = (5 - 100)$ Гн/м магнитодвижущая сила значительно ниже.

1.4. Материалы, применяемые в электромашиностроении

При производстве электрических машин используют проводниковые и магнитные материалы (активные), электроизоляционные и конструктивные материалы. Проводниковые, магнитные и электроизоляционные материалы называют *электротехническими*.

Проводниковые (электропроводящие) *материалы*. К ним относят медные или алюминиевые изолированные провода круглого сечения,

а также шины прямоугольных сечений, которые обычно изолируют при изготовлении обмоток. Электродвигатели и генераторы имеют, как правило, обмотки из медных проводов или шин, а обмотки трансформаторов выполняют как из медных, так и из алюминиевых проводов или шин.

Для обмоток используют медные провода круглого или прямоугольного сечения марок ПЭТВ и ПЭТВП класса нагревостойкости изоляции В, круглые провода ПЭТ-155 и прямоугольные провода ПЭТП-155 класса F, провода ПЭТ-200 и ПЭТП-200 класса нагревостойкости Н. В электромашиностроении широко используются провода ПСД и ПСДТ со стекловолокнистой изоляцией класса нагревостойкости F, провода ПСДК и ПСДКТ класса изоляции Н.

Для производства короткозамкнутых обмоток асинхронных машин используют алюминий А5 и его сплавы с повышенным сопротивлением – АКМ12-4, АКЗ.

Для демпферных пусковых обмоток синхронных машин применяют бронзу и латунь, а коллекторы машин постоянного тока изготавливают из твердотянутой меди.

Применение в обмотках меди и алюминия обусловлено их малым удельным сопротивлением ρ . При температуре 20°C у отожжённой медной проволоки $\rho_{20^\circ \text{Cu}} = 0,0172 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; алюминиевой – $\rho_{20^\circ \text{Al}} = 0,0282 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Очевидно, сделанная из этих материалов обмотка или её части будут иметь небольшое активное (омическое) сопротивление, Ом,

$$r = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.17)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; l – длина, м, и S – сечение, м^2 , провода обмотки или её части.

Так же малы определяемые по закону Джоуля-Ленца электрические потери мощности от тока I в обмотках, Вт,

$$p_3 = rI^2. \quad (1.18)$$

Снижение электрических потерь в обмотках увеличивает КПД электрической машины и облегчает её охлаждение.

Для электрических контактов применяют напайки из серебра, золота и платины, имеющих еще меньшее удельное сопротивление, чем медь.

Магнитные материалы. Сердечники электрических машин выполняют из материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью. К ним относятся конструктивные стали, электротехнические стали и ферри-

ты. Конструктивные стали применяют преимущественно в машинах постоянного тока для изготовления магнитопроводов и их частей с постоянным направлением магнитного потока (стальное, реже чугунное литьё, листовые и кованные стали, специальные сплавы для постоянных магнитов).

Для изготовления магнитопроводов якорей машин постоянного тока, магнитопроводов трансформаторов и электрических машин переменного тока используют преимущественно специальные *магнитомягкие электро-технические стали*, обладающие высокой магнитной проницаемостью и низкими удельными потерями. Сталь прокатывают на прокатных станах до толщины листов 1; 0,5; 0,35; 0,3; 0,2; 0,15; 0,1 мм. В электрических машинах на частоту 50 Гц обычно используют стали толщиной 0,35 и 0,5 мм. Листы стали изолируют одним–тремя слоями лака или термостойким магниево-фосфатным покрытием.

С целью *уменьшения потерь от вихревых токов* магнитопровод делят на тонкие изолированные листы поверхностями, параллельными линиям индукции B . При таком делении поперечное сечение листов меньше, чем у всего массивного магнитопровода. Соответственно уменьшаются ЭДС, вихревые токи и потери от них в каждом отдельном листе и суммарные потери от вихревых токов во всём разделённом на листы магнитопроводе. В магнитные материалы *на основе железа* добавляют небольшое количество кремния для повышения удельного электрического сопротивления, что *уменьшает вихревые токи и потери от них*. Присадки кремния мало влияют на магнитную проницаемость материала.

Обозначение *электротехнической стали* содержит 4 цифры: 1(А), 2(В), 3(С), 4(Д).

Первая цифра А характеризует класс стали по *структурному состоянию и виду прокатки*, может принимать следующие значения: 1 – сталь горячекатаная изотропная (магнитная проницаемость в направлении проката и поперёк проката практически одинакова); 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная (магнитная проницаемость вдоль проката существенно больше чем поперёк проката) с ребровой структурой. У холоднокатаных сталей магнитные свойства лучше, чем у горячекатаных: выше магнитная проницаемость и ниже магнитные потери вдоль проката стали.

Вторая цифра В определяет содержание кремния (Si) в стали: 0 – не более 0,4 % (сталь нелегированная); 1 – от 0,4 до 0,8 %; 2 – от 0,8 до 1,8 %; 3 – от 1,8 до 2,8 %; 4 – от 2,8 до 3,8 %; 5 – от 3,8 до 4,8 %.

Третья цифра С обозначает *группу по основной нормируемой характеристике*, различают 5 групп: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,7/50}$); 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,5/50}$); 2 – удельные потери при магнит-

ной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1,0/400}$); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряжённости поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряжённости поля 10 А/м (B_{10}).

Четвёртая цифра D обозначает порядковый номер стали и принимает значения от 1 до 6. С увеличением значения D улучшается качество стали: возрастает магнитная проницаемость и снижаются магнитные потери.

Примеры обозначения марок листовой электротехнической стали:

1212 – сталь горячекатаная изотропная с содержанием Si до 1,8 % для работы в магнитных полях с индукцией 1,5 Тл и частотой 50 Гц;

2311 – сталь холоднокатаная изотропная с содержанием Si до 2,8 % для работы в магнитных полях с индукцией 1,5 Тл и частотой 50 Гц;

3403 – сталь холоднокатаная анизотропная с содержанием Si до 3,8 % для работы в магнитных полях с индукцией 1,7 Тл и частотой 50 Гц.

Промышленно изготавливают стали следующих марок: горячекатаные изотропные 1211–1213, 1311–1313, 1411–1413, 1511–1514, 1561, 1562, 1571, 1572; холоднокатаные изотропные 2011–2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411, 2412; холоднокатаные анизотропные 3411–3416, 3404–3406.

Широкое применение в электрических машинах находят высокоэнергетические прессованные постоянные магниты на основе редкоземельных материалов (магниты РЗМ): самарий-кобальт, ниодим-железобор. Применение этих магнитов существенно снижает массу и габариты ЭМ при одновременном повышении их выходных характеристик.

Электроизоляционные материалы. Применяют их для предотвращения непосредственного электрического контакта различных токоведущих частей ЭМ – вводов, витков, обмоток и их частей – от магнитопроводов и конструктивных частей машины. Для изоляции проводов и увеличения электрической прочности промежутков в машинах используют эмали, бумагу, картон, материалы на основе целлюлозы, шёлка, хлопка, слюды, асбеста, стекловолокна, фарфора, электрошифера (табл. 1.2).

Основные требования к электроизоляционным материалам: высокая диэлектрическая прочность, позволяющая уменьшить толщину изоляции; высокая механическая прочность; хорошая теплопроводность, обеспечивающая малый перепад температуры в изоляции и, соответственно, хорошее охлаждение обмоток; влагостойкость; нагревостойкость, обеспечивающая длительное функционирование изоляции при воздействии предельно допустимой рабочей температуры.

По нагревостойкости или температурному индексу (ТИ) электроизоляционные материалы разделяют на семь классов согласно предельно допустимым температурам (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Температурный индекс (ТИ)	Класс нагревостойкости	Температура, С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
90	Y	90	Не пропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые материалы на основе хлопка, натурального шёлка, целлюлозы (бумага, картон, дерево), пластмассы, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
105	A	105	Пропитанные лаками на основе натуральных смол, термопластичными компаундами или помещённые в жидкий диэлектрик материала класса нагревостойкости Y, трансформаторное масло
120	E	120	Стеклолакоткани, синтетические органические полиэтилентерефталатные плёнки, термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные)
130	B	130	Материалы на основе асбеста, слюды, стекловолокна, пропитанные битумными или масляно-смоляными органическими лаками, термореактивные синтетические компаунды, глифталевые и винифлексные эмали, асбоцемент
155	F	155	Материалы на основе асбеста, слюды, стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, главным образом на основе кремнийорганических лаков
180	H	180	Материалы на основе асбеста, слюды, стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими и кремнийорганическими пропитывающими и связующими составами
Более 180	C	более 180	Слюда, стекло, кварц, керамика, фарфор, применяемые без связующих или в композиции с неорганическими связующими

Конструктивные материалы. Из конструктивных (конструкционных) материалов изготавливают конструктивные части машины, воспринимающие и передающие механические нагрузки: станины (корпуса), подшипниковые щиты, подшипники, валы, вентиляторы, контактные и другие устройства. В качестве конструкционных материалов используют литые сталь и чугун, цветные металлы и их сплавы, высокопрочные пластмассы.

1.5. Назначение и область применения трансформаторов

В данном учебном пособии основополагающие законы электромеханического преобразования энергии электрических машинах рассматриваются в применении к трансформатору, как к устройству, наиболее простому по принципу преобразования энергии.

По назначению и области применения современные трансформаторы можно разделить на несколько групп.

Силовые трансформаторы – служат для повышения или понижения напряжения в электрических сетях и системах передачи и распределения электрической энергии.

Напряжение генераторов на электрических станциях не превышает 6–20 кВ. Передавать на большие расстояния электроэнергию при таком напряжении невыгодно из-за больших электрических потерь в линиях электропередач (ЛЭП). Увеличение вторичного напряжения приводит к пропорциональному уменьшению тока. Так, например, при уменьшении тока в 10 раз потери электроэнергии в линии ЛЭП уменьшаются в 100 раз. Поэтому на всех электростанциях устанавливают повышающие трансформаторы, увеличивающие напряжения в ЛЭП до стандартных значений 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ. Повышающие трансформаторы, устанавливаемые на мощных генерирующих станциях, имеют мощность до 1 млн кВА.

На распределительных подстанциях напряжение понижается до 35, 10, 6 кВ. А потребление электроэнергии электроприёмниками на местах осуществляется при напряжении 220, 380, 660 В. Следовательно, необходимо снижение напряжения до требуемых величин, что осуществляется понижающими трансформаторами.

Таким образом, в энергосистемах происходит многократное от 3 до 5 раз преобразование величины напряжения, осуществляемое *силовыми трансформаторами*.

Преобразовательные трансформаторы – применяют для согласования напряжений в вентильных преобразовательных установках, обеспечивающих преобразование переменного напряжения в постоянное или в переменное напряжение регулируемой частоты. Их первичное напряжение соответствует напряжению питающей сети, а вторичное – выходному напряжению данного типа преобразователя. Мощности преобразовательных трансформаторов достигают несколько тысяч кВА, а напряжения первичных обмоток – до 110 кВ.

Трансформаторы технологических установок – предназначены для питания электротехнологических установок и процессов (электropечные, сварочные трансформаторы и др.). Мощность таких трансформаторов достигает нескольких десятков тысяч кВА, напряжение – до 10 кВ.

Трансформаторы автоматики и вычислительной техники – применяют в выпрямительных блоках питания устройств автоматики, вычислительной техники и т.д. Трансформаторы имеют мощность от сотен ВА до единиц кВА, первичным напряжением 220, 380 В.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока – используются в электрических сетях для измерения высоких напряжений и больших значений тока, которые нельзя измерить непосредственно вольтметрами и амперметрами, а также для подключения к ним электрических аппаратов защиты и автоматики.

Несмотря на широкую область применения, различие по своему назначению и выполняемым функциям, трансформаторы по принципу действия, основным режимам работы подчиняются единым законам электродинамики, рассмотренным выше. Активная часть трансформаторов (обмотки, магнитопроводы), изоляция токоведущих элементов от магнитопровода и конструктивных частей выполнена из приведенных выше материалов. В последующих главах учебного пособия достаточно подробно будут изложены вопросы теории и практического использования трансформаторов.

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

2.1. Принцип действия трансформатора

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство с двумя или большим числом индуктивно связанных обмоток, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции:

Значение электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в обмотках трансформатора, прямо пропорционально изменению магнитного потока Φ , сцепленного с этими обмотками.

Направление наведённой ЭДС определяется законом Ленца:

Ток, протекающий под действием наведенной в обмотках ЭДС, стремится воспрепятствовать изменению магнитного потока, сцепленного с обмотками. Следовательно, ЭДС, наведенная в обмотках трансформатора магнитным потоком,

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.1)$$

где $\psi = w\Phi = iL$ – потокосцепление обмотки трансформатора; w – число витков обмотки; i – мгновенное значение тока, протекающего по обмотке; L – индуктивность обмотки.

Рассмотрим принцип работы трансформатора на примере однофазного двухобмоточного трансформатора. Электромагнитная схема такого трансформатора (рис. 2.1) состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе. Магнитопровод для усиления магнитной связи между обмотками выполнен из ферромагнитного материала с малым магнитным сопротивлением. Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), обмотку более низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Обмотка, которую включают в сеть, – это первичная обмотка. Число витков первичной обмотки w_1 . Обмотка, к которой подключают нагрузку, – вторичная обмотка с числом витков w_2 .

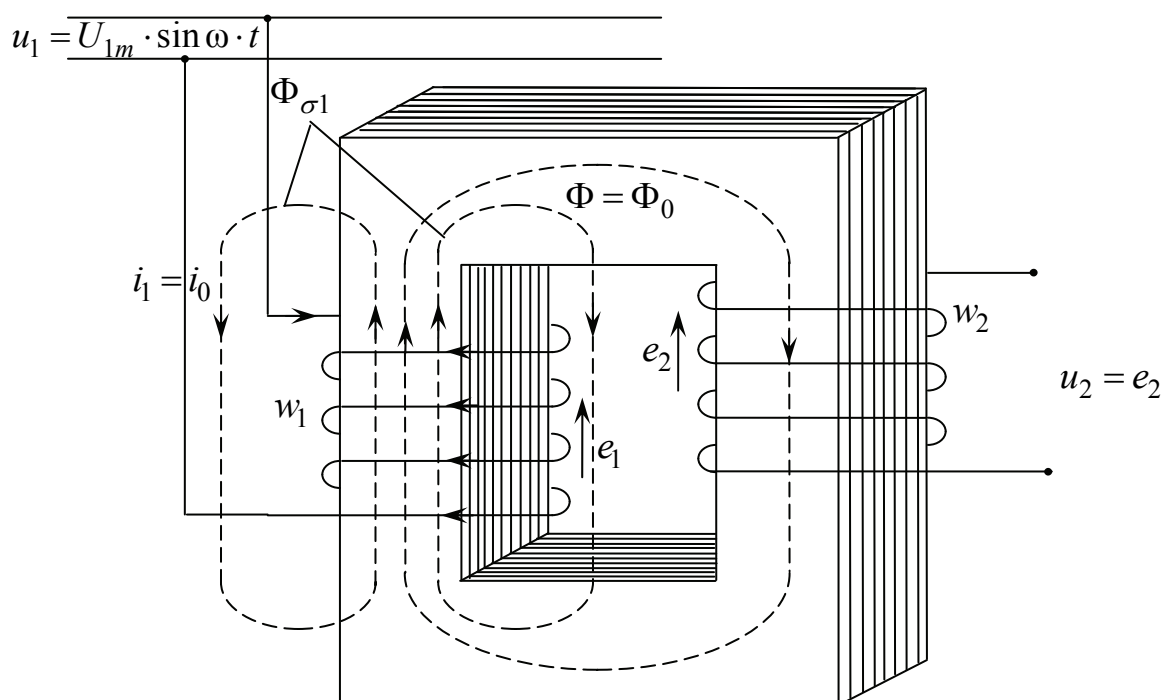


Рис. 2.1. Принцип действия трансформатора
(режим холостого хода)

В качестве нагрузки трансформатора может быть линия электропередач или автономный потребитель. Первичная и вторичная обмотки могут быть как ВН, так и НН.

В режиме холостого хода первичную обмотку подключают к сети переменного тока с синусоидальным напряжением $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$. Вторичная обмотка трансформатора в режиме холостого хода разомкнута (нагрузка к зажимам вторичной обмотки не подключена).

По первичной обмотке трансформатора протекает ток i_1 . В режиме холостого хода ток первичной обмотки называют током холостого хода $i_1 = i_0$. Ток холостого хода, протекая по виткам w_1 , создает магнитодвижущую силу (потенциал магнитного поля):

$$F_0 = i_0 w_1. \quad (1.2)$$

Магнитодвижущая сила (МДС) F_0 возбуждает в магнитопроводе трансформатора переменное магнитное поле. Магнитное поле удобно представить в виде наложения двух полей:

1. *Основное поле* (поле взаимоиндукции), поток Φ которого на холостом ходу полностью замыкается по магнитопроводу. Основной магнит-

ный поток Φ сцеплен почти со всеми витками первичной и вторичной обмоток трансформатора.

2. *Поток рассеяния*, поток $\Phi_{\sigma 1}$ которого замыкается частично по магнитопроводу, а частично вне магнитопровода по маслу и конструктивным частям трансформатора. Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ сцеплен только с витками первичной обмотки.

Основной магнитный поток Φ (поток взаимоиндукции) участвует в преобразовании энергии в трансформаторе. Этот поток замыкается по магнитопроводу из ферромагнитного материала, и величина потока, согласно закону Ома для магнитной цепи,

$$\Phi = \Phi_0 = \frac{F_0}{R_\mu} = \frac{i_0 w_1}{R_\mu}, \quad (2.3)$$

где $R_\mu = \frac{l}{\mu \cdot \Pi_c}$ – магнитное сопротивление магнитопровода. Магнитное сопротивление зависит от длины магнитной линии l потока Φ , площади Π_c магнитопровода, пронизываемой этим потоком и от магнитной проницаемости μ материала, по которому замыкается поток. Магнитная проницаемость электротехнических сталей составляет $\mu = 5 - 100$ Гн/м. Магнитная проницаемость вакуума (воздуха) – $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Основной магнитный поток Φ в соответствии с законом электромагнитной индукции наведет в первичной обмотке ЭДС самоиндукции:

$$e_1 = -\frac{d\psi}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -L_1 \frac{di_0}{dt}, \quad (2.4)$$

во вторичной обмотке – ЭДС взаимоиндукции:

$$e_2 = -\frac{d\psi}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -M_{12} \frac{di_0}{dt}. \quad (2.5)$$

В выражениях (2.4) и (2.5) L_1 – индуктивность первичной обмотки, M_{12} – взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток.

Магнитный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ наведет в первичной обмотке ЭДС рассеяния

$$e_{1\sigma} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 0}}{dt} = -\frac{d\Psi_{\sigma 0}}{dt}. \quad (2.6.)$$

Наведенные в первичной обмотке ЭДС e_1 и $e_{1\sigma}$ вместе с падением напряжения на ее активном (омическом) сопротивлении r_1 уравниваются, согласно второму закону Кирхгофа, подводимым напряжением сети:

$$u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + r_1 i_0, \quad (2.7)$$

а напряжение вторичной обмотки при холостом ходе не отличается от наведенной в ней ЭДС:

$$u_2 = e_2, \quad (2.8)$$

поскольку в этом случае ток по вторичной обмотке не протекает.

Поскольку при холостом ходе падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки очень мало, а поток рассеяния, замыкающийся по немагнитным путям (среде с проницаемостью μ_0), также незначителен, уравнение (2.7) может быть представлено в виде

$$u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) называют уравнением напряжения первичной обмотки идеального трансформатора.

При включении трансформатора в сеть синусоидального напряжения ЭДС e_1 , индуцированная в его первичной обмотке, также будет изменяться синусоидально:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{1\max} \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t. \quad (2.10)$$

Разделением переменных в (2.10) получают

$$d\Phi = -\frac{\sqrt{2} E_1}{w_1} \sin \omega t \cdot dt, \quad (2.11)$$

откуда основной магнитный поток трансформатора

$$\Phi = -\frac{\sqrt{2}E_1}{w_1} \int \frac{\sin \omega t \cdot dt}{\omega} = \frac{\sqrt{2}E_1}{w_1\omega} \cos \omega t = \frac{\sqrt{2}E_1}{w_1\omega} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (2.12)$$

Следовательно, при синусоидальном напряжении, приложенном к первичной обмотке трансформатора, магнитный поток *синусоиден* и опережает ЭДС на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 2.2).

Максимальное (амплитудное) значение магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E_1}{w_1\omega}, \quad (2.13)$$

из которого (с учетом значения угловой частоты $\omega = 2\pi f$) действующее значение ЭДС первичной обмотки

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad (2.14),$$

а по аналогии с (2.14) ЭДС вторичной обмотки

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (2.15)$$

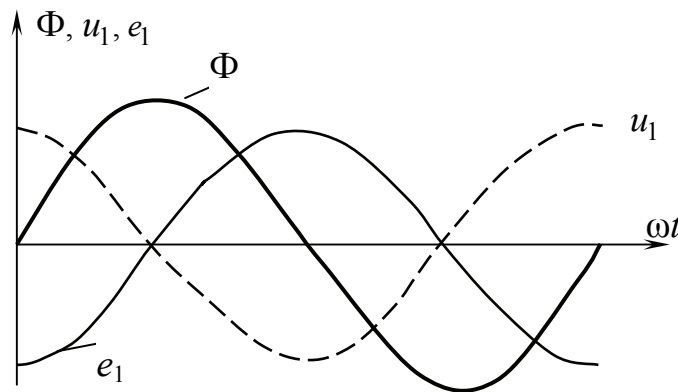


Рис. 2.2. Изменение ЭДС, напряжения и магнитного потока во времени

Отношения мгновенных и действующих значений ЭДС в обмотках определяются выражением

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.16)$$

Падением напряжения на сопротивлениях первичной обмотки можно пренебречь, т. к. оно не превышает 3...5 % от номинального значения. Тогда выражение (2.16) перепишем в виде

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.17)$$

Следовательно, подбирая число витков w_1 и w_2 , при заданном напряжении U_1 получаем требуемое напряжение U_2 :

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1. \quad (2.18)$$

Если необходимо повысить вторичное напряжение $U_2 > U_1$, то число витков w_2 берут больше w_1 ($w_2 > w_1$), такой трансформатор называют повышающим.

Если необходимо понизить вторичное напряжение $U_2 < U_1$, то число витков w_2 берут меньше w_1 ($w_2 < w_1$), такой трансформатор называют понижающим.

В режиме холостого хода трансформатор возбужден, т. е. в магнитопроводе замыкается переменный магнитный поток, наводящий в обмотках трансформатора ЭДС.

При подключении к вторичной обмотке возбужденного трансформатора сопротивления нагрузки $z_{\text{нп}}$ (рис. 2.3) под действием ЭДС e_2 по обмотке потечет ток i_2 и создаст МДС:

$$F_2 = i_2 w_2. \quad (2.19)$$

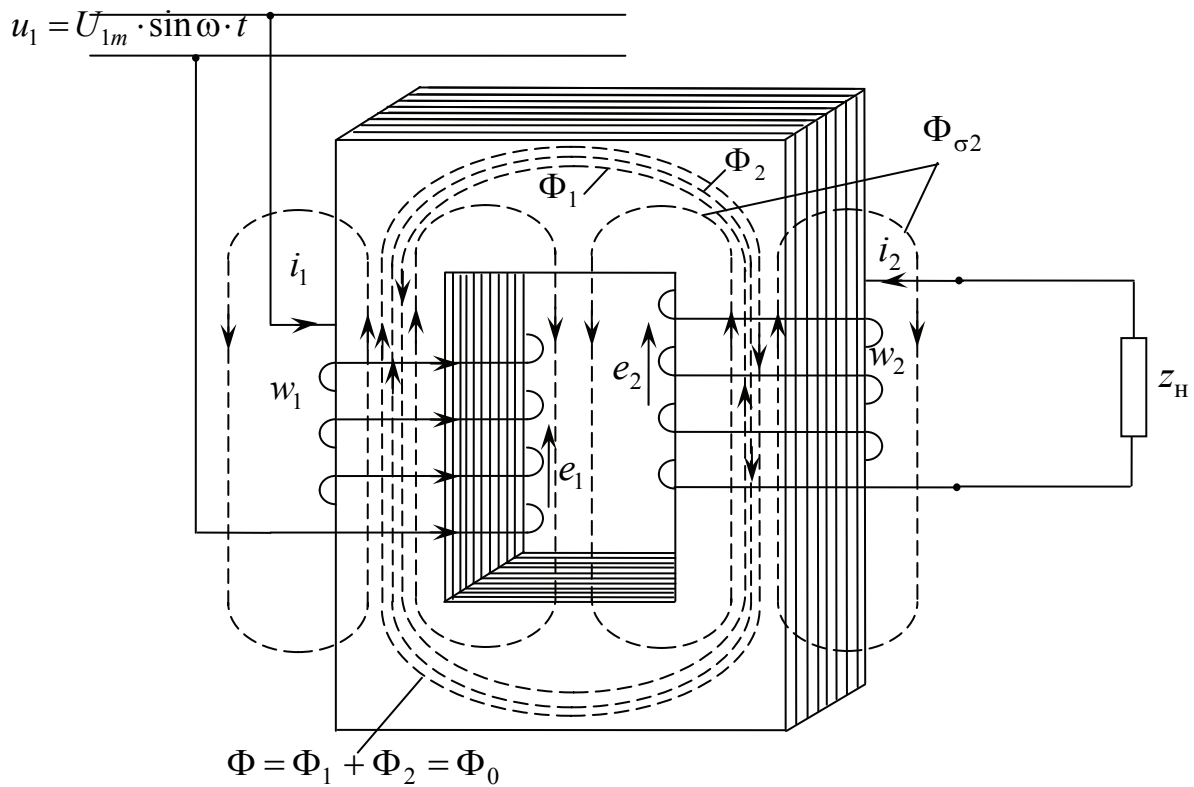


Рис. 2.3. Принцип действия трансформатора (режим нагрузки)

МДС F_2 возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток Φ_2 , направленный встречно потоку Φ_0 , который создавался первичной обмоткой в режиме холостого хода:

$$\Phi_2 = \frac{F_2}{R_\mu} = \frac{i_2 w_2}{R_\mu}. \quad (2.20)$$

Результирующий магнитный поток $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_2$ уменьшается, при этом ЭДС e_1 также уменьшается и не уравнивает напряжение u_1 , подведенное к первичной обмотке. Равенство $u_1 \approx -e_1$ не выполняется. Потребляемый первичной обмоткой ток *увеличивается* по сравнению с режимом холостого хода $i_1 > i_0$. Увеличенный ток первичной обмотки i_1 создаст МДС:

$$F_1 = i_1 w_1. \quad (2.20)$$

Эта МДС больше МДС холостого хода $F_1 > F_0$ и возбуждает больший магнитный поток $\Phi_1 > \Phi_0$. Увеличенный магнитный поток Φ_1 компенсирует размагничивающее действие потока Φ_2 . Поэтому результирующий магнитный поток при нагрузке трансформатора не изменится:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = \text{const}. \quad (2.21)$$

Таким образом, при нагрузке магнитное поле трансформатора создается совместным действием МДС первичной F_1 и вторичной F_2 обмоток, сумма которых равна МДС, создаваемой первичной обмоткой при холостом ходе F_0 :

$$\dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 = \text{const} \quad (2.22)$$

или

$$w_1 I_0 = w_1 I_1 + w_2 I_2. \quad (2.23)$$

Взаимно уравновешенные МДС первичной обмотки и МДС вторичной обмотки создают поле рассеяния, поток Φ_σ которого замыкается главным образом вне магнитопровода. Этот поток целесообразно представить в виде суммы двух потоков, один из которых – $\Phi_{\sigma 1}$ – сцеплен только с витками первичной обмотки, другой – $\Phi_{\sigma 2}$ – только с витками вторичной обмотки. Потоки рассеяния первичной $\Phi_{\sigma 1}$ и вторичной $\Phi_{\sigma 2}$ обмоток индуцируют в них ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$ и $e_{\sigma 2}$.

Неизменность магнитного потока трансформатора при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора.

Уравнения напряжений первичной и вторичной обмоток для нагруженного трансформатора, согласно второму закону Кирхгофа, имеют следующий вид:

$$u_1 = e_1 - e_{\sigma 1} + r_1 \cdot i_1, \quad (2.23)$$

$$u_2 = e_2 + e_{\sigma 2} - r_2 i_2, \quad (2.24)$$

где r_2 – активное (омическое) сопротивление вторичной обмотки.

Коэффициент полезного действия современных трансформаторов составляет 97–99,7 %. Поэтому мощность первичной и вторичной обмоток трансформатора приблизительно одинакова (реальная мощность во вторичной обмотке несколько меньше из-за наличия внутренних потерь энергии):

$$S_1 \approx S_2, \quad (2.25)$$

где $S_1 = U_1 I_1$ – полная мощность одной фазы первичной обмотки; $S_2 = U_2 I_2$ – полная мощность одной фазы вторичной обмотки. Следовательно, токи в обмотках трансформируются обратно пропорционально напряжению обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.26)$$

Из формулы (2.26) следует, что при увеличении вторичного напряжения в k раз по сравнению с первичным напряжением ток во вторичной обмотке уменьшится соответственно в k раз.

Коэффициент k называют коэффициентом трансформации. Согласно ГОСТу, коэффициент трансформации $k \geq 1$ определяется как отношение ЭДС обмотки высшего напряжения $E_{\text{вн}}$ к ЭДС обмотки низшего напряжения $E_{\text{нн}}$ (или отношение их чисел витков):

$$k = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{нн}}} = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{нн}}} \quad (2.27)$$

В практике эксплуатации трансформаторов коэффициент трансформации определяется как отношение номинальных напряжений, отношение ЭДС, чисел витков, обратное отношение токов первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (2.28)$$

Работа трансформатора возможна только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к сети постоянного тока с напряжением $u_{\text{п}}$, то в его магнитопроводе образуется постоянный, не меняющийся во времени, по величине и направлению магнит-

ный поток Φ_{Π} . ЭДС E_1 и E_2 в обмотках трансформатора не индуцируются так, как нет изменения потокоцепления (производная от постоянного числа равна 0):

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_{\Pi}}{dt}; \quad (2.29)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_{\Pi}}{dt}. \quad (2.30)$$

Следовательно, электрическая энергия из первичной обмотки во вторичную не передается. Такой режим является аварийным режимом работы трансформатора, так как напряжение постоянного тока уравнивается только падением напряжения на омическом сопротивлении первичной обмотки:

$$u_{\Pi} = r_1 i_1 \quad (2.31)$$

Соответственно, ток в первичной обмотке в десятки раз превышает номинальное значение:

$$i_1 = \frac{u_{\Pi}}{r_1}. \quad (2.32)$$

Трансформаторы в устройствах автоматики и радиоэлектроники служат также для преобразования нагрузочного сопротивления и позволяют изменить сопротивление в k^2 раз.

Если к источнику переменного тока через трансформатор подключить сопротивление r , то для цепи источника величина сопротивления

$$r' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{r i_2^2}{I_1^2} \approx k^2 r, \quad (2.33)$$

где P_1 – потребляемая трансформатором от источника мощность; $P_2 \approx P_1 = r I_2^2$ – мощность, потребляемая сопротивлением r от трансформатора.

Это свойство трансформатора используют для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

2.2. Устройство трансформаторов

В основном трансформаторы используют для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

Различают двух-, трех- и многообмоточные трансформаторы, имеющие, соответственно, две, три и более гальванически не связанные обмотки. Передача энергии из первичной цепи во вторичную происходит посредством магнитного поля.

Конструкция трансформатора определяется его назначением, мощностью и напряжением. *Силовыми* называют трансформаторы, применяемые в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. К силовым относятся трансформаторы трехфазные и многофазные мощностью 6,3 кВА и более, и однофазные мощностью 5 кВА и более.

Различают силовые трансформаторы общего назначения и специального назначения. Силовые трансформаторы *общего назначения* предназначены для включения в сети, не отличающиеся особыми условиями работы, или для непосредственного питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы. Силовые трансформаторы *специального назначения* предназначены для непосредственного питания сетей и приемников электрической энергии, если эти сети или приемники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. К числу таких сетей и приемников электрической энергии относятся, например подземные рудничные и шахтные сети и установки, выпрямительные установки (для электрифицированного транспорта, электролизных установок), электротермические печи.

В прилагаемых к трансформатору сопроводительных документах изготовителем указываются номинальные данные: мощность, напряжение обмоток, частота и т. д., обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативными документами.

Номинальной мощностью двухобмоточного трансформатора является номинальная мощность каждой из его обмоток, а в трехобмоточном трансформаторе – наибольшая из номинальных мощностей трех его обмоток.

За номинальное напряжение обмотки принимается напряжение между соответствующими зажимами, связанными с данной обмоткой при холостом ходе трансформатора.

Трансформаторы, у которых основной изолирующей средой служит воздух, газ или твердый диэлектрик, а охлаждающей средой – воздух,

называют *сухими*. Сухие трансформаторы применяют при мощностях 1600–2500 кВА, напряжении до 20 кВ и устанавливаются в помещениях с относительной влажностью воздуха до 80 %. Для улучшения электрической изоляции токопроводящих частей и условий охлаждения обмотки вместе с магнитной системой погружают в бак с трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называют *масляными*. До мощности 6300 кВА применяют трансформаторы с естественной циркуляцией масла и воздуха, охлаждающего радиаторы (тип трансформатора М). При большей мощности применяют трансформаторы с принудительной циркуляцией воздуха (тип Д) или принудительной циркуляцией масла (тип МЦ и НМЦ). Баки некоторых трансформаторов вместо масла наполняют негорючей синтетической жидкостью – совтолом.

Далее в основном будут рассматриваться силовые масляные трансформаторы общего назначения, представление об устройстве которых даёт рис. 2.4.

Основными частями трансформатора являются магнитная система (магнитопровод), обмотки и система охлаждения.

Магнитная система служит для проведения и концентрации магнитного потока и изготавливается из изолированных листов электротехнической стали с целью уменьшения вихревых токов. Основные конструктивные типы трансформаторов обусловлены конструкцией их магнитных систем: стержневых и броневых.

Обмотки изготавливаются из медного или алюминиевого провода или фольги. В витках обмотки основным магнитным потоком наводится ЭДС. В трехфазном трансформаторе под обмоткой понимают совокупность соединенных между собой обмоток одного напряжения разных фаз.

В двухобмоточном трансформаторе различают обмотку высшего напряжения (ВН), присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку низшего напряжения (НН), присоединяемую к сети более низкого напряжения. Обмотку трансформатора, к которой подводится электрическая энергия, называют первичной, а обмотку, от которой энергия отводится, – вторичной. В трехобмоточном трансформаторе различают обмотки высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжения.

Масляный трансформатор (рис. 2.4) состоит из остова (замкнутая магнитная система 8 в сборе с деталями крепления 1, 5, 6); установленных на магнитной системе обмоток 2; переключающего устройства 10 для регулирования напряжения; устанавливаемых обычно на крышке бака вводов 12, 14 высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН) соответственно; отводов 3, 9; бака 7, охладителей (радиаторов) 24, защитных, контрольно-измерительных и вспомогательных устройств.

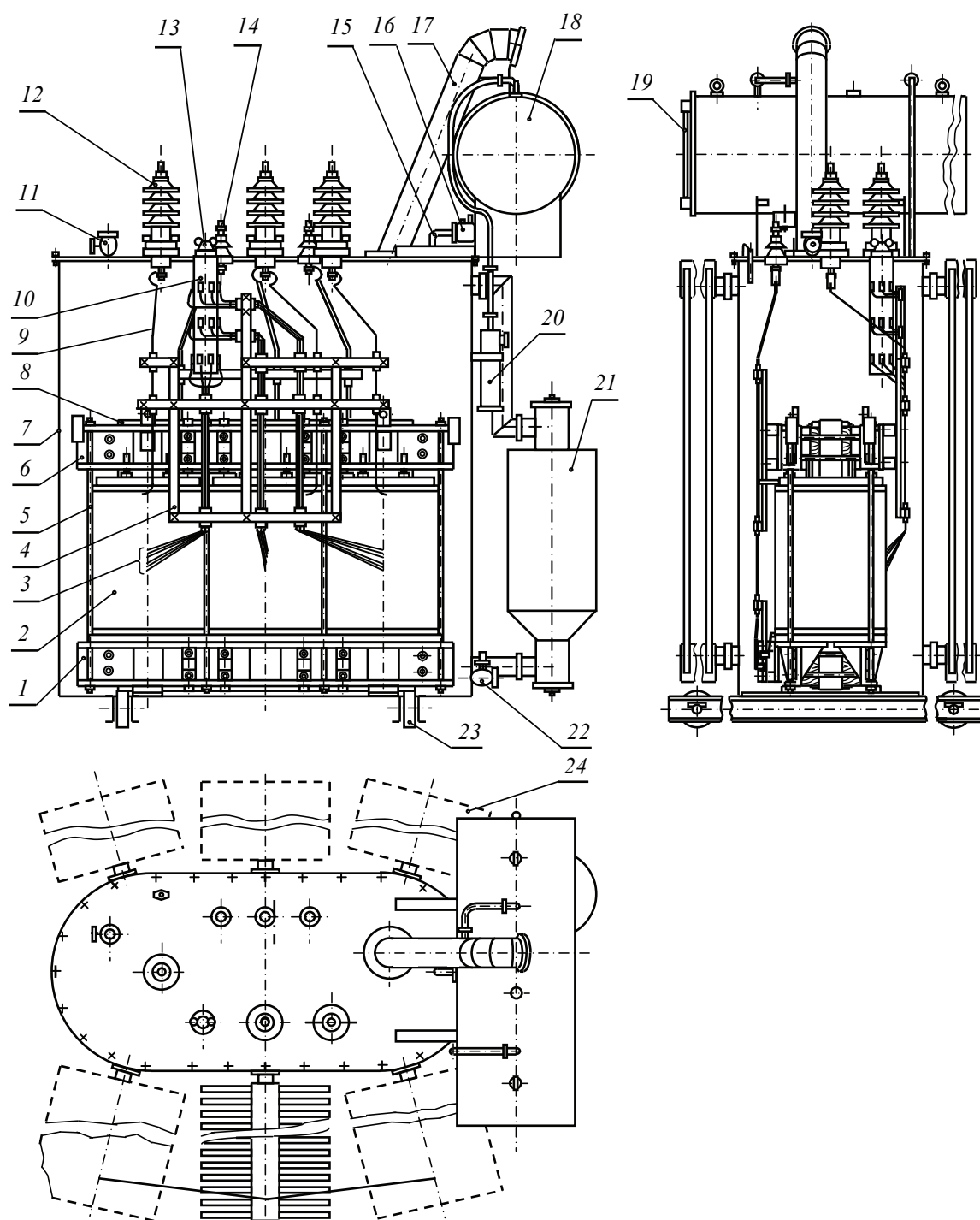


Рис. 2.4. Общий вид силового трансформатора общего назначения: 1 – нижняя ярмовая балка; 2 – обмотка ВН; 3 – регулировочные ответвления; 4 – деревянные планки; 5 – вертикальная прессующая шпилька; 6 – верхняя ярмовая балка; 7 – бак; 8 – магнитопровод; 9 – линейный отвод; 10 – переключатель; 11 – кран для заливки масла; 12 – ввод ВН; 13 – привод переключателя; 14 – ввод НН; 15 – маслопровод; 16 – газовое реле; 17 – выхлопная труба; 18 – расширитель; 19 – маслоуказатель; 20 – воздухоосушитель; 21 – термосифонный фильтр; 22 – кран для слива масла; 23 – каток; 24 – радиатор (на фронтальной проекции не показаны радиаторы охлаждения)

Остов трансформатора, обмотки, части регулирующего устройства, собранные на магнитной системе отводы и соединяющие детали называют *активной частью* трансформатора.

Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением (сухие трансформаторы) обычно не имеют специальной системы охлаждения. Сухие трансформаторы применяют при мощностях 1600–2500 кВА, напряжении 20 кВ и устанавливают в помещениях с относительной влажностью воздуха до 80 %. В масляных трансформаторах в систему охлаждения входят бак трансформатора, заливаемый маслом, а для мощных трансформаторов еще и охладители, вентиляторы, масляные насосы, теплообменники и т. д. Трансформаторы с охлаждением типа М применяют до мощности 6300 кВА. Охлаждение масла в них осуществляется естественной циркуляцией масла внутри бака, выходом нагретого масла в радиаторы, расположенные по боковым стенкам бака и служащие для увеличения поверхности охлаждения при прохождении его по трубам радиаторов. Иногда (в трансформаторах мощностью до 10–160 кВА) применяют ребристые баки для увеличения охлаждающей поверхности. При мощностях 10000–80000 кВА применяют системы типа Д, предусматривающие принудительную вентиляцию воздуха вдоль наружных поверхностей радиаторов при естественной циркуляции в них масла.

В этом случае теплоотдача увеличивается почти в два раза по сравнению с охлаждением типа М. В трансформаторах мощностью до 400000 кВА используют принудительную циркуляцию масла через специальные малогабаритные охладители с принудительным воздушным охлаждением (охлаждение типа ДЦ и НДЦ). Для более эффективного охлаждения применяются водяные охладители масла (тип охладителя Ц и НЦ). Водяные охладители компактнее, чем воздушные, и позволяют рассеивать большую мощность.

В трансформаторах с охлаждением типа Н, НД и ННД активную часть помещают в бак, заполненный синтетической негорючей и неокисляющейся жидкостью – совтолом, у которого диэлектрические свойства и теплопроводность такие же, что и у масла, но он дороже.

Для защиты от соприкосновения с воздухом и окисления нагретого при работе трансформатора масла бак закрыт крышкой, уплотненной прокладкой из маслостойкой резины. Постоянное давление внутри бака поддерживается при изменении температуры за счет перетока масла из бака 7 в расширитель 18 и обратно по соединительному патрубку маслопровода 15 (рис. 2.4).

Внутренний объем расширителя сообщается с окружающим воздухом через воздухоосушитель 20, служащий для удаления влаги из поступающего в расширитель воздуха. Из-за разницы температур в верхней

и нижней частях бака масло течёт через термосифонный фильтр 21 и в нём очищается от влаги и продуктов окисления.

При небольших повреждениях, сопровождающихся разложением масла в баке и газовыделением, газовое реле 16 реагирует на выделение газа и подаёт сигнал на щит управления или на отключение трансформатора от сети. В случае бурного газовыделения кипящее масло вместе с газами разрушает мембрану, закрывающую выхлопную трубу 17 и удаляется через нее, что предохраняет бак от механических деформаций и повреждений.

В силовых трансформаторах предусмотрены устройства для контроля уровня 19 и температуры масла в баке; транспортировки – крюки и катки 23; краны 11 и 22 для заливки и слива масла.

Силовые трансформаторы общего назначения отличаются конструктивным исполнением, условиями работы, способом охлаждения, номинальными мощностью и напряжением, что находит своё отражение в обозначении типа трансформатора.

Условное обозначение типа силового трансформатора имеет следующий вид:

$$\frac{X}{1} \frac{X}{2} \frac{X}{3} \frac{X}{4} \frac{X}{5} \frac{X}{6} - \frac{S_n}{7} / \frac{U_{нл}}{8} - \frac{X}{9} \frac{X}{10}$$

Первые шесть позиций образуют буквенное обозначение типа и могут принимать следующие значения:

- 1 – для автотрансформатора – А, в обозначении трансформатора позиция 1 отсутствует;
- 2 – если трансформатор однофазный – О, трехфазный – Т;
- 3 – при наличии расщеплённой обмотки низшего напряжения (НН) – Р, позиция 3 в обозначении отсутствует, если нет расщеплённой обмотки НН;
- 4 – для трехобмоточного трансформатора – Т (для двухобмоточного обозначения нет);
- 5 – способ охлаждения – одна или три буквы;
- 6 – если в одной из обмоток есть ответвления для регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) – Н, позиция 5 в обозначении отсутствует (регулирующее устройство без нагрузки ПВВ не обозначается).

Позиции 7 и 8 определяют, соответственно, номинальные полную мощность S_n , в киловольт-амперах (кВА), и линейное напряжение (класс напряжения) обмотки высшего напряжения (ВН) $U_{нл}$ в киловольтах (кВ). Позиции 9 и 10 характеризуют, соответственно, климатическое исполнение и категорию размещения трансформатора, например, У2 – умеренный климат, неотапливаемое сырое помещение. В марках трансформаторов собственных нужд электростанций перед позицией 7 ставят букву С.

Например:

ТМН 630/35 – трансформатор трехфазный масляный с регулированием под нагрузкой, мощностью 630 кВА и напряжением первичной стороны 35 кВ.

ТРДНС-16000/20 – трансформатор трехфазный с расщепленной обмоткой НН, принудительной циркуляцией воздуха, регулированием под нагрузкой, для собственных нужд электростанции, мощностью 16000 кВА, первичным напряжением 20 кВ.

В зависимости от мощности и класса напряжения силовые трансформаторы подразделяются на восемь габаритов:

I габарит включает трансформаторы мощностью до 100 кВА классов напряжения до 35 кВ;

II – от 100 до 1000 кВА напряжением до 35 кВ;

III – от 1000 до 6300 кВА напряжением до 35 кВ;

IV – свыше 6300 кВА напряжением до 35 кВ;

V – до 32 000 кВА, напряжением до 110 кВ;

VI – свыше 32 000 до 80 000 кВА напряжением до 330 кВ;

VII – свыше 80 000 до 200 000 кВА напряжением до 330 кВ;

VIII – свыше 200 000 кВА напряжением более 330 кВ;

2.3. Виды трансформаторов и магнитопроводов

Трансформатор, в каждой фазе которого по одной первичной и по одной вторичной обмотке, называется двухобмоточным. Кроме двухобмоточных трансформаторов, применяют многообмоточные трансформаторы с одной первичной и несколькими вторичными обмотками (до 10–15 обмоток в трансформаторах радиотехники). Многообмоточные силовые трансформаторы обычно выпускаются трехобмоточными (одна обмотка первичная, две обмотки вторичные). Наибольшее распространение получили двухобмоточные силовые трансформаторы.

По числу фаз m чаще всего применяются однофазные $m=1$ и трехфазные $m=3$ трансформаторы (рис. 2.5, а, б). Трансформаторы с другим числом фаз используются в специальных устройствах.

Силовые трансформаторы, которые служат для преобразования энергии в электрических сетях переменного тока на электростанциях, подстанциях, промышленных предприятиях, в городских сетях, сельском хозяйстве, являются наиболее распространенным и важным классом трансформаторов. Кроме силовых трансформаторов, существует целый ряд трансформаторов специального назначения: выпрямительные, сварочные, измерительные, печные и др.

Основные вопросы теории являются общими для всех видов трансформаторов. Магнитопровод стержневого трансформатора имеет стержни, на которых размещаются обмотки, и ярма, которые служат для создания замкнутого магнитопровода.

В стержневых магнитопроводах (рис. 2.5, а, б) ярма соединяют разные стержни по их торцам. На каждом стержне есть обмотки в виде концентрических цилиндров. При мощности до 100000 кВ·А наибольшее распространение получили плоские стержневые магнитные системы. Ярма и стержни в таких трансформаторах расположены в одной плоскости. Трехфазные стержневые магнитопроводы (рис. 2.5, б) магнитно несимметричны, так как длина магнитопровода для средней фазы несколько меньше, чем для крайних фаз.

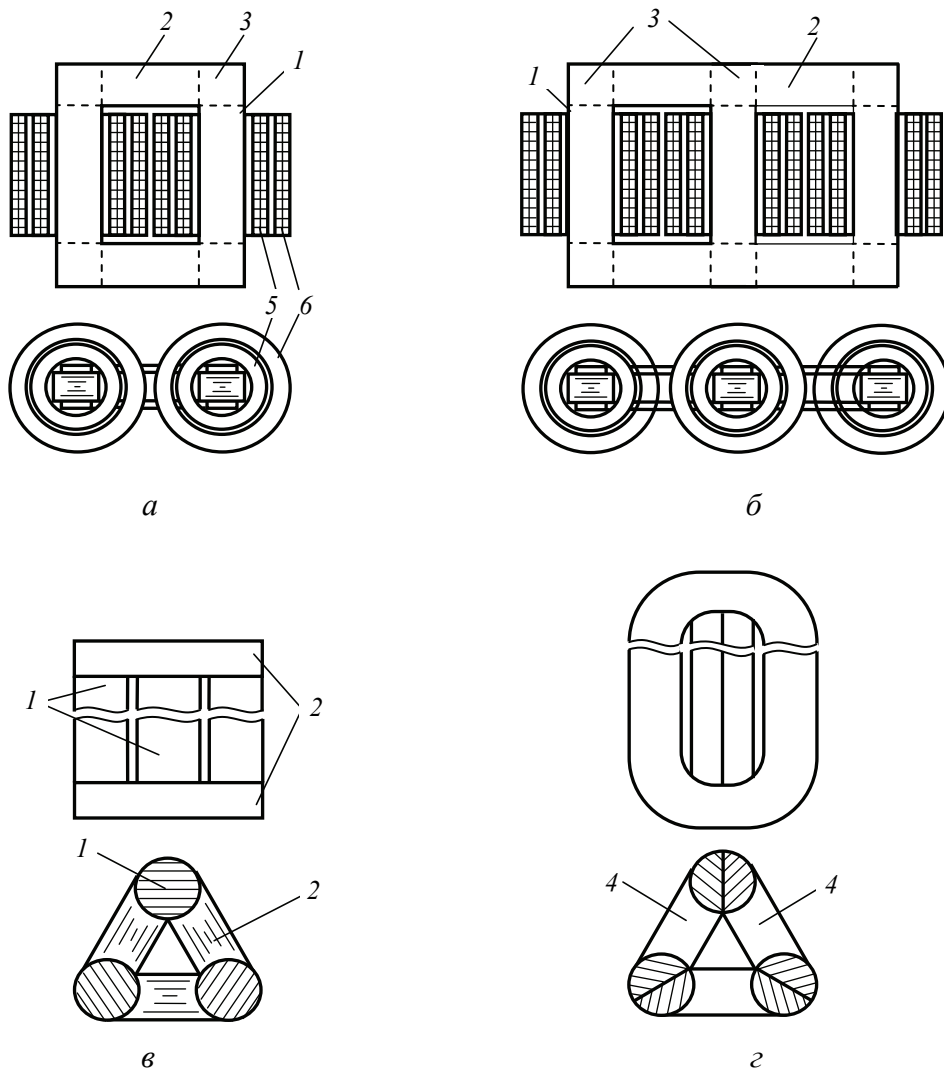


Рис. 2.5. Схемы стержневых плоских (а, б) и пространственных (в, г) магнитопроводов однофазного (а) и трехфазных (б, в, г) трансформаторов: 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — угол магнитной системы; 4 — навитое кольцо; 5 — обмотка НН; 6 — обмотка ВН

Вследствие этого ток в обмотках среднего стержня несколько меньше, чем в обмотках крайних стержней. Уменьшение несимметрии токов достигается выполнением сечения ярм большим сечения стержней, что уменьшает сопротивление прохождению магнитных потоков по ярмам. Полностью магнитную несимметрию устраняют применением стержневых пространственных магнитопроводов различных типов, с осями стержней и ярм в разных плоскостях (рис. 2.5, в, г). За счет симметрии магнитопровода в них снижена масса и потери холостого хода. Их широко применяют в трансформаторах мощностью до 6300 кВ. В *броне*вых магнитопроводах (рис. 2.6) боковые ярма соединяют концы стержней и «обхватывают» обмотки.

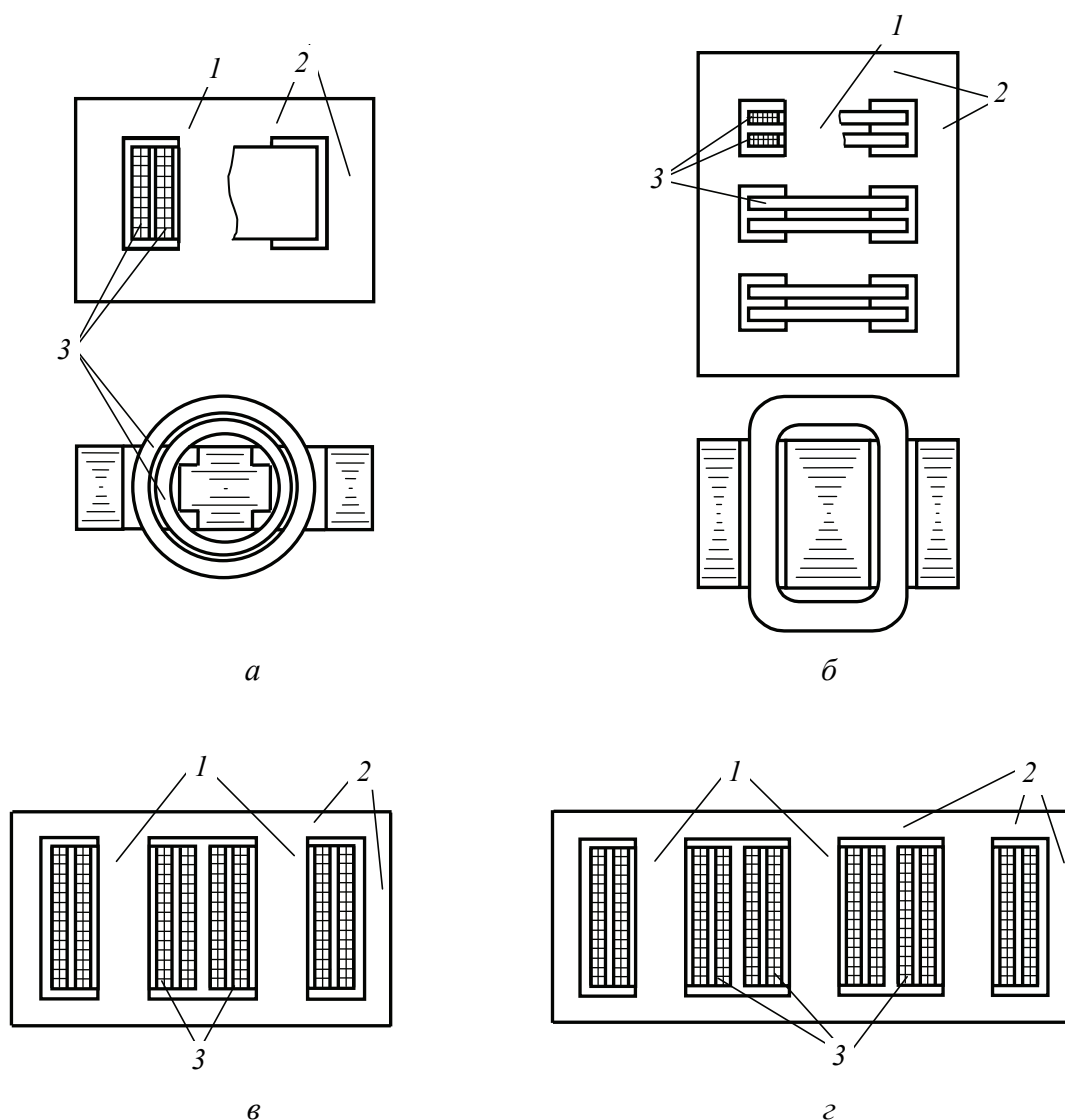


Рис. 2.6. Схемы броневого (а, б) и бронестержневого (в, г) магнитопроводов однофазных (а, в) и трехфазных (б, г) трансформаторов: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – обмотки

Магнитный поток в ярмах однофазной магнитной системы вдвое меньше, чем в стержне, что позволяет уменьшить в два раза сечения ярма относительно стержня.

В трехфазных броневого трансформаторах для выполнения этих соотношений у обмоток средней фазы изменяют маркировку концов или направление намотки относительно других фаз. В противном случае увеличатся в $\sqrt{3}$ магнитные потоки в общих частях ярма между окнами магнитопровода. Соответственно, придется в $\sqrt{3}$ увеличивать сечения ярм на этих участках, что приведет к увеличению массы, габаритов стоимости всего магнитопровода и трансформатора.

Броневого магнитопроводы применяют в однофазных трансформаторах малой мощности. Трехфазный броневой трансформатор можно рассматривать как три однофазных броневого трансформатора, поставленных друг на друга или рядом. Трехфазные силовые трансформаторы с броневого магнитопроводом в России не производят. Такие трансформаторы выпускают некоторые иностранные фирмы.

В трансформаторах мощностью более 100000 кВА, высота которых ограничена условиями транспортировки по железным дорогам, применяют стержневой магнитопровод с разветвленными ярмами (рис. 2.6, в, г), называемом бронестержневым (или пятистержневым). В однофазном бронестержневом трансформаторе (рис. 2.6, в) на каждый стержень приходится по одному боковому ярму и поток ярма равен половине потока стержня, а в трехфазной конструкции (рис. 2.6, г) только два стержня из трех имеют боковые ярма и поток ярма меньше потока стержня в $\sqrt{3}$ раз. За счет применения боковых ярм в бронестержневом трансформаторе, по сравнению со стержневым, высота торцевых ярм в однофазной конструкции может быть уменьшена в 2 раза, а в трехфазной – в $\sqrt{3}$ раз. Вследствие этого уменьшается высота магнитопровода и всего трансформатора. По способу соединения стержней с ярмами магнитопроводы подразделяют на стыковые, шихтованные и ленточные (навитые).

В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают из пластин электротехнической стали отдельно, прессуют, а затем соединяют (стыкуют) в единый сердечник уже после установки обмоток на стержни. Достоинство конструкции – простота сборки магнитопровода. Недостаток – слишком велики зазоры в стыках, которые приводят к повышению тока и потерь холостого хода, снижению КПД. Механическая обработка стыков и применение магнитных клеев усложняют технологию и увеличивают стоимость трансформатора.

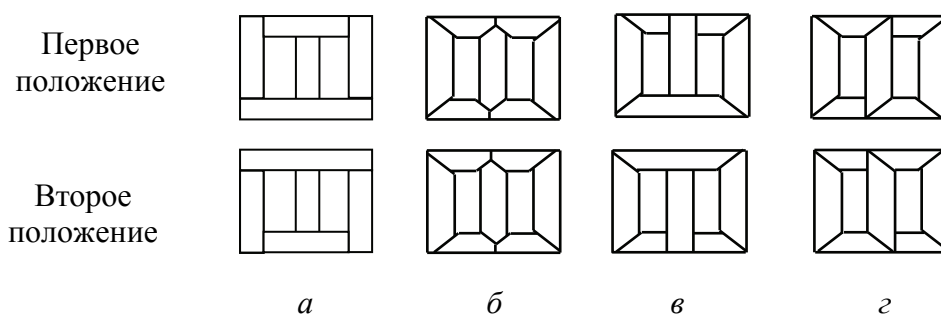
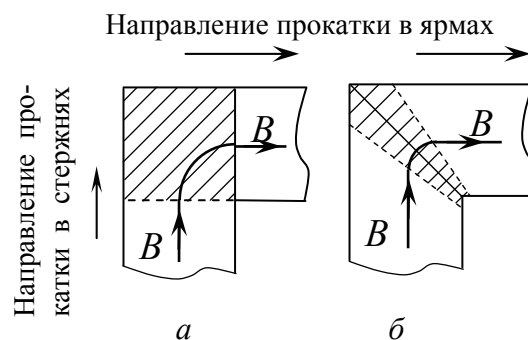


Рис. 2.7. Схема шихтовки магнитопровода

В шихтованных магнитопроводах (рис. 2.7) стержни и ярма собираются вместе как цельная конструкция: листы стержней и ярм отдельных слоев стали собираются в переплет – шихтуют. Благодаря этому у них нет сплошного стыка в плоскости поперечного сечения, что приводит к существенному уменьшению немагнитных зазоров и тока холостого хода (а значит, и потерь холостого хода) по сравнению со стыковыми магнитопроводами. Наиболее простым, технологичным, а значит, и дешевым является прямоугольный стык (рис. 2.7, *а*). При прямом стыке в узлах магнитопровода имеется зона, в которой направления прокатки и магнитного потока не совпадают. При использовании горячекатаной стали, обладающей изотропностью магнитных свойств, это несовпадение прокатки и магнитного потока на потерях стали и тока холостого хода трансформатора практически не сказываются.

В современных силовых трансформаторах применяют более качественную (с повышенными индукциями насыщения и сниженными потерями) холоднокатаную текстурованную сталь, обладающую существенной анизотропией (например, стали марок 3405, 3413 и т. д.). В этом случае несовпадение направлений прокатки и магнитного потока приведут к значительному увеличению потерь и тока холостого хода трансформатора. При отклонении магнитного потока от направления прокатки возникают добавочные потери в стали, увеличивающие полные магнитные потери.

Рис. 2.8. Части магнитопровода с повышенными магнитными потерями при прямых (*а*) и косых (*б*) стыках пластин стали стержней и ярм

Пластины стержней и ярм из холоднокатаной стали вырезают так, чтобы направление потока Φ в магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали. В углах магнитопровода с прямыми стыками пластин ярма и стержня по рис. 2.8, а угол между вектором индукции B и направлением прокатки стали изменяется от 0 до 90 град, что приводит к увеличению магнитных потерь в заштрихованной зоне. При косых стыках несовпадения направлений магнитного потока и прокатки стали меньше, чем при прямых стыках (рис. 2.8, б). Для перекрытия стыков пластины смежных слоев магнитопровода смещают по длине.

Применение косых стыков (рис. 2.7, б) в магнитопроводах уменьшает ток холостого хода на 25–30 %, а потери – на 10–12 %. Однако изготовление магнитопровода с косыми стыками весьма трудоемко, в связи с чем широко применяют конструкцию магнитопровода с комбинированными стыками (рис. 2.7, в, г), которые наряду с некоторым увеличением потерь и тока холостого хода существенно менее трудоемки.

Поскольку обмотки трансформатора удобнее выполнять цилиндрической формы, то и сечение его сердечника стремятся приблизить к форме

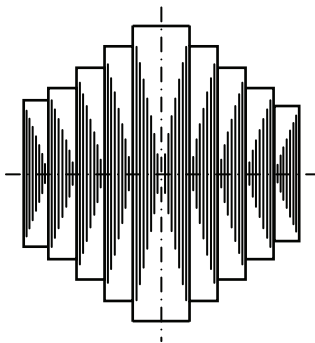


Рис. 2.9. Сечение стержня магнитопровода

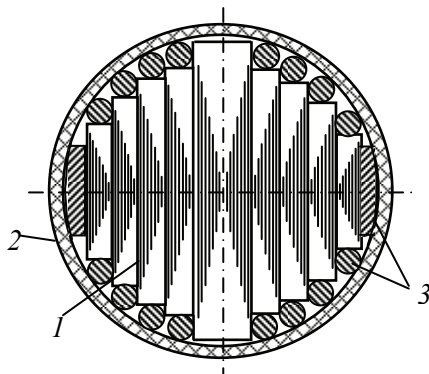


Рис. 2.10. Прессовка стержней деревянными планками и стержнями

круга, выполняя сечение магнитопровода в виде симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность. Диаметр окружности, в которую вписывают ступенчатую фигуру сечения стержня, называют *диаметром d стержня трансформатора*. Каждая ступень сечения стержня образуется пакетом пластин одинакового размера (рис. 2.9). Число ступеней определяется мощностью трансформатора. С увеличением числа ступеней растет коэффициент заполнения площади круга площадью ступенчатой фигуры, приближаясь к единице при круглом сечении стержня. Однако магнитопроводы с круглым сечением широкого применения не нашли из-за их большой трудоемкости. В современных трансформаторах мощностью до 80000 кВА число ступеней в сечении стержня принимают от 5 до 16, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,89 \div 0,92$. Форма поперечного сечения ярма в стержневых магнитопроводах трансформаторов повторяет форму поперечного сечения стержня. С целью увеличения сечения

стержня крайние (один или два) пакеты магнитопровода ярма выполняют равными сечению предпоследнего пакета стержня.

Стержни 1 (рис. 2.10) тщательно прессуют бандажами 2, стягивающими хомутами с установкой между стержнем и обмоткой деревянных распорных планок и стержней 3 в углы пакетов. Прессовку ярм магнитопроводов трансформатора производят ярмовыми балками, которые стягиваются шпильками, вынесенными за пределы ярма.

2.4. Типы и конструкция обмоток

Обмотки трансформатора являются его важнейшим элементом. Срок службы трансформатора, его стоимость во многом зависят от стоимости материала обмоток, а надежность их электрической, механической и термической прочностью. При этом технология изготовления обмоток должна быть по возможности простой и недорогой, а электрические потери в обмотках – быть как можно меньше.

В зависимости от мощности и напряжения трансформатора конструкции обмоток существенно различаются. Определяющими конструктивными исполнения обмотки являются число витков, сечение витка и класс напряжения.

Классом напряжения обмотки трансформатора называют ее длительно допустимое рабочее напряжение. Класс совпадает с номинальным напряжением сети и считается классом напряжения обмотки ВН.

Обмотки выполняют из алюминиевых или медных проводов с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией и с изоляцией кабельной бумагой.

Основным элементом каждой обмотки является виток, состоящий из одного или нескольких параллельных проводников. Совокупность витков, соединенных последовательно, образует катушку. Обмотка может состоять из одной или нескольких катушек. Витки, намотанные на цилиндрической поверхности, образуют слой.

По расположению обмоток трансформаторы подразделяются:

а) на трансформаторы с концентрическими обмотками – обмотки ВН и НН (а также СН) выполняют в виде цилиндров и располагают на стержне концентрически, причем ближе к стержню обычно находится обмотка НН, так как изоляция обмотки от стержня в этом случае облегчается.

б) трансформаторы с чередующимися обмотками — обмотки ВН и НН выполняют в виде невысоких цилиндров и располагают, чередуя, в осевом направлении. Эти обмотки имеют более полную электромагнитную связь, но сложнее в изготовлении и в случае высоких напряжений изоляция обмоток друг от друга усложняется. *Концентрические* обмотки выполняют цилиндрическими одно- и многослойными из провода круглого (мощностью до 630 кВА) и прямоугольного сечений, витки которых размещают вдоль стержня в несколько слоев, с изоляцией каждого слоя проводников кабельной бумагой. Первый слой обмотки, как правило, наматывают на бумажно-бакелитовый цилиндр. Для лучшего охлаждения обмотки между ее слоями выполняют канал, с размером не менее 4 мм. *Цилиндрические* обмотки просты в производстве, однако недостаточно устойчивы к воздействию осевых сил короткого замыкания вследствие малого радиального размера слоя.

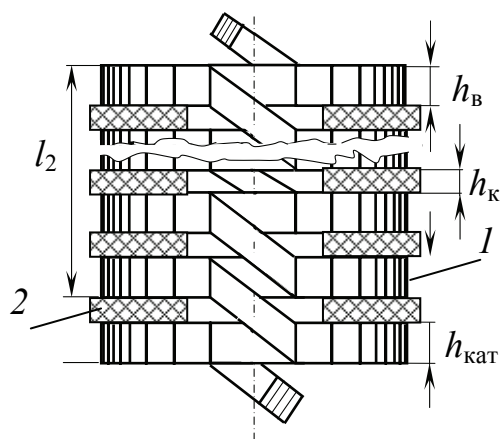


Рис. 2.11. Непрерывная катушечная обмотка

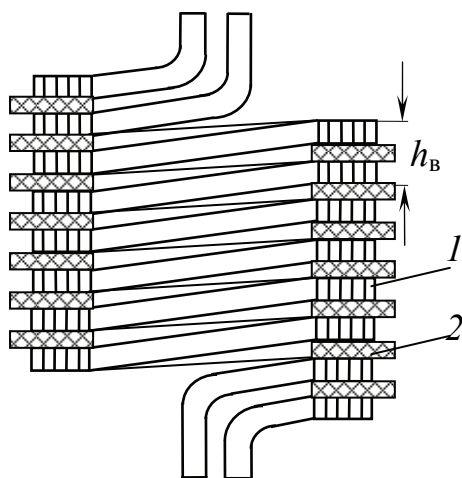


Рис. 2.12. Двухходовая винтовая обмотка

С целью создания лучших условий охлаждения и повышения механической прочности обмотки выполняют из многослойных дисковых катушек (непрерывная катушечная обмотка), намотанных непрерывно (без обрыва провода между отдельными катушками) и расположенных вдоль стержня (рис. 2.11, 1) с радиальными каналами, выполненными через каждую или через две-три катушки. Между катушками устанавливают шайбы или горизонтальные прокладки (рис. 2.11, 2), образующие радиальные охлаждающие каналы. Эти обмотки применяют в качестве обмоток ВН и НН ввиду их большой механической прочности и надежности.

Для низшей стороны трансформаторов при токах выше 300 А используют винтовые обмотки из ряда параллельных проводов (рис. 2.12, 1), с установленными между ходами изолирующими прокладками (рис. 2.12, 2), прилегающих друг к другу в радиальном направлении и образующих вместе с радиальными каналами винтовой ход обмотки (рис. 2.12). Эти обмотки в механическом отношении являются наиболее устойчивыми.

2.5. Схемы и группы соединения трансформаторов

Для преобразования, или трансформации, трехфазного тока можно использовать три однофазных трансформатора (рис. 2.13, *а*), которые включают по отдельности в каждую фазу трехфазной сети. Такое устройство называется трехфазной трансформаторной группой, или групповым трансформатором. На практике чаще применяют трехфазные стержневые трансформаторы с плоским, реже с пространственным магнитопроводом. Плоский трехстержневой трансформатор (рис. 2.13, *б*) компактнее и дешевле.

Для силовых трансформаторов ГОСТ устанавливает стандартные обозначения (маркировку) начал и концов (выводов) обмоток и их ответвлений (отводов) (табл. 2.1).

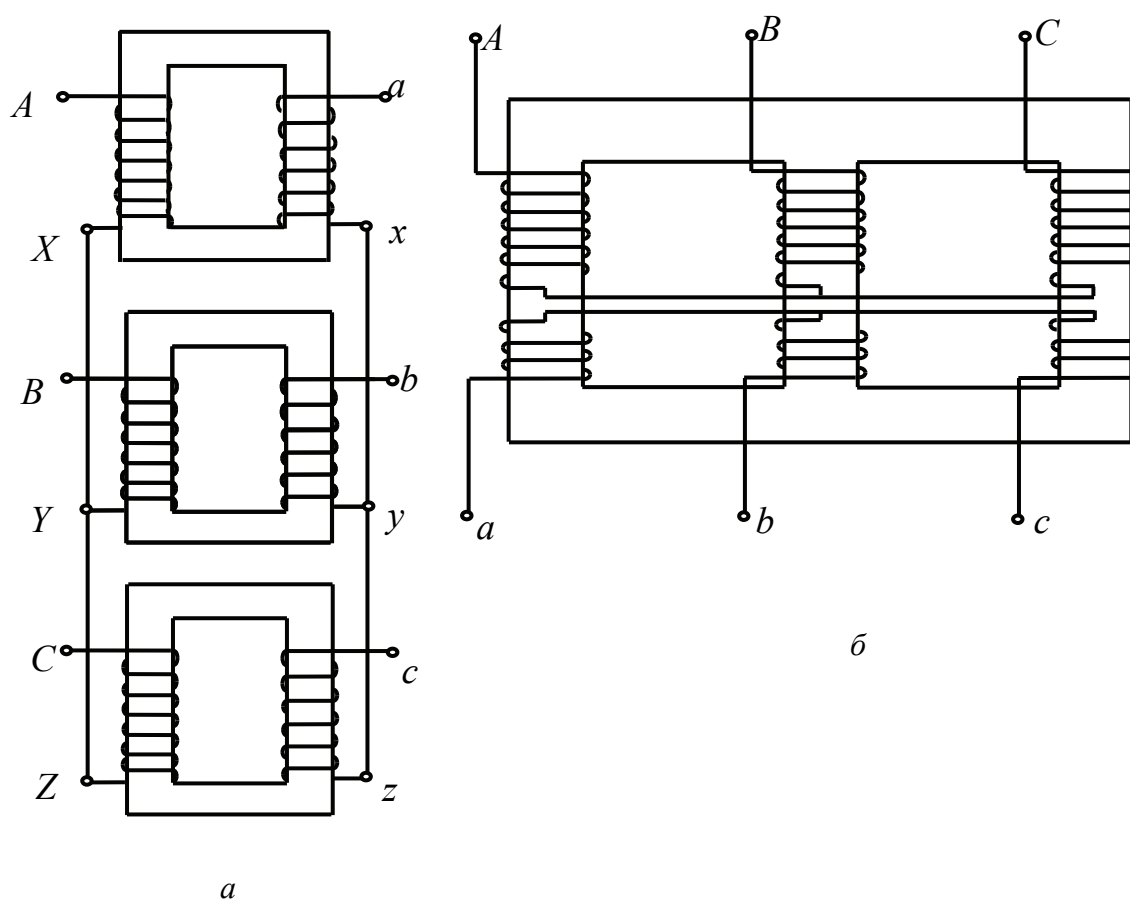


Рис. 2.13. Трансформация трехфазного тока: *а* – трехфазная группа однофазных трансформаторов; *б* – трехфазный трехстержневой трансформатор

Чередование фаз принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН. Если обмотка ВН или НН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что и начало и концы, но с цифровыми индексами 1, 2, 3, 4 и т. д. В трехфазных трансформаторах обмотки чаще всего соединяют по следующим схемам:

- «звезда» обозначается У (старое обозначение Y);
- «треугольник» обозначается Д (старое обозначение Δ).

В некоторых случаях применяют соединение обмоток по схеме «зиг-заг» (обозначение Z). Зажимы нулевой точки при соединении обмоток в «звезду» или «зигзаг» обозначаются для обмотки ВН– O , для обмотки НН– o , для обмотки среднего напряжения (СН) – O_m . При этом к буквенным обозначениям схем соединения обмоток добавляют индекс «н» – Y_n, Z_n . В раннее выпущенной технической литературе можно встретить обозначения $Y_0 Z_0$.

Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора обозначают в виде дроби. В числителе дроби ставят схему соединения обмоток ВН. В знаменателе дроби – схему соединения обмоток НН.

Так, обозначение D/Y_n показывает, что обмотка ВН трехфазного трансформатора соединена в «треугольник», а обмотка НН в «звезду» с выведенной нейтралью. При наличии обмотки среднего напряжения обозначение обмотки СН ставят между обозначениями схем соединений обмоток ВН и НН. Для нашего примера – $D/Y/Y_n$. Здесь Y – схема соединения обмотки СН.

Таблица 2.1

Обозначения начал и концов обмоток трансформатора

Название обмоток	Однофазные трансформаторы	Трехфазные трансформаторы
Обмотки высшего напряжения: – начала; – концы	A X	A, B, C X, Y, Z
Обмотки низшего напряжения: – начала; – концы	a x	a, b, c x, y, z
Обмотки среднего напряжения: – начала; – концы	A_m X_m	A_m, B_m, C_m X_m, Y_m, Z_m

Фазные токи и напряжения трехфазного трансформатора зависят от схемы соединения обмоток. При соединении обмоток «звездой» фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз: $U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$. А фазный ток равен линейному: $I_\phi = I_\Delta$. При соединении обмоток «треугольником» фазное

и линейное напряжения одинаковы: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$. А фазный ток в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного: $I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$. При соединении обмоток в «зигзаг» соотношения

между линейными и фазными токами и напряжениями получаются такими же, как и при соединении обмоток звездой. Но при заданном фазном напряжении увеличивают число витков на 16 % по сравнению с числом витков при «звезде». Положительной особенностью соединения обмоток «зигзагом» является отсутствие искажений фазных напряжений трансформатора при несимметричной нагрузке.

Силовые трехфазные двухобмоточные трансформаторы общего назначения выпускаются со следующими схемами соединения обмоток: Y/Y_n ; Y/D ; Y_n/D ; Z/Y_n и D/D . Применение того или иного соединения зависит от ряда причин, таких как работа при несимметричных нагрузках трансформаторов, борьба с перенапряжениями, влияние высших гармоник, которые будут рассмотрены далее.

Для включения трансформатора на параллельную работу с другими трансформаторами необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках ВН и НН (сдвиг фаз). Для определения сдвига фаз вводится понятие *группы соединения обмоток трансформатора*.

Рассмотрим две обмотки однофазного трансформатора AX и ax , размещенные на одном стержне магнитопровода трансформатора и пронизываемые одним магнитным потоком Φ (рис. 2.14, а).

Если обмотки имеют одинаковое направление намотки и одинаковое обозначение концов (маркировку), то в рассматриваемый момент времени ЭДС E_1 и E_2 , наведенные в обмотках ВН и НН, совпадают по фазе (одинаково направлены от концов к началам). В этом случае однофазный трансформатор имеет соединение обмоток нулевой группы – 1/1–0. Получить в рассматриваемом трансформаторе соединение обмоток шестой группы 1/1–6 возможно при изменении маркировки концов обмотки ax (рис. 2.14, б). Направление наведенной ЭДС E_2 по отношению к выводам обмотки изменится на противоположное. И векторы \dot{E}_1 и \dot{E}_2 будут сдвинуты по фазе на 180° . Аналогичный сдвиг фазы на 180° можно получить, не меняя маркировку концов обмотки ax , но изменив направление ее намотки (рис. 2.14, в).

Таким образом, фазовый сдвиг между фазными ЭДС обмоток ВН и НН зависит от маркировки концов и от направления намотки.

Фазовый сдвиг между линейными ЭДС обмоток ВН и НН зависит еще и от схем соединения.

Группа соединения обозначается целым числом, получающимся после деления на 30° угла сдвига между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН трансформатора.

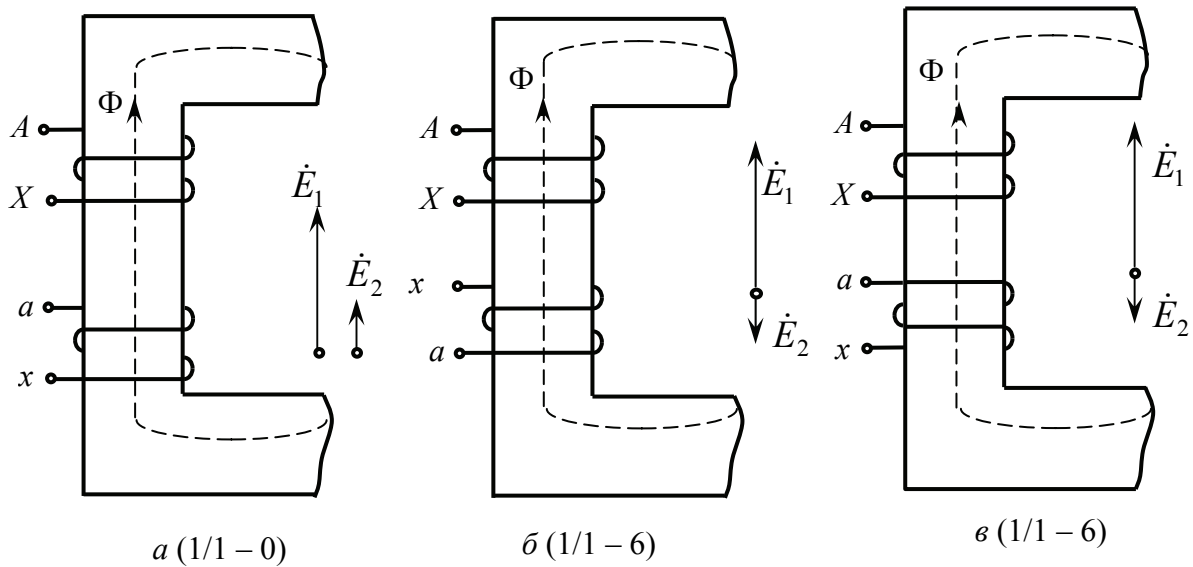


Рис. 2.14. Группы соединения однофазных трансформаторов

В трехфазных трансформаторах со схемами соединений У, Д, Z возможно получить 12 различных групп. Схемы соединений обмоток У/У, Д/Д, Д/З (рис. 2.15) образуют четные группы 2, 4, 6, 8, 10, 0, а схемы соединений обмоток У/Д, Д/У, У/З (рис. 2.16) – нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Для определения группы соединения пользуются *стрелками часового циферблата* (на циферблате 12 цифр, а угол между двумя любыми цифрами кратен 30°). Вектор линейной ЭДС обмотки ВН (большой) – это большая минутная стрелка. Вектор линейной ЭДС НН (меньший) – это маленькая часовая стрелка. Ниже приведен алгоритм определения группы:

1. Строят векторную диаграмму линейных ЭДС обмотки ВН.
2. Строят векторную диаграмму линейных ЭДС обмотки НН.
3. Вычерчивают из одной точки линейные векторы ЭДС обмоток ВН и НН на одноименных выводах (например, \dot{E}_{AB} и \dot{E}_{ab}).
4. Далее используют правило часового циферблата. Возможны два варианта:

1-й вариант. Производят отсчет угла от минутной стрелки (\dot{E}_{AB}) к часовой (\dot{E}_{ab}) по направлению вращения стрелок. Полученный угол делят на 30° . Результат – номер искомой группы.

2-й вариант. Одновременно поворачивают минутную и часовую стрелки так, чтобы минутная стрелка совпала с цифрой 12 (0), тогда часовая стрелка покажет тот час, которому соответствует данная группа.

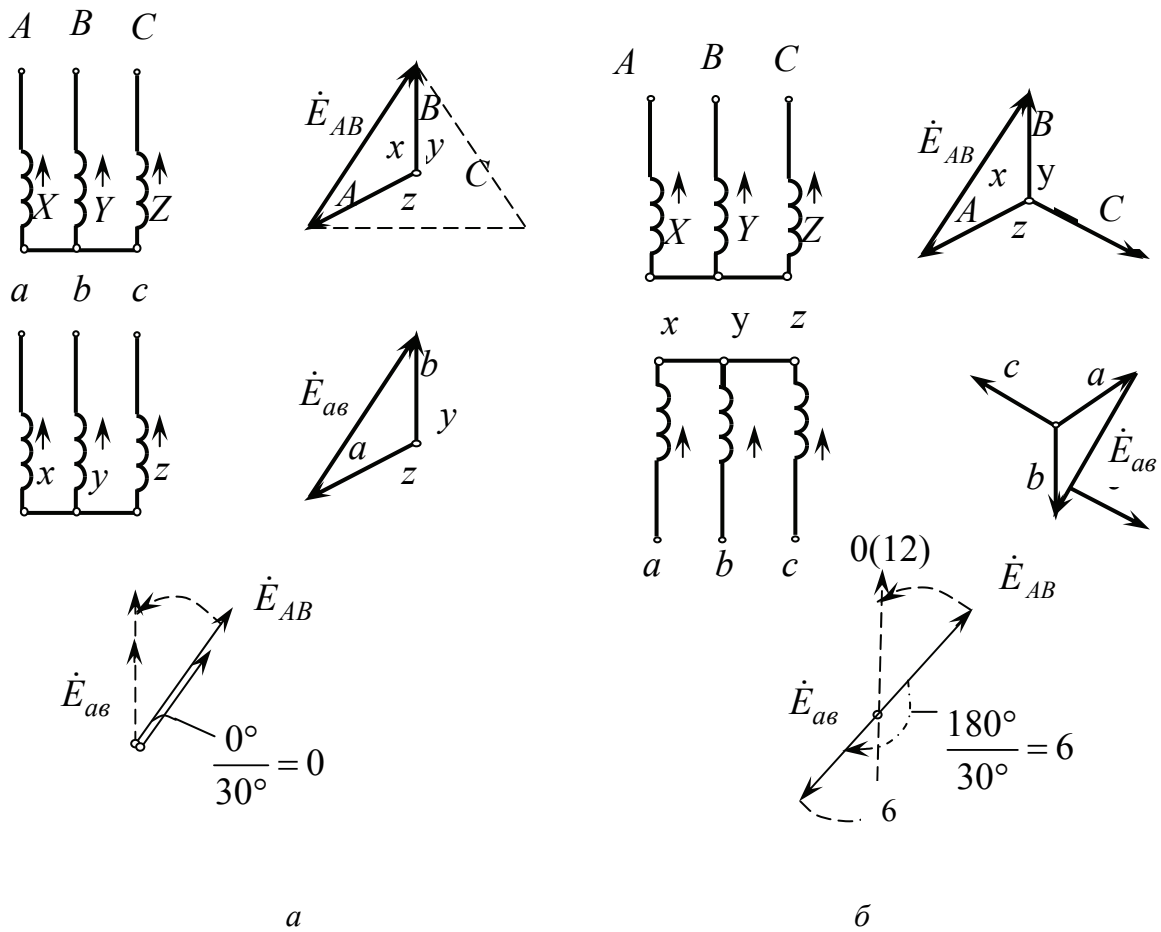


Рис. 2.15. Четные группы соединений обмоток трехфазного трансформатора
а – Y/Y-0; б – Y/Y-6

Для примера на рис. 2.15 показаны схемы соединения обмоток Y/Y, векторные диаграммы и определение четных 0 и 6 групп.

На рис. 2.16 – схемы соединения обмоток Y/Д, диаграммы для определения нечетных 11 и 5 групп.

При построении векторных диаграмм следует руководствоваться следующим:

- направление намотки всех обмоток одинаковое;
- векторы ЭДС обмоток ВН и НН на одном стержне совпадают по фазе, если в рассматриваемый момент времени ЭДС этих обмоток направлены к одноименным выводам (от конца к началу) (см. рис. 2.14, а).
- векторы ЭДС обмоток ВН и НН на одном стержне сдвинуты по фазе на 180° , если в рассматриваемый момент времени ЭДС этих обмоток направлены к разноименным выводам (см. рис. 2.14, б).

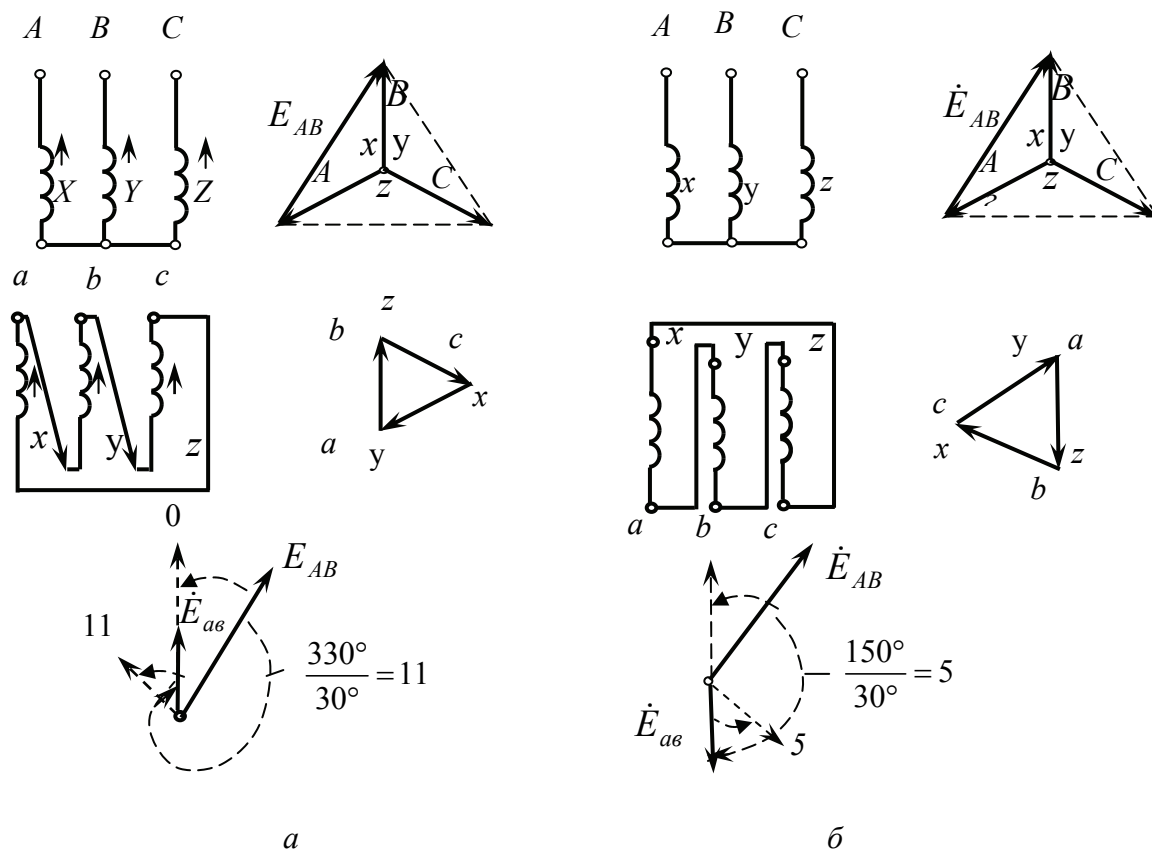


Рис. 2.16. Нечетные группы соединений обмоток трехфазного трансформатора:
 а – Y/Д – 11; б – Y/Д – 5

Из всех возможных групп соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов в России стандартизированы, согласно ГОСТ 12965–85, только две группы 0 и 11.

В однофазных трансформаторах возможны только две группы соединения: 0 и 6. Стандартизирована только 0 группа.

3. НАМАГНИЧИВАНИЕ МАГНИТОПРОВОДОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

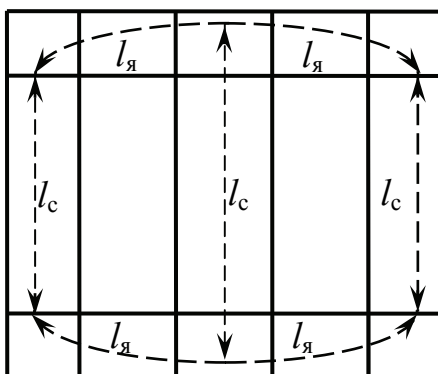
3.1. Расчет магнитной цепи, намагничивающий ток и ток холостого хода

Каждая линия основного магнитного потока Φ проходит через ярма и стержни трансформатора. Между ярмами и стержнями есть немагнитные воздушные промежутки δ , называемыми стыками. Таким образом, магнитная цепь трансформатора состоит из участков, отличающихся друг от друга своими геометрическими размерами и физическими свойствами. Практически магнитную цепь трансформатора делят на три участка с одинаковыми площадями сечений, вдоль которых напряженность магнитного поля одинакова (рис. 3.1, а):

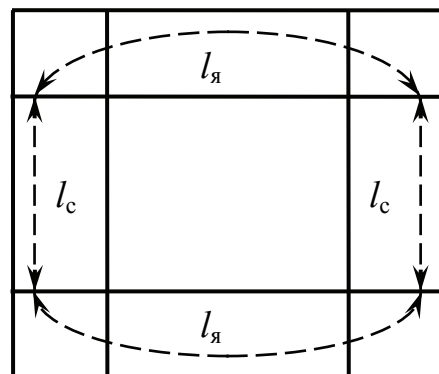
1. *Стержень трансформатора.* Длина магнитной линии l_c , индукция магнитного поля данного участка B_c , напряженность магнитного поля H_c .

2. *Ярмо трансформатора.* Длина магнитной линии $l_{я}$, индукция магнитного поля на этом участке $B_{я}$, напряженность магнитного поля $H_{я}$.

3. *Стыки между пластинами ярма и стержня.* Длина магнитной линии δ , индукция магнитного поля в стыке B_{δ} , напряженность магнитного поля $H_{я}$.



а



б

Рис. 3.1. Магнитная цепь трехфазного (а) и однофазного (б) трансформаторов

Для определения тока холостого тока и установления зависимости между намагничивающим током и основным магнитным потоком проводят расчет магнитной цепи трансформатора на основе закона полного тока:

$$\oint Hdl = \sum i. \quad (3.1)$$

На практике решение кругового интеграла достаточно трудная задача, поэтому интеграл $\oint Hdl$ заменяют суммой магнитодвижущих сил соответствующих участков, а сумму токов $\sum i$ на МДС первичной обмотки в режиме холостого хода. Тогда для однофазного трансформатора вместо равенства (3.1) с учетом прохождения магнитной линии потока Φ дважды по участкам стержней и ярм получим:

$$2H_c \cdot l_c + 2H_y \cdot l_y + H_\delta \cdot n_\delta \cdot \delta = \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot I_{0p}, \quad (3.2)$$

где H_c , H_y , H_δ – напряженности магнитного поля, соответственно, в стержне, ярме и стыке; l_c , l_y – средняя длина соответствующего участка стержня и ярма; δ – немагнитный зазор (стык) между пластинами ярма и стержня (для шихтованного магнитопровода $\delta = 0,035 - 0,05$ мм); n_δ – число стыков (для однофазных трансформаторов $n_\delta = 4$, для трехфазных $n_\delta = 7$); I_{0p} – действующее значение реактивной составляющей тока холостого хода. МДС обмотки определяется по амплитудному значению реактивного тока, поэтому правая часть выражения (3.2) увеличена в $\sqrt{2}$ раз.

Слагаемые в выражении (3.2) представляют сумму МДС отдельных участков магнитной цепи.

МДС – это интегральная характеристика магнитного поля, служащая мерой энергии, затраченной на установление этого поля (т. е. причиной образования этого поля). МДС также называют магнитным напряжением или потенциалом магнитного поля.

Сумма выражения (3.2) – МДС первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода. Запишем выражение (3.2) через соответствующие МДС участков магнитной цепи:

$$2F_c + 2 \cdot F_y + n_\delta \cdot F_\delta = F_0, \quad (3.3)$$

здесь $F_c = H_c \cdot l_c$ – МДС стержня; $F_y = H_y \cdot l_y$ – МДС ярма; $F_\delta = H_\delta \cdot l_\delta$ – МДС стыка (зазора); $F_0 = \sqrt{2} I_{0p} \cdot w_1$ – МДС первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Напряженности поля H_c и H_y определяются по кривой намагничивания для стали, из которой изготовлен магнитопровод $B_{c(y)} = f(H_{c(y)})$. Значения индукции в стали стержня или ярма определяют, с учетом (3.14) по формуле

$$B_{c(y)} = \frac{\Phi}{\Pi_{c(y)}} = \frac{U_{1\phi}}{4.44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Pi_{c(y)}}, \quad (3.4)$$

где $\Pi_{c(y)}$ – соответственно, сечение стержня (ярма).

Напряженность поля в немагнитном зазоре определяют, исходя из индукции зазора B_δ и магнитной проницаемости зазора $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}. \quad (3.5)$$

В формуле (3.5) индукция зазора B_δ равна индукции стержня $B_\delta = B_c$.

Намагничивающим током трансформатора называют реактивную составляющую тока холостого хода I_{0p} , потребляемую из сети для создания магнитного поля.

В режиме холостого хода первичная обмотка трансформатора потребляет из сети реактивную мощность для образования МДС, необходимой для создания в магнитопроводе основного магнитного потока Φ . Решая (3.2) относительно I_{0p} , получим действующее значение намагничивающего тока для однофазного трансформатора:

$$I_{0p} = \frac{2 \cdot H_c \cdot l_c + 2 \cdot H_y \cdot l_y + n_\delta \cdot H_\delta \cdot l_\delta}{\sqrt{2} \cdot w_1}. \quad (3.6)$$

В трехфазном трансформаторе (рис. 3.1, а) определяют намагничивающий ток отдельно для фаз крайних стержней $I_{0p.кр}$ (с учетом того, что $n_\delta = 3$) и намагничивающий ток фазы среднего стержня $I_{0p.кр}$ (при $n_\delta = 1$):

$$I_{0p.кр} = \frac{H_c \cdot l_c + 2H_y \cdot l_y + n_\delta \cdot H_\delta \cdot l_\delta}{\sqrt{2} \cdot w_1}. \quad (3.7)$$

$$I_{0p.cр} = \frac{H_c \cdot l_c + n_\delta \cdot H_\delta \cdot l_\delta}{\sqrt{2} \cdot w_1} \quad (3.8)$$

Расчетное значение намагничивающего тока принимают равным среднему арифметическому:

$$I_{0p} = \frac{2I_{0p.кр} + I_{0p.cр}}{3} \quad (3.9)$$

Намагничивающий ток I_{0p} можно определить и через реактивную (намагничивающую) мощность, потребляемую трансформатором в режиме холостого хода (мощность, необходимая для намагничивания магнитопровода):

$$Q_0 = m \cdot S_0 \cdot \sin \varphi_0 = m \cdot U_{1ф} \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 = m \cdot U_{1ф} \cdot I_{0p}, \quad (3.10)$$

где m – число фаз; $U_{1ф}$ – фазное напряжение первичной обмотки, S_0 – полная мощность, потребляемая фазой трансформатора на холостом ходу; I_0 – полный ток холостого хода одной фазы (стержня); φ_0 – угол между током холостого хода и фазным напряжением первичной обмотки. Намагничивающую мощность рассчитывают по формуле

$$Q_0 = \sum q_c \cdot G_c + \sum q_\gamma \cdot G_\gamma + \sum q_\delta \cdot n_\delta \cdot \Pi_\delta, \quad (3.11)$$

где q_c , q_γ , q_δ – удельные намагничивающие мощности, соответственно, стержня, ярма, стыка, определяемые по таблицам в зависимости от индукции; G_c , G_γ – масса стали одного стержня и ярма; Π_δ – площадь стыка.

Активная составляющая тока холостого хода I_{0a} потребляется трансформатором для покрытия активных потерь мощности p_0 (нагрева) магнитопровода и первичной обмотки.

Потери энергии в магнитопроводе – магнитные потери – обусловлены явлением гистерезиса и наличием вихревых токов при переменном магнитном потоке. Магнитные потери приблизительно пропорциональны квадрату индукции.

Потери энергии в первичной обмотке – электрические потери, обусловленные активным сопротивлением этой обмотки. Электрические потери пропорциональны квадрату тока.

Следует отметить, что электрические потери мощности на холостом ходу трансформатора значительно меньше магнитных, так как сопротив-

ление медного или алюминиевого обмоточного провода, из которого выполнены обмотки, незначительно. Поэтому в дальнейшем полагаем, что активные потери мощности трансформатора в режиме холостого хода – это преимущественно магнитные потери.

Ток I_{0a} определяется как

$$I_{0a} = \frac{P_0}{m \cdot U_{1\phi}}. \quad (3.12)$$

Потребляемую активную мощность трансформатора в режиме холостого хода (магнитные потери) определяют по приближенной формуле Штейнметца:

$$P_1 = P_0 = P_{\text{мг}} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot \sum_1^i (B_i \cdot G_i), \quad (3.13)$$

здесь $p_{\text{мг}}$ – магнитные потери; $p_{1,0/50}$ – удельные потери в стали на единицу массы при частоте 50 Гц и индукции 1 Тл; f – частота перемагничивания; B_i – индукция в соответствующей части магнитопровода; G_i – масса соответствующего участка магнитопровода.

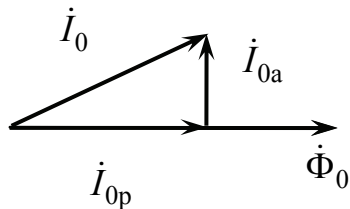


Рис. 2.2. Ток холостого хода трансформатора и его составляющие

Полный ток холостого хода трансформатора имеет две составляющие (рис. 3.2): намагничивающую (реактивную) с действующим значением \dot{I}_{0p} , создающую основной магнитный поток Φ совпадающую с ним по фазе, и активную \dot{I}_{0a} , идущую на покрытие магнитных и электрических потерь и практически совпадающую по фазе с первичным напряжением:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0p} \quad (3.14)$$

или

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (3.15)$$

В трансформаторах общепромышленного назначения активная составляющая \dot{I}_{0a} не превышает 10 % от полного тока I_0 , поэтому она

оказывает весьма малое влияние на значение тока холостого хода. Форма кривой тока холостого хода определяется в основном кривой намагничивающего тока.

В силовых трансформаторах ток холостого хода не превышает 0,3–3 % от номинального значения тока. При увеличении мощности значение тока холостого хода относительно номинального уменьшается.

3.2. Форма намагничивающего тока и магнитного потока однофазного трансформатора

Рассмотрим процесс намагничивания однофазного трансформатора в режиме холостого хода. Как показано в п. 3.1, намагничивающим током в этом режиме является потребляемый первичной обмоткой ток холостого хода, если пренебречь магнитными потерями в магнитопроводе и электрическими потерями в обмотке. То есть потребляемый трансформатором на холостом ходу ток – чисто реактивный. Величина этого тока в силу высокой магнитной проницаемости стали магнитопровода невелика, и не превышает 3 % номинального тока. При этом падением напряжения на сопротивлении первичной обмотки $r_1 \cdot i_1$ в формуле (2.7) можно пренебречь.

Амплитудное значение потока в магнитопроводе идеального трансформатора

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1}. \quad (3.16)$$

Амплитудное значение намагничивающего тока, возбуждающего магнитный поток Φ в идеальном трансформаторе, определим по формуле (2.3):

$$I_{0pm} = \frac{\Phi_m}{w_1} \cdot R_\mu. \quad (3.17)$$

С учетом (3.16)

$$I_{0pm} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1^2} \cdot R_\mu. \quad (3.18)$$

Следовательно, намагничивающий ток трансформатора при заданной частоте сети f_1 и числе витков первичной обмотки w_1 определяется как напряжением сети, так и значением магнитного сопротивления магнитопровода R_μ . Это сопротивление в основном определяется степенью насыщения магнитопровода. Если магнитопровод трансформатора не насыщен, то намагничивающий ток I_{0p} – синусоидальный, если магнитопровод насыщен, то ток I_{0p} – несинусоидальный. Но в любом случае намагничивающий ток совпадает по фазе с магнитным потоком Φ . В трансформаторе с насыщенным магнитопроводом ток I_{0p} определяется по кривой намагничивания $\Phi = f(i_{0p})$, представленной на рис. 3.3 в первом квадранте. Кривую намагничивания можно получить расчетным или опытным путем. Расчетным путем задача решается определением МДС трансформатора для различных значений магнитного потока (расчетом магнитной цепи трансформатора).

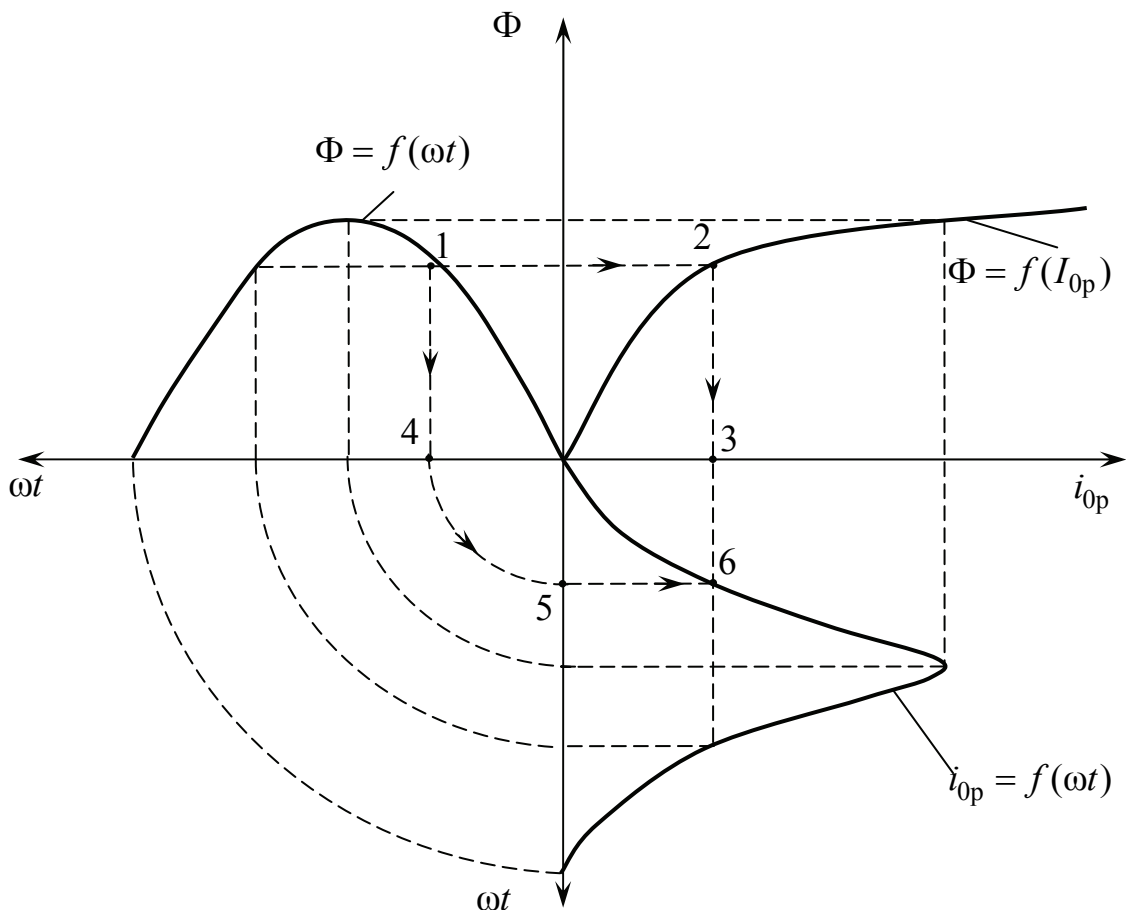


Рис. 3.3. Построение кривой намагнивающего тока трансформатора

Опытным путем кривую намагничивания снимают, питая первичную обмотку трансформатора постоянным током. В этом случае зависимость между мгновенными значениями магнитного потока Φ и намагничивающего тока i_{0p} получается без учета магнитных потерь (перемагничивание стали и вихревой ток отсутствуют).

Во втором квадранте рис. 3.3 представлена синусоидальная зависимость магнитного потока от времени $\Phi = f(\omega t)$. В четвертом квадранте этого рисунка изображена кривая, которую можно получить, если значения потока Φ кривой $\Phi = f(\omega t)$ для отдельных моментов времени 1, 2, 3 и т. д. перенести на кривую $\Phi = f(i_{0p})$, а получаемые при этом в первом квадранте значения i_{0p} перенести в четвертый квадрант и отложить для этих же моментов времени. Отрицательная волна кривой $i_{0p} = f(\omega t)$ будет иметь такую же форму, что и положительная. Видно, что из-за насыщения магнитопровода синусоидальный поток Φ возбуждается несинусоидальным намагничивающим током i_{0p} . Несинусоидальная кривая $i_{0p} = f(\omega t)$, симметричная относительно начала координат, согласно теореме Фурье, для симметрии 3 б рода содержит только нечетные высшие гармоники $v = 1, 3, 5, 7, \dots$

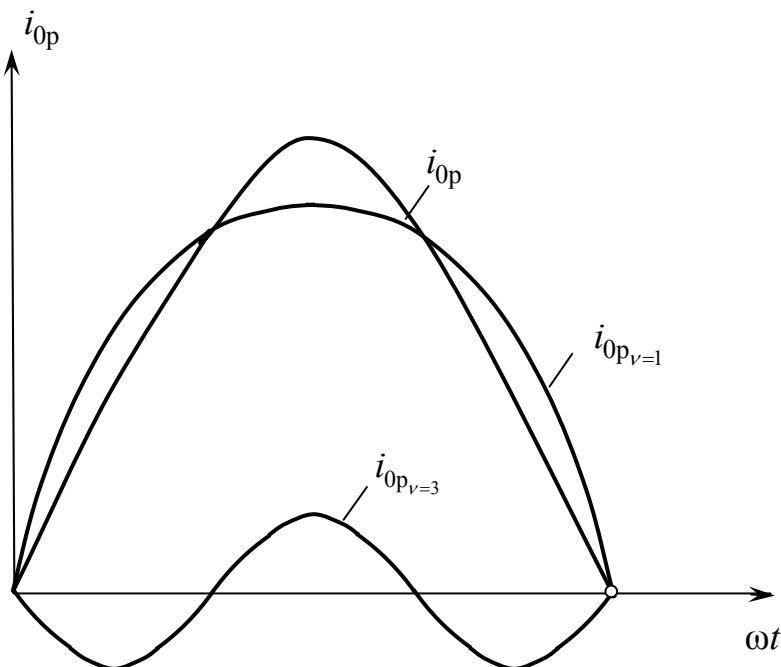


Рис. 3.4. Гармоники намагничивающего тока однофазного трансформатора

Гармоники несинусоидального намагничивающего тока однофазного трансформатора представлены на рис. 3.4. Наиболее сильной после основной первой гармоники ($\nu = 1$) является *третья* ($\nu = 3$) и пятая ($\nu = 5$) гармоники. *Сильнее всего* сказывается влияние *третьей гармоники*. В отдельных насыщенных конструкциях магнитопроводов величина третьей гармоники может достигать 50–60 % от амплитуды первой гармоники, величина пятой гармоники составляет около 15 % от первой.

Таким образом, *в однофазном трансформаторе магнитный поток синусоидален, а следовательно, синусоидальны и ЭДС, наводимые этим потоком в первичной и вторичной обмотках, если намагничивающий ток несинусоидальный (имеет высшие нечетные гармоники).*

3.3. Особенности намагничивания трехфазных трансформаторов

Рассмотрим особенности намагничивания магнитопроводов трехфазных трансформаторов. Как было выяснено в п. 3.2 при синусоидальном напряжении сети магнитный поток Φ однофазного трансформатора и ЭДС также синусоидальны, а намагничивающий ток i_{0p} , вследствие нелинейности кривой намагничивания (насыщение магнитопровода), несинусоидален. Искажение формы кривой тока i_{0p} определяется наличием в ней высших гармоник. Сильнее всего сказывается влияние первой (основной) и третьей гармоник. *(В дальнейшем гармониками выше третьей будем пренебрегать ввиду их относительно небольших значений).*

В трехфазных трансформаторах первые гармоники намагничивающего тока сдвинуты по фазе на 120° и изменяются во времени с частотой сети $f_1 = 50$ Гц. Третьи гармоники намагничивающего тока сдвига по фазе не имеют ($3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$) и изменяются во времени с тройной частотой сети $3 f_1 = 150$ Гц. Это приводит к тому, что третьи гармоники намагничивающего тока могут протекать не при всех схемах соединения обмоток трехфазного трансформатора. Следовательно, намагничивающий ток i_{0p} при некоторых схемах соединения обмоток будет *синусоидальным*, а магнитный поток и ЭДС в обмотках трансформатора будут *несинусоидальным*.

Намагничивающий ток третьей гармоники может протекать в каждой фазе при соединении обмоток по схемам «треугольник» и «звезда» с выведенной нейтралью. При соединении обмоток по схеме «звезда» намагничивающий ток третьей гармоники в каждой фазе трансформатора протекать не может, т. к. нет выхода токов каждой фазы из нулевой точки (нет проводящего контура).

Рассмотрим различные схемы соединения обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Соединение обмоток Д/У. Пусть на холостом ходу к трехфазной сети подключена обмотка, соединенная «треугольником» (рис. 3.5, *а*). Треугольник является проводящим замкнутым контуром для токов третьей гармоники. В намагничивающем токе каждой фазы есть третья гармоника $i_{0p_v=3}$. Токи третьей гармоники будут циркулировать внутри замкнутого треугольника. Так как каждая фаза этой обмотки подключена к синусоидальному напряжению сети, поток каждой фазы будет синусоидальным, а намагничивающий ток каждой фазы i_{0p} – несинусоидальным.

Пусть теперь на холостом ходу к трехфазной сети подключена обмотка, соединенная «звездой» (рис. 3.5, *б*). В соединении «звезда» токи третьей гармоники протекать не могут физически. Поэтому намагничивающий ток в этом случае является синусоидальным. Кривая магнитного потока Φ_y , возбуждаемого синусоидальным намагничивающим током, вследствие насыщения будет несинусоидальной, уплощенной формы (рис. 3.6, *а*). Кривая потока наряду с основной гармоникой Φ_{1y} содержит третью гармонику Φ_{3y} . Третьи гармоники потока Φ_{3y} всех трех фаз совпадают по фазе и индуцируют во вторичной обмотке, соединенной «треугольником» три равные по значению и совпадающие по фазе ЭДС $E_{3д}$ (рис. 3.6, *б*).

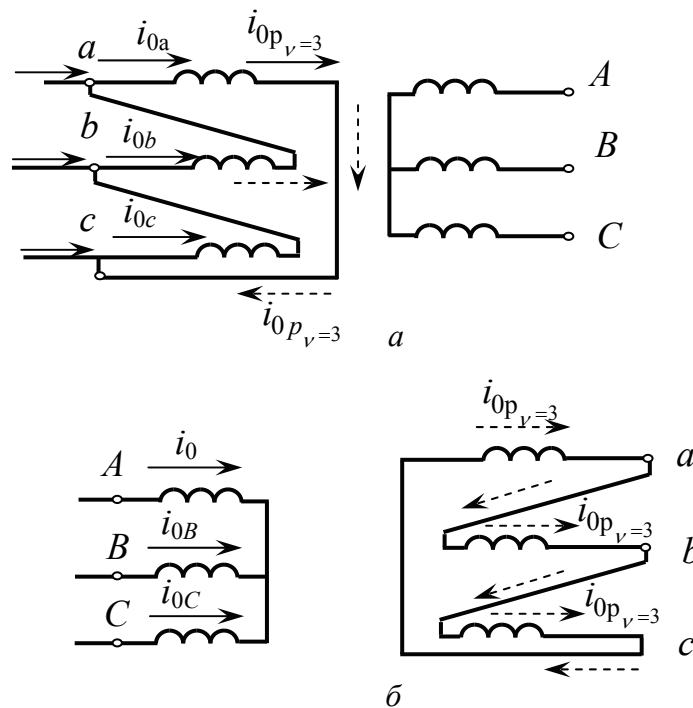


Рис.3.5. Питание трансформатора с соединением обмоток У/Д на холостом ходу со стороны: *а* – У; *б* – Д

Под действием этих ЭДС в каждой фазе замкнутого «треугольника» начинают протекать токи третьей гармоники $I_{3Д}$ повышенной частоты $3f_1 = 150$ Гц. За счет преобладания в обмотках силовых трансформаторов индуктивного сопротивления эти токи почти чисто индуктивные. Токи $I_{3Д}$ возбуждают в магнитопроводе трансформатора магнитные потоки третьей гармоники $\Phi_{3Д}$, которые почти полностью компенсируют потоки $\Phi_{3У}$. Поэтому результирующие потоки фаз будут практически синусоидальными.

Из изложенного следует, что в случае соединения одной из обмоток трансформатора «треугольником» магнитные потоки, ЭДС и напряжения фаз остаются синусоидальными. Это существенное преимущество трехфазных трансформаторов, у которых одна из обмоток соединена «треугольником». При соединении одной из обмоток трансформатора в треугольник искажение кривой фазных ЭДС и напряжений не зависит от типа магнитопровода.

Соединение обмоток У/У. В трансформаторах с таким соединением обмоток третьей гармоники в намагничивающих токах первичной и вторичной обмоток существовать не могут. Поэтому магнитные потоки фаз наряду с основной гармоникой Φ_1 содержат еще и третьей гармоники потока Φ_3 . Из-за наличия третьей гармоники магнитного потока кривая потока становится уплощенной формы (рис. 3.6, а). Таким образом, характерной особенностью намагничивания трехфазного трансформатора с соединением обмоток по схеме У/У является наличие третьих гармоник магнитного потока Φ_3 . Третьи гармоники потока Φ_3 в каждой фазе трансформатора наводят третьи гармоники ЭДС E_3 . Кривые фазных ЭДС и напряжений становятся несинусоидальными. Величина этих гармоник, а следовательно, и синусоидальность фазного напряжения зависят от типа магнитопровода трансформатора.

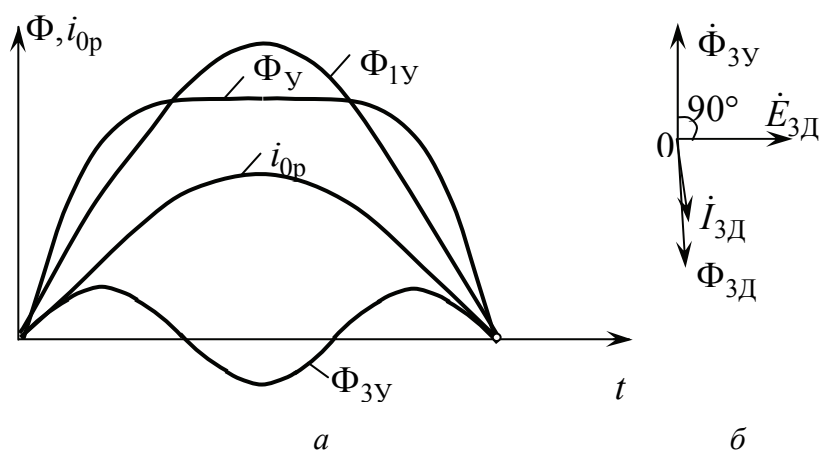


Рис. 3.6. Форма кривой потока при синусоидальном намагничивающем токе (а) и векторная диаграмма потоков и токов третьей гармоники (б)

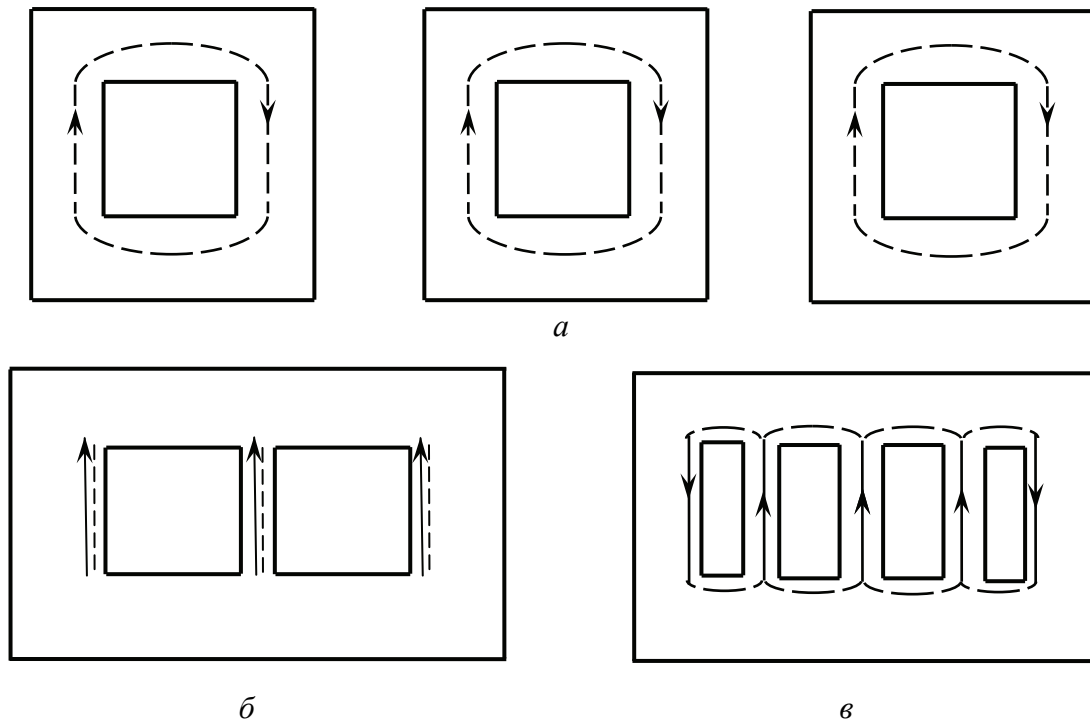


Рис. 3.7. Третьи гармоники потока в трехфазных трансформаторах:
 а – групповой; б – трехстержневой; в – бронестержневой

В трехфазной группе однофазных трансформаторов (рис. 3.7, а), бронестержневом (рис. 3.7, в) и броневом (рис. 3.5, б) трансформаторах поток Φ_3 замыкается по магнитопроводу, как и основной магнитный поток – поток первой гармоники Φ_1 – по магнитопроводу. Так как сопротивление магнитопровода мало, то величина потока Φ_1 может достигать 10–20 % от потока Φ_1 , а наводимые им в обмотках амплитудные ЭДС третьей гармоники составят 30–60 % от ЭДС первой гармоники. Кривые ЭДС первичной и вторичной обмоток искажаются, а действующие значения фазных ЭДС вырастают на 5–17 %, вызывая возрастание электрического поля в изоляции (преждевременное старение изоляции). Однако линейные ЭДС и напряжения останутся синусоидальными, так как в разности ЭДС двух фаз E_3 исчезает, как не имеющие сдвига по фазе.

В трехстержневом трансформаторе потоки Φ_3 беспрепятственно замкнуться по магнитопроводу не могут, так как в каждый момент времени во всех стержнях направлены одинаково (рис. 3.7, б). Поэтому потоки Φ_3 вытесняются на пути магнитных потоков рассеяния и замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло, воздух, крепежные детали и стенки бака трансформатора. Магнитное сопротивление этих участков достаточно велико, и потоки Φ_3 , по сравнению с такими потоками

в трансформаторах других типов, значительно меньше. Соответственно, в трехстержневом трансформаторе значительно меньше искажаются кривые фазных ЭДС и напряжений. Поток Φ_3 , пульсируя с тройной частотой сети по стальным конструктивным частям трансформатора, индуцирует в них значительные вихревые токи. Это ведёт к увеличению дополнительных потерь мощности и увеличению нагрева бака и крепёжных деталей трансформатора.

Соединение обмоток Y/Y_0 обеспечивает протекание намагничивающих токов третьей гармоники I_{03} в обмотке со схемой соединения Y_0 . Поэтому поток Φ и фазные напряжения трансформатора U_1 и U_2 будут синусоидальными.

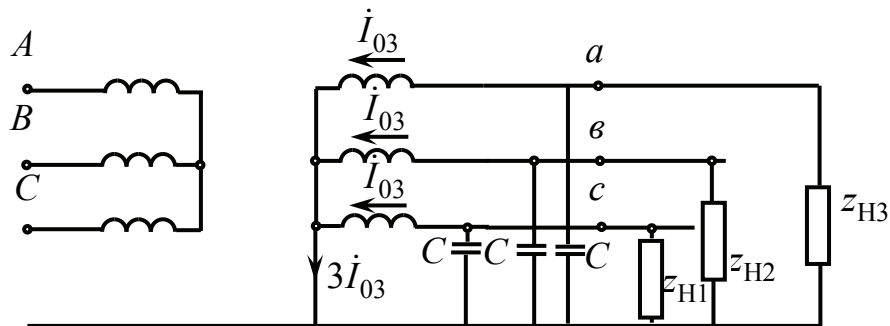


Рис. 3.8. Третья гармоника намагничивающего тока в схеме Y/Y_0

Токи I_{03} протекают по нулевому проводу (при заземленной нейтрали) и оказывают вредное влияние на металлические подземные сооружения, вызывая их усиленную коррозию, так как частота этих токов равна тройной частоте сети, т. е. 150 Гц.

Токи повышенной частоты I_{03} замыкаются через емкости находящиеся между обмотками трансформатора и землей (рис. 3.8) и создают помехи линиям связи. Емкости устанавливают для борьбы с перенапряжениями (см. далее п. 8.5), и при частоте 50 Гц данные емкости не влияют на работу трансформатора, поэтому ранее не рассматривались.

С помощью рассмотренного в главе метода расчета магнитной цепи, определен намагничивающий ток и ток холостого хода трансформатора. Показан вывод формул ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора. Анализ формы намагничивающего тока и магнитного потока показал, что вследствие насыщения магнитной цепи синусоидальность магнитного потока обеспечивается несинусоидальной формой намагничивающего тока. В трехфазном трансформаторе несинусоидальная форма намагничивающего тока возможна не при всех схемах соединения его обмоток.

4. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

4.1. Уравнения напряжения и векторные диаграммы трансформатора

Как было выяснено выше (см. пп. 2.1, 3.2), основной магнитный поток Φ наводит в обмотках трансформатора ЭДС $E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m$ и $E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m$. В реальном трансформаторе помимо основного потока существуют магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (см. рис. 2.2), сцепленные только с одной из обмоток. В преобразовании энергии эти потоки не участвуют, но наводят в каждой из обмоток ЭДС рассеяния $E_{\sigma 2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_{\sigma 2m}$, уменьшающие выходное напряжение. Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам. Так как векторы ЭДС $\dot{E}_{\sigma 1}$, $\dot{E}_{\sigma 2}$ отстают от соответствующих векторов токов и векторов МДС на 90° , то

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jx_1 I_1; \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jx_2 I_2, \quad (4.1)$$

где x_1 и x_2 – коэффициенты пропорциональности между соответствующими токами (МДС) и ЭДС рассеяния.

Коэффициенты x_1 и x_2 называют *индуктивными сопротивлениями рассеяния обмоток трансформатора*, так как они обусловлены потоками рассеяния. Полученное выражение (4.1) наглядно показывает роль магнитных потоков рассеяния в трансформаторе: *они создают индуктивные падения напряжения в обмотках, не участвуя в преобразовании энергии.*

Рассмотрим изменение тока первичной обмотки при переходе от режима холостого хода трансформатора к режиму нагрузки. Для этого воспользуемся важнейшим свойством трансформатора: *магнитный поток трансформатора при нагрузке остается неизменным.* Из этого свойства следует закон равновесия МДС в трансформаторе:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2, \quad (4.2)$$

где \dot{F}_1 и \dot{F}_2 – МДС, создаваемые токами первичной и вторичной обмотки при нагрузке; \dot{F}_0 – МДС, создаваемая током первичной обмотки в режиме холостого хода.

При переменном токе оперируют с амплитудами МДС, при этом из (4.2) получим:

$$\sqrt{2}\dot{I}_0 w_0 = \sqrt{2}\dot{I}_1 w_1 + \sqrt{2}\dot{I}_2 w_2 \quad (4.3)$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{w_2}{w_1}\right)\dot{I}_2. \quad (4.4)$$

Второе слагаемое в формуле (4.4) называют нагрузочной составляющей тока первичной обмотки или компенсационным током $\dot{I}_K = -\frac{w_2}{w_1}\dot{I}_2$. Ток I_K показывает, насколько изменяется ток в первичной обмотке трансформатора при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки. С учетом нагрузочной составляющей выражение (4.4) принимает вид

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_K. \quad (4.5)$$

Мощность нагрузочной составляющей первичного тока равна мощности, отдаваемой трансформатором нагрузке:

$$I_K \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_2 = I_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot E_2 \cdot \frac{w_1}{w_2} = I_2 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (4.6)$$

Таким образом, ток I_K не только создает МДС, равную по значению и противоположную по фазе МДС вторичной обмотки, т. е. не только компенсирует ее, но и обеспечивает поступление в трансформатор из сети мощности, отдаваемой приемнику электрической энергии, который подключен к вторичной обмотке.

Обойдя по второму закону Кирхгофа контуры первичной и вторичной обмоток трансформатора с учетом (4.5) получим систему комплексных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = r_1 \dot{I}_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = r_2 \dot{I}_2 + \dot{Z}_{\text{нг}} \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{w_2}{w_1}\right)\dot{I}_2, \end{cases} \quad (4.7)$$

где $\dot{Z}_{\text{нг}}$ – полное сопротивление электрического приемника (нагрузки), подключенного к вторичной обмотке.

Преобразуем (4.7) с учетом (4.1) и решим первое уравнение относительно U_1 , а второе – относительно E_2 :

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + r_2 \dot{I}_2 + jx_2 \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{w_2}{w_1}\right) \dot{I}_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Во втором уравнении системы (4.8) падение напряжения на сопротивлении нагрузки заменено вторичным напряжением трансформатора $\dot{U}_2 = \dot{Z}_{\text{нг}} \cdot \dot{I}_2$.

По уравнениям системы (4.8) строят векторные диаграммы трансформатора при различном характере нагрузки. На рис. 4.1 представлены полные векторные диаграммы понижающего трансформатора ($w_2 < w_1$) при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках.

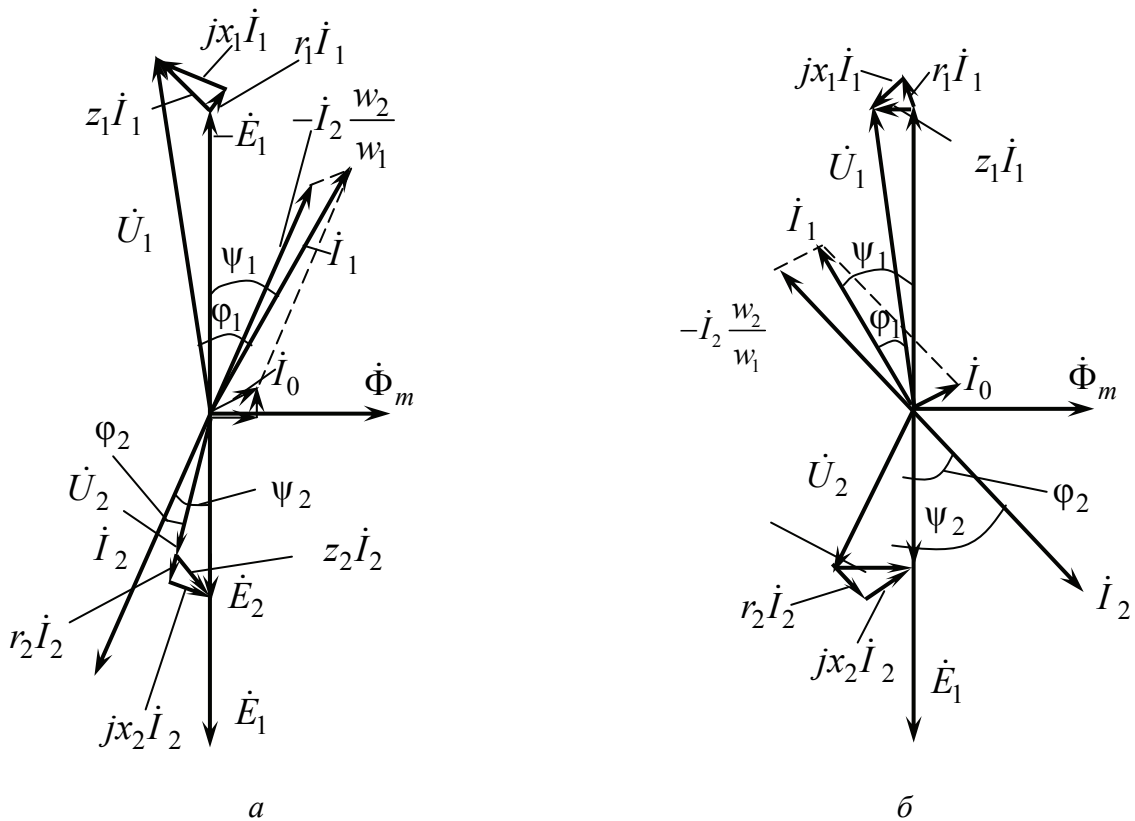


Рис. 4.1. Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной нагрузке (а); при активно-ёмкостной нагрузке (б)

При построении диаграммы полагают, что заданы векторы вторичного напряжения \dot{U}_2 и отстающего от него на угол φ_2 тока \dot{I}_2 , вектор первичной ЭДС \dot{E}_1 , вектор основного магнитного потока $\dot{\Phi}_m$, векторы активной \dot{I}_{0a} и реактивной \dot{I}_{0p} составляющих тока холостого хода, а также сопротивления первичной r_1, x_1 и вторичной r_2, x_2 обмоток.

Построение диаграммы при активно-индуктивной нагрузке начинают с вектора $\dot{\Phi}_m$. Вектор намагничивающего тока \dot{I}_{0p} совпадает с вектором $\dot{\Phi}_m$ по направлению, вектор \dot{I}_{0a} перпендикулярен вектору $\dot{\Phi}_m$. Вектор результирующего тока холостого хода $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0p}$ опережает $\dot{\Phi}_m$ на угол $\gamma = 5-10^\circ$. Этот угол называют углом магнитного запаздывания. Он определяет отставание вектора потока $\dot{\Phi}_m$ от вектора МДС \dot{F}_m и обусловлен магнитными потерями в сердечнике магнитопровода. Векторы ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 отстают от потока $\dot{\Phi}_m$ на угол 90° . Вектор тока вторичной обмотки \dot{I}_2 при активно-индуктивной нагрузке отстает от вектора \dot{E}_2 на угол $\psi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2}$. Векторы \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по направлению. Зная вектор \dot{I}_2 , можно построить вектор компенсационного тока $(-\frac{w_2}{w_1})\dot{I}_2$. Решая графически последнее уравнение системы (4.8), получают вектор тока первичной обмотки \dot{I}_1 .

Решая первое уравнение системы (4.8), строят искомый вектор первичного напряжения \dot{U}_1 . Для этого из конца вектора $-\dot{E}_1$ параллельно вектору \dot{I}_1 строят вектор $r_1 \cdot \dot{I}_1$ (падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки). Из конца вектора $r_1 \cdot \dot{I}_1$ перпендикулярно ему (и вектору тока \dot{I}_1) строят вектор $jx_1 \dot{I}_1$ (падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния первичной обмотки). Сложение двух последних векторов дает вектор $\dot{z}_1 \cdot \dot{I}_1$ (полное падение напряжения на сопротивлениях первичной обмотки).

Решая аналогично второе уравнение системы, находят вектор $\dot{z}_2 \cdot \dot{I}_2$ (полного падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки) и искомый вектор ЭДС вторичной обмотки \dot{E}_2 .

Векторная диаграмма при активно-ёмкостной нагрузке (4.1, б) строится аналогично.

Векторные диаграммы трансформатора показывают, что любое изменение тока во вторичной обмотке ведет к изменению тока в первичной обмотке.

4.2. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной. Схема замещения трансформатора

Для анализа различных режимов работы трансформатор представляют в виде электрической схемы замещения, по которой определяют токи первичной и вторичной обмоток, мощность, потребляемую из сети, потери мощности, КПД и т. п. В схеме замещения первичная и вторичная обмотки соединены электрически. Такое соединение в схеме становится возможным, если первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют одинаковое количество витков. Так как число витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток могут значительно различаться, то в схеме замещения реальная вторичная обмотка заменяется некоторой виртуальной обмоткой с числом витков $w'_2 = w_1$. Такую вторичную обмотку называют *приведенной*, а трансформатор – *приведенным трансформатором*. При приведении вторичной обмотки необходимо, чтобы все электроэнергетические процессы в реальном и приведенном трансформаторах были сохранены. То есть замена реальной вторичной обмотки приведенной не должна изменить количественные и качественные характеристики электромагнитных процессов во вторичной обмотке и, соответственно, в трансформаторе.

Число витков w'_2 приведенной вторичной обмотки отличается от реального числа витков w_2 в k раз (k – коэффициент трансформации):

$$w'_2 = w_2 \cdot k = w_1. \quad (4.9)$$

ЭДС и напряжение вторичной обмотки трансформатора также изменяются в k раз:

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_2 \cdot k; \quad (4.10)$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 \cdot k. \quad (4.11)$$

Полная мощность вторичной обмотки в реальном и приведенном трансформаторе не должны отличаться:

$$\dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2 = \dot{U}'_2 \cdot \dot{I}'_2. \quad (4.12)$$

Из выражения (4.12) получим значение приведенного тока вторичной обмотки трансформатора:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}. \quad (4.13)$$

Должны быть одинаковыми и электрические потери мощности во вторичной обмотке реального и приведенного трансформаторов:

$$r \cdot \dot{I}_2^2 = r'_2 \cdot \dot{I}'_2{}^2, \quad (4.14)$$

откуда значение приведенного активного сопротивления вторичной обмотки

$$r'_2 = r_2 \cdot k^2. \quad (4.15)$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки x'_2 определим, исходя из равенства углов $\psi_2 = \psi'_2$ между векторами ЭДС и тока во вторичной обмотке реального и приведенного трансформатора:

$$\Psi_2 = \psi'_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg \frac{x'_2}{r'_2}. \quad (4.16)$$

Тригонометрические функции равны, если равны их аргументы:

$$\frac{x_2}{r_2} = \frac{x'_2}{r'_2}, \quad (4.17)$$

откуда индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки

$$x'_2 = x_2 \cdot k^2. \quad (4.18)$$

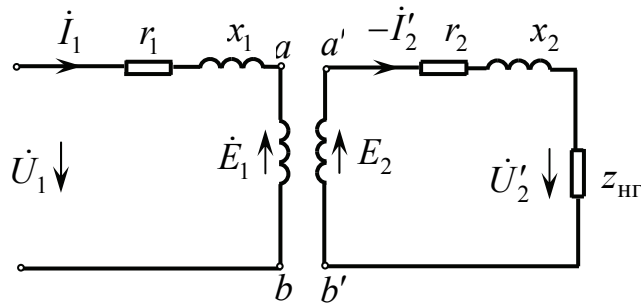


Рис. 4.2. Электрическая схема неприведенного (реального) трансформатора

Первичную и вторичную обмотки фазы трансформатора можно представить электрической схемой (рис. 4.2). В электрической схеме первичная и вторичная обмотки не связаны электрически. Воспользовавшись приведением вторичной обмотки, можно преобразовать данную схему и объединить попарно равнопотенциальные точки $a - a'$ и $b - b'$, т. е. соединить первичный и вторичный контуры (ток контура $I_{aa'b'b} = 0$). Полученную схему (рис. 4.3) называют Т-образной схемой замещения трансформатора. На вход схемы замещения подают напряжение \dot{U}_1 , к выходу ее подключают переменное сопротивление нагрузки $z'_{нг}$, к которому приложено напряжение $-\dot{U}'_2$.

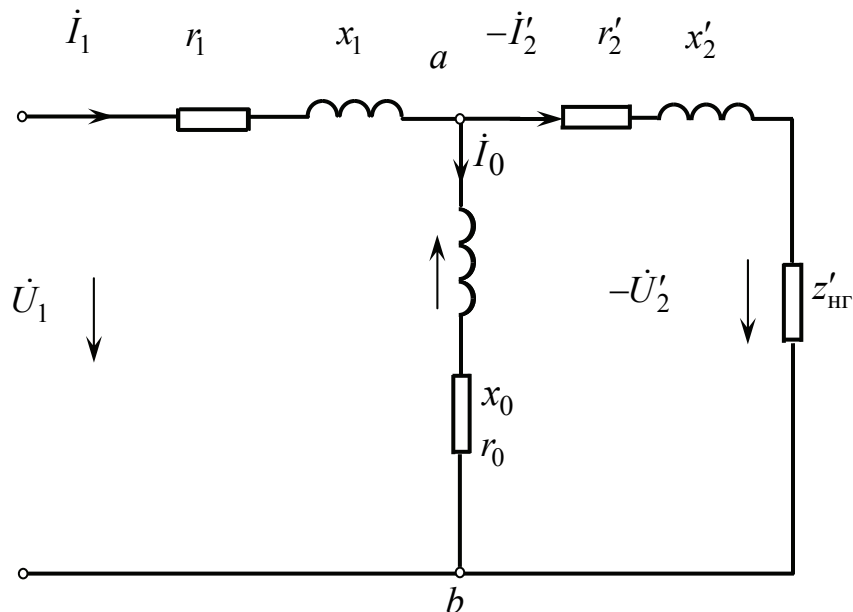


Рис. 4.3. Т-образная схема замещения трансформатора

Контур $a - b$ схемы замещения называют *намагничивающим контуром*. По намагничивающему контуру протекает ток холостого хода (намагничивающий ток) $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$, который возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток Φ , наводящий в обмотках приведенного трансформатора ЭДС взаимоиндукции:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -jx_0 \dot{I}_0. \quad (4.19)$$

Сопротивление взаимоиндукции намагничивающего контура x_0 в (4.19) обусловлено основным магнитным потоком Φ и является коэффициентом пропорциональности между ЭДС обмоток приведенного трансформатора $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ и током холостого хода.

Активное сопротивление намагничивающего контура r_0 введено в схему замещения для учета магнитных потерь в магнитопроводе реального трансформатора и является коэффициентом пропорциональности между реальными магнитными потерями и квадратом тока холостого хода:

$$P_{\text{мг}} = m_1 \cdot r_0 \cdot I_0^2. \quad (4.20)$$

Следует помнить, что активное сопротивление r_0 физического смысла не имеет. Оно не относится ни к электрической, ни к магнитной цепям реального трансформатора.

Горизонтальная ветвь схемы замещения называется *главной ветвью*. По главной ветви протекает ток $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$. В главной ветви r_1, r_2 – активные сопротивления, соответственно, первичной и приведенной вторичной обмоток, обуславливающие электрические потери в обмотках трансформатора; x_1, x_2 – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и приведенной вторичной обмоток, обусловленные магнитными потоками рассеяния соответствующих обмоток трансформатора; $\dot{z}'_{\text{нг}}$ – полное приведенное сопротивление нагрузки, подключенной к вторичной обмотке трансформатора.

Сопротивления намагничивающего контура и главной ветви называют параметрами схемы замещения трансформатора.

Параметры схемы замещения можно считать постоянными только при небольших изменениях первичного напряжения в пределах $\pm 10\%$. Это в первую очередь относится к намагничивающему контуру с сопротивлением $\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$, параметры которого определяют в первую очередь ток \dot{I}_0 . При увеличении напряжения происходит насыщение стали магнитопровода, а x_0 уменьшается (поскольку уменьшается магнитная проводимость), а намагничивающий ток \dot{I}_0 резко возрастает.

При известных параметрах схемы замещения рассчитывают токи во всех ее ветвях и определяют энергетические показатели трансформатора для любого режима нагрузки.

Параметры схемы замещения определяют расчетным или опытным путем. В практике трансформаторостроения широко используют методы опытного определения параметров схемы замещения.

Параметры схемы замещения опытным путем определяют по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

4.3. Опыт холостого хода

Опыт холостого хода проводят с целью построения характеристик холостого хода и определения параметров намагничивающего контура схемы замещения.

Схема опыта для однофазного трансформатора приведена на рис. 4.4, а. Первичная обмотка подключается к синусоидальному напряжению $U_1 = U_2$ через регулятор напряжения (РН), а вторичная обмотка разомкнута.

Опыт проводят для ряда значений напряжения (обычно 5–8 значений), изменяя напряжение первичной обмотки от $U_0 = 0,3 \cdot U_{1н}$ (малое насыщение стали магнитопровода) до $U_0 = 1,1 \cdot U_{1н}$ (перевозбуждение трансформатора, сильное насыщение стали магнитопровода).

В однофазном трансформаторе для каждого значения напряжения измеряют потребляемые первичной обмоткой ток $I_1 = I_2$ и мощность $P_1 = P_2$ и рассчитывают коэффициент мощности $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}$.

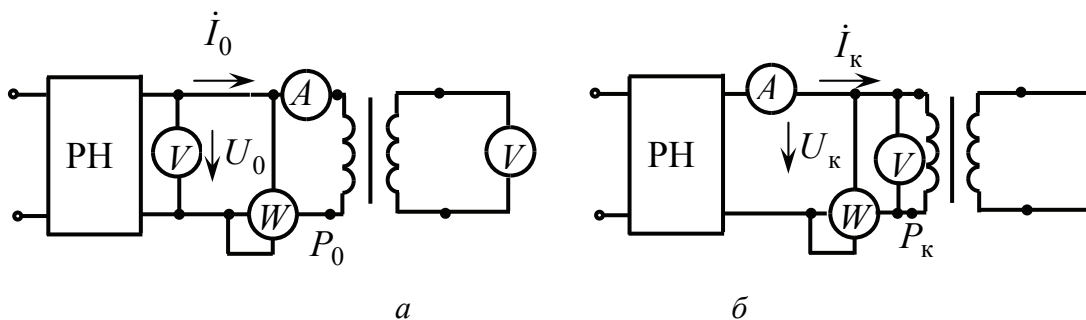


Рис. 4.4. Схемы проведения опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б).

В трехфазном трансформаторе для каждой точки опыта определяют средние значения фазного тока $I_1 = I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}$, фазного напряжения $U_1 = U_0 = \frac{U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}}{3}$, суммарную потребляемую мощность $P_1 = P_0 = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}$ и рассчитывают коэффициент мощности $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0}$.

По результатам опыта строят характеристики холостого хода I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0 = f(U_1)$, представленные на рис. 4.5. Характеристики объясняются следующим образом.

Характеристика $I_0 = f(U_1)$. В другом масштабе эта зависимость повторяет кривую намагничивания стали магнитопровода $B = f(H)$, так как намагничивающая (реактивная) составляющая тока I_0 пропорциональна напряженности магнитного поля H , а магнитная индукция B пропорциональна напряжению U_1 . Поэтому при малых напряжениях зависимость $I_0 = f(U_1)$ линейна (насыщение стали магнитопровода мало). При возрастании напряжения из-за насыщения стали (увеличение магнитного сопротивления стали) зависимость становится нелинейной, т. е. ток I_0 растет быстрее напряжения U_1 . При напряжениях U_1 выше номинального зависимость снова становится линейной, так как сталь магнитопровода сильно насыщена: при росте I_0 магнитный поток практически не возрастает.

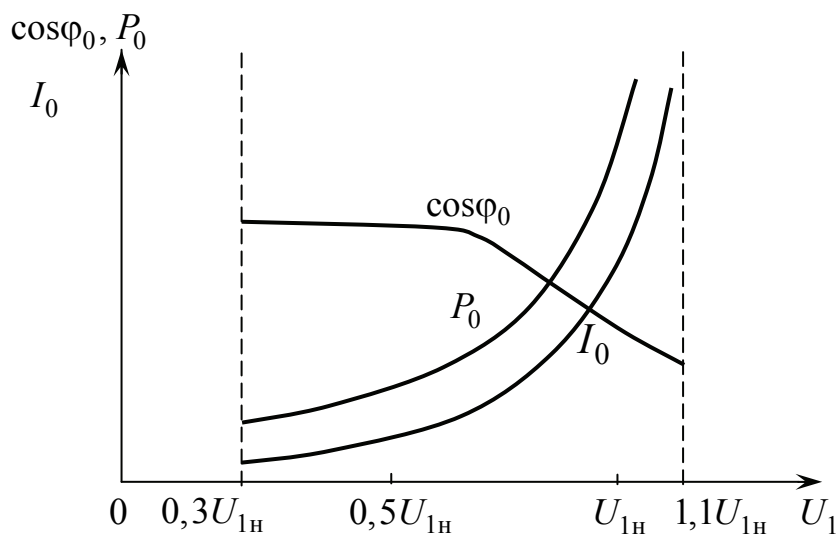


Рис. 4.5. Характеристики холостого хода трансформатора

Характеристика $\cos \varphi_0 = f(U_1)$. Коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ показывает долю активной составляющей I_{0a} и реактивной составляющей I_{0p} в полном токе холостого хода I_0 :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} = \frac{I_{0a}}{\sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}}, \quad (4.21)$$

здесь S_0 – полная мощность первичной обмотки в режиме холостого хода; P_0 – активная мощность первичной обмотки в режиме холостого хода; Q_0 – реактивная мощность первичной обмотки в режиме холостого хода.

При малых напряжениях магнитопровод насыщен мало, поэтому реактивный ток I_{0p} слабо растет по линейной зависимости, а $\cos \varphi_0$ остается неизменным. С ростом напряжения сталь магнитопровода насыщается, что приводит к значительному нелинейному увеличению I_{0p} . При увеличении напряжения характеристика $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ уменьшается по нелинейной (почти гиперболической) зависимости.

Характеристика $P_0 = f(U_1)$. Активная электрическая мощность холостого хода $P_1 = P_0$ потребляется первичной обмоткой для покрытия электрических потерь в обмотке $p_{\text{эл1хх}} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_0^2$ и магнитных потерь в магнитопроводе $p_{\text{мг}} = m_1 \cdot r_0 \cdot I_0^2$:

$$P_1 = P_0 = p_{\text{эл1хх}} + p_{\text{мг}} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_0^2 + m_1 \cdot r_0 \cdot I_0^2. \quad (4.22)$$

Ток холостого хода I_0 по сравнению с током номинальным весьма мал и в силовых трансформаторах не превышает 1–3 % от номинального ($I_0 = (0,01 - 0,03) \cdot I_{1н}$). Поэтому электрическими потерями пренебрегают ($p_{\text{эл1хх}} \approx 0$) и считают, что активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, расходуется на компенсацию магнитных потерь $P_{\text{мг}}$:

$$P_1 = P_0 \approx p_{\text{мг}}. \quad (4.23)$$

Из формулы Штейнметца (4.13) видно, что магнитные потери в стали магнитопровода пропорциональны квадрату магнитной индукции B^2 или квадрату напряжения U_1^2 . При увеличении напряжения U_1 мощность P_0 увеличивается по параболической зависимости.

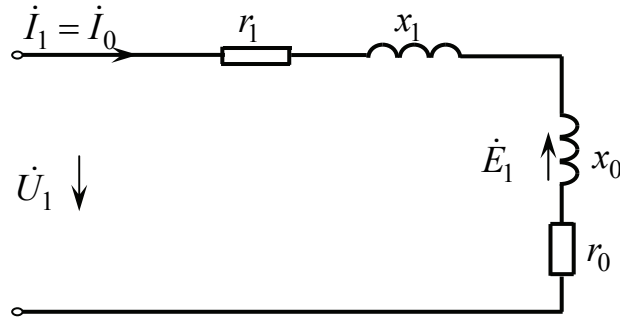


Рис. 4.6. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

По результатам опыта холостого хода определяют параметры намагничивающего контура Т-образной схемы замещения. Т-образная схема замещения для режима холостого хода показана на рис. 4.6. Эквивалентные входные сопротивления схемы замещения трансформатора:

$$\dot{z}_x = \dot{z}_1 + \dot{z}_0; \quad r_x = r_1 + r_0; \quad x_x = x_1 + x_0. \quad (4.24)$$

В трансформаторах $\dot{z}_1 \ll \dot{z}_0$; $r_1 \ll r_0$; $x_1 \ll x_0$. В результате можно пренебречь сопротивлениями \dot{z}_1 , r_1 , x_1 и с достаточной степенью точности считать, что

$$\dot{z}_1 + \dot{z}_0 \approx \dot{z}_0; \quad r_1 + r_0 \approx r_0; \quad x_1 + x_0 \approx x_0. \quad (4.25)$$

Таким образом, параметры намагничивающего контура схемы замещения трансформатора определяют по схеме рис. 4.6 с учетом (4.25):

$$z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}; \quad (4.26)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{m_1 \cdot I_0^2} = \frac{P_{\text{мг}}}{m_1 \cdot I_0^2}; \quad (4.27)$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (4.28)$$

В формулах (4.26) и (4.27) значения тока холостого хода I_0 и суммарной мощности P_0 (для m -фазного трансформатора) принимают соответствующими номинальному напряжению первичной обмотки $U_1 = U_{1H}$.

4.4. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводят с целью построения характеристик короткого замыкания, определения параметров главной ветви Т-образной схемы замещения и определения важной эксплуатационной величины трансформатора – напряжения короткого замыкания.

Схема опыта для однофазного трансформатора приведена на рис. 4.4, б. Вторичная обмотка в опыте короткого замыкания замкнута накоротко, а к первичной обмотке через регулятор напряжения подводят пониженное напряжение $U_1 = U_k$, при котором ток короткого замыкания в обмотках не превысит номинального тока. Это напряжение значительно меньше номинального напряжения первичной обмотки $U_k \ll U_{1н}$.

Если при закороченной вторичной обмотке к первичной подвести номинальное напряжение, то токи в обмотках в десятки раз превысят номинальные значения. Резко возрастут электрические потери в обмотках и электродинамические силы, действующие на обмотки, в результате чего обмотки трансформатора могут быть разрушены. Таким образом, в реальных условиях эксплуатации режим короткого замыкания является аварийным режимом.

Поэтому опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении. Напряжение U_k изменяют от 0 до такого значения, чтобы ток первичной обмотки изменялся от $I_1 = I_k = 0$ до номинального значения $I_k = I_{1н}$. Обычно фиксируют 5–6 точек.

В однофазном трансформаторе для каждого значения напряжения U_k измеряют потребляемые первичной обмоткой ток $I_1 = I_k$ и мощность $P_1 = P_k$ и рассчитывают коэффициент мощности: $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k \cdot I_k}$.

В трехфазном трансформаторе для каждой точки опыта определяют средние значения фазного тока короткого замыкания $I_1 = I_k = \frac{I_{kA} + I_{kB} + I_{kC}}{3}$,

фазного напряжения короткого замыкания $U_1 = U_k = \frac{U_{kA} + U_{kB} + U_{kC}}{3}$,

суммарную потребляемую мощность при коротком замыкании $P_1 = P_k = P_{kA} + P_{kB} + P_{kC}$ и рассчитывают коэффициент мощности $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 \cdot U_k \cdot I_k}$.

По результатам опыта строят характеристики короткого замыкания I_k , P_k , $\cos \varphi_k = f(U_k)$, представленные на рис. 4.7. Характеристики короткого замыкания объясняются следующим образом.

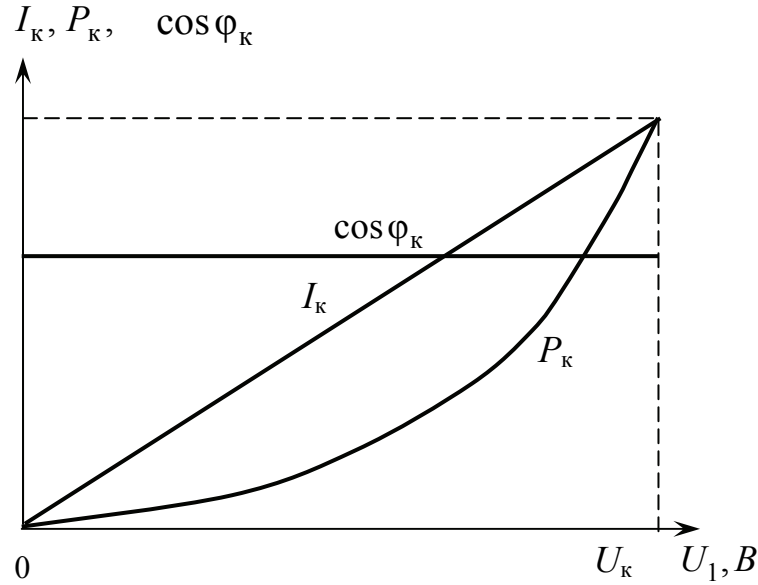


Рис. 4.7. Характеристики короткого замыкания трансформатора

Характеристика $I_k = f(U_k)$. Обычно в опыте короткого замыкания $U_k \leq 0,15 \cdot U_{1H}$, т. е. не превышает 15 % от номинального значения первичного напряжения. При таком пониженном напряжении сталь магнитопровода трансформатора не насыщена, и зависимость повторяет линейный участок кривой намагничивания стали: при увеличении напряжения U_k ток I_k возрастает линейно.

Характеристика $\cos \varphi_k = f(U_k)$. Коэффициент мощности при коротком замыкании определяется формулой

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + Q_k^2}} = \frac{r_k I_k^2}{\sqrt{(r_k I_k^2)^2 + (x_k I_k^2)^2}} = \frac{r_k}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}, \quad (4.29)$$

здесь S_k – полная мощность первичной обмотки в режиме короткого замыкания; P_k – активная мощность первичной обмотки в режиме короткого замыкания; Q_k – реактивная мощность первичной обмотки в режиме короткого замыкания; $r_k = r_1 + r_2'$ – активное сопротивление обмоток при коротком замыкании; $x_k = x_1 + x_2'$ – индуктивное сопротивление обмоток при коротком замыкании.

Так как сопротивление обмоток r_k постоянно и не зависит от напряжения, а сопротивление x_k , обусловленное потоками рассеяния, также постоянно, то и зависимость $\cos \varphi_k = f(U_k)$ – прямая, параллельная оси абсцисс.

Характеристика $P_k = f(U_k)$. Активная электрическая мощность при коротком замыкании $P_1 = P_k$ потребляется первичной обмоткой для покрытия электрических потерь в первичной обмотке $p_{эл1} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_k^2$, вторичной обмотке $p_{эл2} = m_1 \cdot r_2 \cdot I_2^2$ и магнитных потерь в магнитопроводе. Ввиду малой величины подаваемого на первичную обмотку напряжения (насыщение отсутствует) магнитными потерями (пропорциональными напряжению во второй степени) можно пренебречь ($p_{мг} \approx 0$) и считать, что вся потребляемая мощность при коротком замыкании расходуется для компенсации электрических потерь в обмотках трансформатора:

$$P_1 = P_k = p_{эл1} + p_{эл2} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 + m_2 \cdot r_2 \cdot I_2^2, \quad (4.30)$$

или для приведенного трансформатора:

$$P_1 = P_k = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 + m_1 \cdot r'_2 \cdot I_2'^2 = m_1 \cdot r_k \cdot I_k^2, \quad (4.31)$$

где $I_k = I_1 + I_2'$ – ток короткого замыкания, протекающий в обмотках приведенного трансформатора.

Из формулы (4.31) следует, что при увеличении напряжения U_k и линейной зависимости $I_k = f(U_k)$ мощность P_k увеличивается по параболической зависимости.

По результатам опыта короткого замыкания определяют параметры главной ветви Т-образной схемы замещения. Т-образная схема замещения для режима короткого замыкания показана на рис. 4.8. Намагничивающий контур в схеме отсутствует из-за пренебрежения намагничивающим током: при уменьшении напряжения в 10–20 раз ток намагничивающий (составляющий не более 3 % от номинального) уменьшается (за счет насыщения магнитопровода при номинальном напряжении) в 25–40 раз.

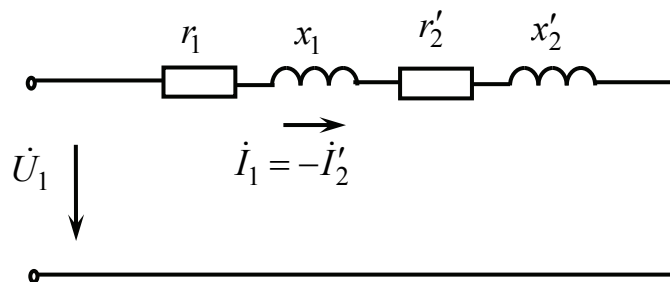


Рис. 4.8. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}. \quad (4.32)$$

Активное сопротивление обмоток при коротком замыкании

$$r_k = \frac{P_k}{m_1 \cdot I_k^2}. \quad (4.33)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния при коротком замыкании

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (4.34)$$

В формулах (4.32), (4.33) ток короткого замыкания равен номинальному току первичной обмотки $I_k = I_{1н}$, а значения напряжения U_k и суммарной мощности P_k (для m -фазного трансформатора) принимают соответствующими этому току.

Из опыта короткого замыкания определяется важная эксплуатационная паспортная величина трансформатора – *напряжение короткого замыкания* U_k .

Под напряжением короткого замыкания понимают такое напряжение, которое необходимо подать на одну из обмоток трансформатора при замкнутых остальных, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания принято выражать в процентах от номинального напряжения:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1н}} \cdot 100 \% = \frac{z_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} \cdot 100 \% \quad (4.35)$$

Значение u_k указывается в паспортной табличке трансформатора. Оно оказывает непосредственное влияние на изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузках, определяет значения ударного и установившегося значения тока короткого замыкания при номинальном напряжении и определяет распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

Для силовых трансформаторов $u_k = (4,5-15) \%$. Первая цифра относится к трансформаторам с линейным напряжением $U_{1л} \leq 10$ кВ, а вторая – к трансформаторам с $U_{1л} \geq 500$ кВ, обладающим большим рассеянием

вследствие увеличения размеров обмоток и увеличенными изоляционными промежутками между ними.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах от первичного номинального напряжения

$$u_{\text{ка}} = \frac{U_{\text{ка}}}{U_{1\text{н}}} 100 \% = \frac{r_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} 100 \% . \quad (4.36)$$

Если умножить числитель и знаменатель (4.36) на $I_{1\text{н}}$, то получим еще одну формулу для определения $u_{\text{ка}}$ по паспортным данным трансформатора:

$$u_{\text{ка}} = \frac{r_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} \cdot \frac{I_{1\text{н}}}{I_{1\text{н}}} \cdot 100 \% = \frac{P_{\text{кн}}}{10 \cdot S_{\text{н}}} , \quad (4.37)$$

здесь $P_{\text{кн}}$ — мощность потерь короткого замыкания (Вт) при номинальных токах; $S_{\text{н}}$ — полная номинальная мощность трансформатора в кВА. По формуле (4.37) возможно судить о процентном значении электрических потерь в обмотках трансформатора или потерь короткого замыкания при номинальных токах.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах от первичного номинального напряжения

$$u_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{кр}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100 \% = \frac{x_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100 \% . \quad (4.38)$$

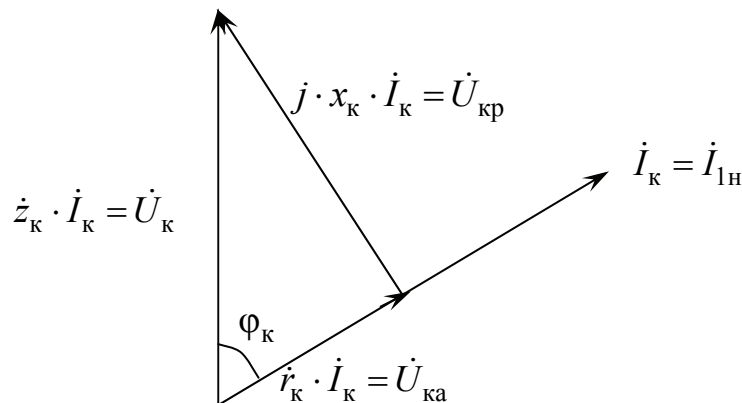


Рис. 4.9. Векторная диаграмма трансформатора $I_{\text{к}} = I_{1\text{н}}$ при коротком замыкании

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании с током $I_k = I_{1н}$ представлена на рис. 4.9. Данная векторная диаграмма называется треугольником короткого замыкания. При номинальном токе гипотенуза треугольника – напряжение короткого замыкания U_k (В) или u_k (%). А катеты треугольника – активная составляющая напряжения короткого замыкания $U_{ка}$ (В) или $u_{ка}$ (%) и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания $U_{кр}$ (В) или $u_{кр}$ (%). На рис. 4.9 видно, что

$$u_{ка} = u_k \cdot \cos\varphi_k; \quad u_{кр} = u_k \cdot \sin\varphi_k; \quad u_k = \sqrt{u_{ка}^2 + u_{кр}^2}. \quad (4.39)$$

С помощью u_k можно определить величину установившегося тока короткого замыкания (относительно номинального тока), произошедшего при номинальном напряжении в первичной обмотке (аварийный режим):

$$I_{куст} = \frac{U_{1н}}{Z_k} = \frac{U_{1н}}{z_k} \cdot \frac{I_{1н}}{I_{1н}} = \frac{100\%}{u_k} \cdot I_{1н}. \quad (4.40)$$

Так как в силовых трансформаторах напряжение $u_k = 4,5–15\%$, ток установившегося короткого замыкания $I_{куст} = (20–7) \cdot I_{1н}$. Например, если $u_k = 10\%$, то установившийся ток короткого замыкания в десять раз превышает номинальный ток первичной обмотки $I_{куст} = 10 \cdot I_{1н}$.

Выше рассмотрены комплексные уравнения напряжения и векторные диаграммы трансформатора в режиме различных нагрузок. Для определения энергетических характеристик реального трансформатора последний заменен электрической схемой замещения, позволяющей рассчитать любые режимы работы при известных параметрах схемы замещения. Параметры схемы замещения находятся расчетным или экспериментальным методом по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. Определена важнейшая паспортная величина трансформатора – напряжение короткого замыкания.

5. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

5.1. Энергетические диаграммы активной и реактивной мощностей трансформатора

Процесс преобразования активной мощности в трансформаторе характеризует энергетическая диаграмма (рис. 5.1, *а*). Активная мощность, которая при работе трансформатора выделяется в виде тепла (потери мощности), показана в нижней части диаграммы маленькими буквами p .

В соответствии с энергетической диаграммой первичная обмотка трансформатора потребляет из сети активную электрическую мощность P_1 :

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (5.1)$$

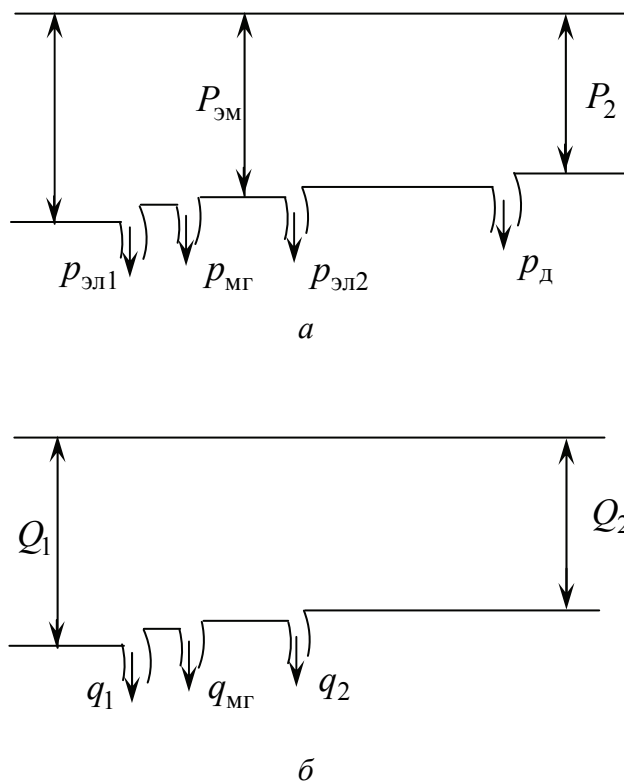


Рис. 5.1. Энергетические диаграммы преобразования активной (*а*) и реактивной (*б*) мощностей в трансформаторе

Часть этой мощности компенсирует электрические потери мощности в первичной обмотке трансформатора (нагрев проводов обмотки):

$$p_{эл1} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2. \quad (5.2)$$

Еще часть мощности P_1 расходуется на покрытие магнитных потерь в стали магнитопровода:

$$p_{мг} = m_1 \cdot r_0 \cdot I_0^2. \quad (5.3)$$

Оставшаяся часть мощности передается магнитным полем во вторичную обмотку. Эту мощность называют *внутренней электромагнитной мощностью*:

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг} = m_1 \cdot E'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \psi_2, \quad (5.4)$$

где ψ_2 – угол между векторами ЭДС и тока приведенной вторичной обмотки.

Часть мощности $P_{эм}$ компенсирует электрические потери мощности вторичной обмотки:

$$p_{эл2} = m_2 \cdot r_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot r'_2 \cdot I_2'^2. \quad (5.5)$$

Еще часть мощности $P_{эм}$ покрывает добавочные потери p_d . По месту возникновения различают добавочные потери в токоведущих частях (обмотках, отводах) за счет вытеснения тока, в элементах конструкции от вихревых токов поля рассеяния (баке, прессующих кольцах, ярмовых балках, нажимных и стяжных пластинах, бандажах, электромагнитных и электростатических экранах), а также потери от вихревых токов поля рассеяния в крайних пакетах магнитопровода. При проектировании силовых трансформаторов добавочные потери принимают (0,15 – 0,45) % от номинальной мощности:

$$p_d = (0,0015 - 0,0045) S_H. \quad (5.6)$$

Оставшаяся часть электромагнитной мощности $P_{эм}$ – активная полезная электрическая мощность P_2 , отдаваемая трансформатором потребителям:

$$P_2 = P_{эм} - p_{эл2} - p_d = m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = m_1 \cdot U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (5.7)$$

Преобразование реактивной мощности представлено диаграммой на рис. 5.1, б. Первичная обмотка из сети потребляет реактивную мощность:

$$Q_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1. \quad (5.8)$$

Часть мощности Q_1 расходуется на создание магнитного поля рассеяния первичной обмотки:

$$q_1 = m_1 \cdot x_1 \cdot I_1^2. \quad (5.9)$$

Еще часть мощности Q_1 создает магнитное поле взаимоиндукции в магнитопроводе:

$$q_0 = m_1 \cdot x_0 \cdot I_{0p}^2 = m_1 \cdot E_1 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_1. \quad (5.10)$$

Во вторичную обмотку передается реактивная электромагнитная мощность:

$$Q_{эм} = Q_1 - q_1 - q_0 = m_1 \cdot E_2' \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2. \quad (5.11)$$

Часть мощности $Q_{эм}$ расходуется на создание магнитного поля рассеяния вторичной обмотки:

$$q_2 = m_2 \cdot x_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot x_2' \cdot I_2'^2. \quad (5.12)$$

Оставшаяся часть электромагнитной мощности – реактивная мощность трансформатора, отдаваемая потребителям:

$$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_0 - q_2 = m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = m_1 \cdot U_2' \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2. \quad (5.13)$$

При активно-ёмкостной нагрузке $\varphi_2 < 0$, следовательно, $Q_2 < 0$. Изменение знака Q_2 означает изменение направления передачи реактивной мощности. Если при этом $Q_1 < 0$, то реактивная мощность передается из вторичной обмотки в первичную. Если $Q_2 < 0$ и $Q_1 > 0$, то реактивная мощность для намагничивания магнитопровода потребляется одновременно из первичной и вторичной обмоток трансформатора.

5.2. Коэффициент полезного действия трансформатора. Зависимость КПД от нагрузки

Коэффициентом полезного действия трансформатора называют отношение активной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку P_2 , к активной мощности P_1 , потребляемой трансформатором из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_2 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}. \quad (5.14)$$

Как показано в п. 5.1, первичную мощность трансформатора можно представить как

$$P_1 = P_2 + \sum p, \quad (5.15)$$

где $\sum p = p_{\text{мг}} + p_{\text{эл1}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{д}}$ – суммарные потери мощности в трансформаторе.

Магнитные потери $p_{\text{мг}}$, или потери в стали магнитопровода, принимают равными потерям холостого хода p_0 (см. п. 4.4). Потери холостого хода пропорциональны квадрату магнитной индукции и зависят от частоты питающей сети $p_0 \sim B^2, f^{1,3}$. При $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ потери p_0 от нагрузки практически не зависят и носят название *постоянных потерь мощности*:

$$p_{\text{мг}} = p_0 = \text{const}. \quad (5.16)$$

Электрические потери в обмотках трансформатора пропорциональны квадрату тока, и поэтому их называют *переменными потерями мощности*. Переменные электрические потери, включая добавочные, выражают через потери короткого замыкания при номинальных токах в обмотках приведенного трансформатора (см. п. 4.4). Потери короткого замыкания при номинальном токе

$$p_{\text{кн}} = p_{\text{эл1}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{д}} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_{1\text{н}}^2 + m_1 \cdot r_2' \cdot I_{2\text{н}}^2 = m_1 \cdot r_{\text{к}} \cdot I_{1\text{н}}^2. \quad (5.17)$$

Для определения электрических переменных потерь короткого замыкания $p_{\text{к}}$ при токах, отличных от номинального, введем *понятие коэффициента загрузки (нагрузки) трансформатора*:

$$k_3 = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{н}}}. \quad (5.18)$$

Коэффициент загрузки k_3 показывает, как текущий ток в обмотке трансформатора при определенной нагрузке отличается от тока при номинальной нагрузке. Соответственно, при номинальной нагрузке, когда $I_1 = I_{1н}$, коэффициент загрузки $k_3 = 1$; при нагрузке трансформатора половиной номинальной мощности, когда ток $I_1 = 0,5I_{1н}$, коэффициент загрузки $k_3 = 0,5$ и т. д. Обычно токи, отличные от номинальных, учитывают стандартными значениями коэффициента загрузки $k_3 = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$.

С учетом (5.18) переменные потери p_k принимают вид

$$p_k = k_3^2 \cdot p_{кн} = \text{var.} \quad (5.19)$$

За расчетную температуру обмоток – условную температуру, которой соответствуют электрические потери мощности, принимают:

- 75° С для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией класса нагревостойкости А, Е, В.
- 115° С для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией класса нагревостойкости F, H.

Суммарные потери мощности трансформатора с учетом (5.16) и (5.19)

$$\sum p = p_0 + p_k = p_0 + k_3^2 \cdot p_{кн}. \quad (5.20)$$

КПД трансформатора представим в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}. \quad (5.21)$$

В формуле (5.21) активную мощность P_2 можно заменить произведением:

$$P_2 = k_3 \cdot S_H \cdot \cos \phi_2. \quad (5.22)$$

Меняя коэффициент загрузки k_3 в (5.22), возможно получить значение мощности P_2 для любого тока нагрузки трансформатора. Подставляя (5.20), (5.22) в (5.21), получим формулу для определения КПД трансформатора, рекомендуемую ГОСТом:

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + k_3^2 \cdot p_{кн}}{k_3 \cdot S_H \cdot \cos \phi_2 + p_0 + k_3^2 \cdot p_{кн}}. \quad (5.23)$$

ГОСТ предписывает вычислять КПД трансформатора *косвенным методом* по формуле (5.23), так как высокие значения КПД трансформатора не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного замера мощностей P_1 и P_2 . Согласно требованиям ГОСТа, потери мощности трансформатора определяют по данным опыта холостого хода (потери p_0) и опыта короткого замыкания (потери p_k). Получаемый при этом результат имеет высокую точность, потому что в опытах холостого хода и короткого замыкания трансформатор не отдает мощности нагрузке. Вся мощность, потребляемая первичной обмоткой, расходуется на компенсацию потерь мощности трансформатора.

Задаваясь различными значениями k_3 в (5.23), строят зависимость КПД от нагрузки трансформатора $\eta = f(k_3)$ (рис. 5.2). На этом же графике показаны зависимости $p_0 = f(k_3)$ и $p_k = f(k_3)$. При малых нагрузках трансформатора $k_3 \approx (0 - 0,15)$ зависимость $\eta = f(k_3)$ линейна и быстро возрастает, так как потери p_k относительно малы. При дальнейшем увеличении нагрузки трансформатора, при $k_3 \approx (0,2 - 0,85)$, рост КПД замедляется и достигает пологого максимума, так как сказывается рост потерь короткого замыкания пропорциональных квадрату тока I_1^2 (или второй степени коэффициента загрузки k_3^2).

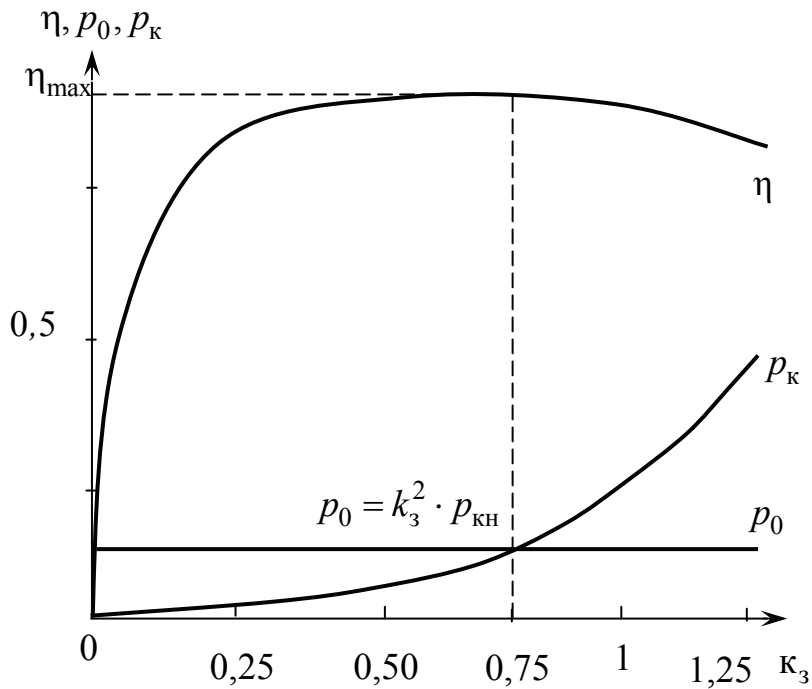


Рис. 5.2. Зависимость КПД трансформатора от коэффициента загрузки $\eta = f(k_3)$

Математическое условие экстремума функции КПД получают, приравняв производную КПД нулю: $\frac{d\eta}{dk_3} = 0$. Условие выполняется при

$$p_0 = k_{3\max}^2 \cdot p_{\text{кн}}. \quad (5.24)$$

Максимального значения $\eta = \eta_{\max}$ зависимость достигает при равенстве постоянных и переменных потерь мощности. Следовательно, *КПД имеет максимум при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках трансформатора равны магнитным потерям в стали магнитопровода.*

Коэффициент загрузки, соответствующий максимальному значению КПД η_{\max} ($k_{3\max}$), определяется по (5.24):

$$k_{3\max} = \sqrt{\frac{p_0}{p_{\text{кн}}}}. \quad (5.25)$$

Максимальные значения КПД современных силовых трансформаторов достигают $\eta = 0,98-0,995$ при коэффициенте загрузки $k_3 \approx 0,4-0,7$. Этот диапазон нагрузок соответствует наиболее вероятной нагрузке трансформатора. При дальнейшем увеличении нагрузки трансформатора КПД снижается, так как растут электрические потери в обмотках трансформатора $p_{\text{к}}$.

В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т. е. η сохраняет высокое значение в довольно широком диапазоне нагрузок: $0,4 < k_3 < 1,5$.

При уменьшении коэффициента мощности $\cos\varphi_2$ КПД снижается, что следует из (5.23).

5.3. Изменение вторичного напряжения при нагрузке. Внешняя характеристика трансформатора

В силовых трансформаторах ток холостого хода сравнительно мал и не превышает 3 % номинального тока. Поэтому при расчетах часто используют упрощенную схему замещения без намагничивающего контура при $z_0 = \infty$ (рис. 5.3). Погрешность расчетов, вызванная таким упрощением, не превышает 0,1 % при токах, близких к номинальному.

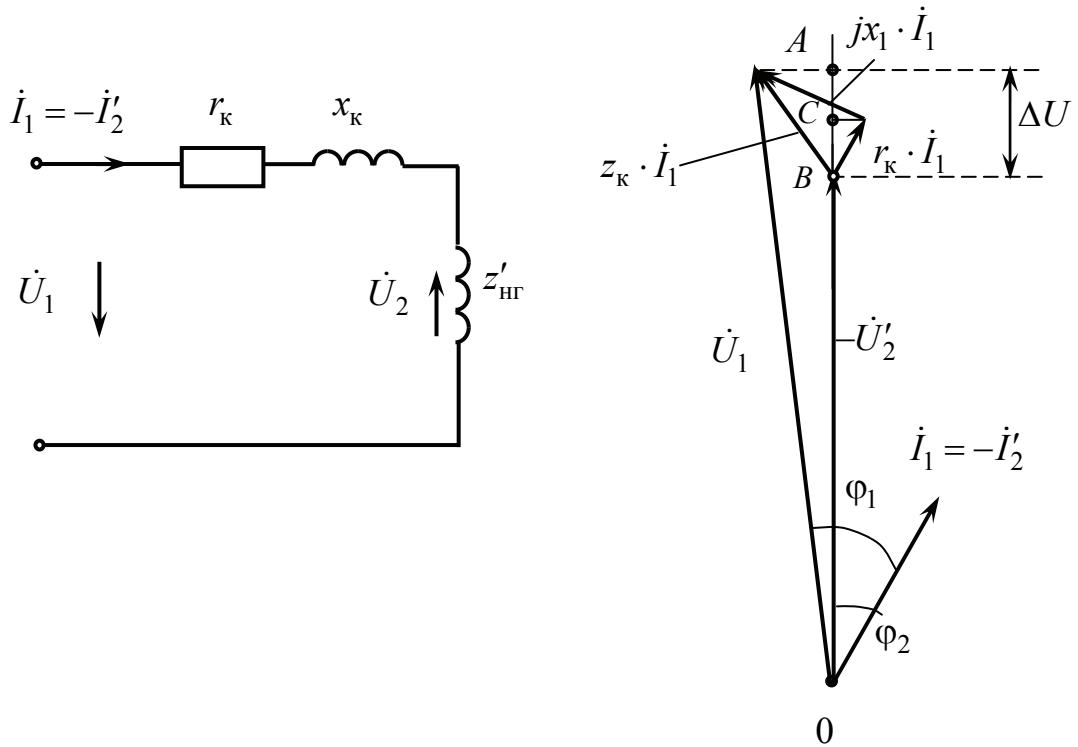


Рис. 5.3. Упрощенная схема замещения и векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

В упрощенной схеме $r_k = r_1 + r'_2$ – результирующее активное сопротивление первичной и приведённой вторичной обмоток; $x_k = x_1 + x'_2$ – результирующее индуктивное сопротивление этих обмоток; $z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$ – результирующее полное сопротивление обмоток трансформатора.

По обмоткам схемы протекает ток $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$. Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной нагрузке, соответствующая упрощенной схеме замещения, показана на рис. 5.3.

Вектор $r_k \cdot \dot{I}_1$ – результирующее активное падение напряжения в приведенном трансформаторе, вектор $jx_k \cdot \dot{I}_1$ – результирующее индуктивное падение напряжения, $z_k \cdot \dot{I}_1$ – результирующее полное падение напряжения:

$$\dot{z}_k \cdot \dot{I}_1 = r_k \cdot \dot{I}_1 + jx_k \cdot \dot{I}_1. \quad (5.26)$$

Векторная диаграмма (рис. 5.3) позволяет определить изменение напряжения трансформатора при изменении нагрузки.

Изменением напряжения трансформатора называют арифметическую разность между вторичным напряжением при холостом ходе и вторичным

напряжением при нагрузке, когда первичное напряжение и частота постоянны и равны номинальным значениям $U_1 = U_{1н} = \text{const}$, $f_1 = f_{1н} = \text{const}$:

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = U'_{20} - U'_2, \quad (5.27)$$

где U_{20} и U'_{20} – вторичные напряжения реального и приведенного трансформатора при холостом ходе. Так как в режиме холостого хода падения напряжения в обмотках трансформатора отсутствуют, то при номинальном напряжении первичной обмотки $U'_{20} = U_{1н}$.

Так же, как и напряжение короткого замыкания, изменение напряжения принято обозначать в % или относительных единицах:

$$\Delta u = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100 \% = \frac{\Delta U}{U_{1н}} \cdot 100 \%. \quad (5.28)$$

Из диаграммы (рис. 5.3) следует, что в виду малости угла $\varphi_1 - \varphi_2$ за модуль вектора \dot{U}_1 приближенно можно взять его проекцию на направление вектора $-\dot{U}'_2$, т. е. отрезок $OA = \dot{U}_1$. Отрезок OB соответствует длине вектора $-\dot{U}'_2$. Если вектор $r_k \cdot \dot{I}_1$ спроектировать на направление вектора $-\dot{U}'_2$ (отрезок BC) и вектор $jx_k \cdot \dot{I}_1$ на это же направление, получим:

$$\Delta U = OA - OB = BA = BC + CA = r_k \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + x_k \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2. \quad (5.29)$$

Если рассматривать ΔU для режима номинальной нагрузки, то процентное изменение напряжения трансформатора по (5.28) с учетом (5.29)

$$\Delta u_{\text{н}} = \frac{r_k \cdot I_{1н} \cdot \cos \varphi_2 + x_k \cdot I_{1н} \cdot \sin \varphi_2}{U_{1н}} \cdot 100 \% \quad (5.30)$$

или с учетом (4.36), (4.38)

$$\Delta u_{\text{н}} = (u_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2). \quad (5.31)$$

Используя коэффициент загрузки (см. п. 5.2), получим изменение напряжения трансформатора для нагрузок, отличных от номинальной:

$$\Delta u = k_3 \cdot \Delta u_{\text{н}} = k_3 \cdot (u_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2). \quad (5.32)$$

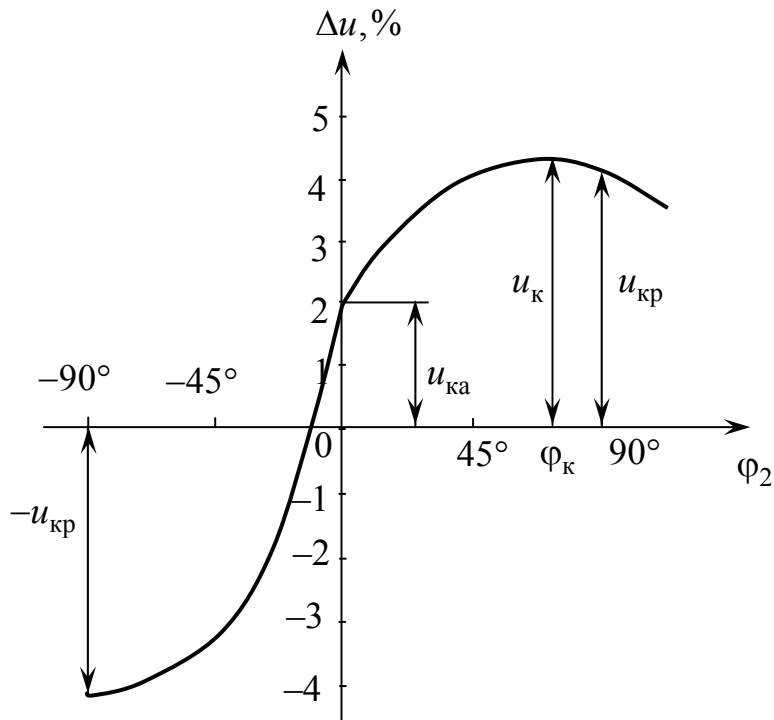


Рис. 5.4. Зависимость $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $k_3 = \text{const}$

Как видно из формулы (5.32), изменение напряжения трансформатора пропорционально току нагрузки $I'_2 = I_1$ и зависит от характера нагрузки, т. е. от угла φ_2 .

График зависимости $\Delta u = f(\varphi_2)$ при неизменной величине нагрузки $k_3 = \text{const}$ (рис. 5.4) имеет нелинейный характер. Первый квадрант соответствует активно-индуктивной нагрузке. А второй и третий квадранты – активно-ёмкостной нагрузке. При чисто активной нагрузке $\varphi_2 = 0$ ($\cos \varphi_2 = 1$) изменение напряжения наименьшее и равно активной составляющей напряжения короткого замыкания $\Delta u = k_3 \cdot u_{\text{ка}}$. При индуктивной ($\varphi_2 = +90^\circ$, $\cos \varphi_2 = 0$) или ёмкостной нагрузках $\varphi_2 = -90^\circ$, ($\cos \varphi_2 = 0$) изменение напряжения $\Delta u = k_3 \cdot u_{\text{кр}}$. Наибольшее изменение напряжения $\Delta u = k_3 \cdot u_{\text{к}}$ наблюдается при $\varphi_2 = \varphi_{\text{к}}$, что следует из векторной диаграммы (рис. 5.3).

График зависимости $\Delta u = f(k_3)$ при неизменном характере нагрузки $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рис. 5.5) имеет линейный характер. Чем выше индуктивность нагрузки (меньше $\cos \varphi_2 = \text{const}$), тем больше изменение напряжения Δu при увеличении нагрузки. При ёмкостной нагрузке Δu изменяет свой знак.

В практике эксплуатации трансформаторов часто пользуются его *внешней характеристикой*, под которой понимают зависимость напряжения вторичной обмотки от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ или от коэффициента загрузки $U_2 = f(k_3)$, при постоянном номинальном первичном напряжении ($U_1 = U_{1н}$), номинальной частоте питающей сети ($f_1 = f_{1н}$) и неизменном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = \text{const}$).

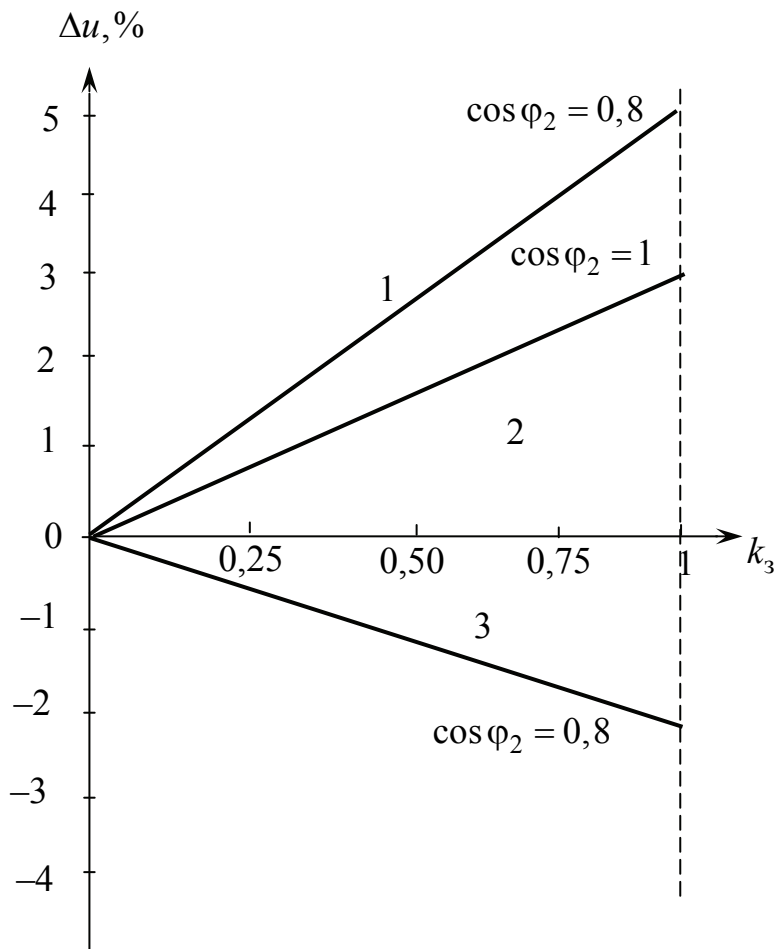


Рис. 5.5. Зависимость $\Delta u = f(k_3)$: 1 – активно-индуктивная нагрузка;
2 – активная нагрузка; 3 – активно-ёмкостная нагрузка

Внешнюю характеристику получают опытным или расчетным путем.

При опытном определении внешней характеристики возбуждают ненагруженный трансформатор до номинального напряжения первичной обмотки $U_1 = U_{1н}$. Измеряют напряжение вторичной обмотки при холостом ходе $U_2 = U_{20} = U_{2н}$ и фиксируют отсутствие тока во вторичной обмотке:

$I_2 = 0$. Затем постепенно нагружают трансформатор до номинальной нагрузки $I_2 = I_{2н}$ и снимают еще 3–4 точки внешней характеристики. Семейство внешних характеристик при различном характере нагрузки показано на рис. 5.6. Для расчета внешней характеристики реального трансформатора можно воспользоваться следующей формулой:

$$U_2 = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{k_3(u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2)}{100}\right), \quad (5.33)$$

где $U_{2н} = U_{20}$ – номинальное напряжение вторичной обмотки (при отсутствии нагрузки трансформатора); $u_{ка}$, $u_{кр}$ – составляющие напряжения короткого замыкания, определяемые по формулам (4.36), (4.38).

Для расчета внешней характеристики приведенного трансформатора формула (5.33) принимает вид

$$U'_2 = U'_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = U_{1н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = U_{1н} \cdot \left(1 - \frac{k_3(u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2)}{100}\right). \quad (5.34)$$

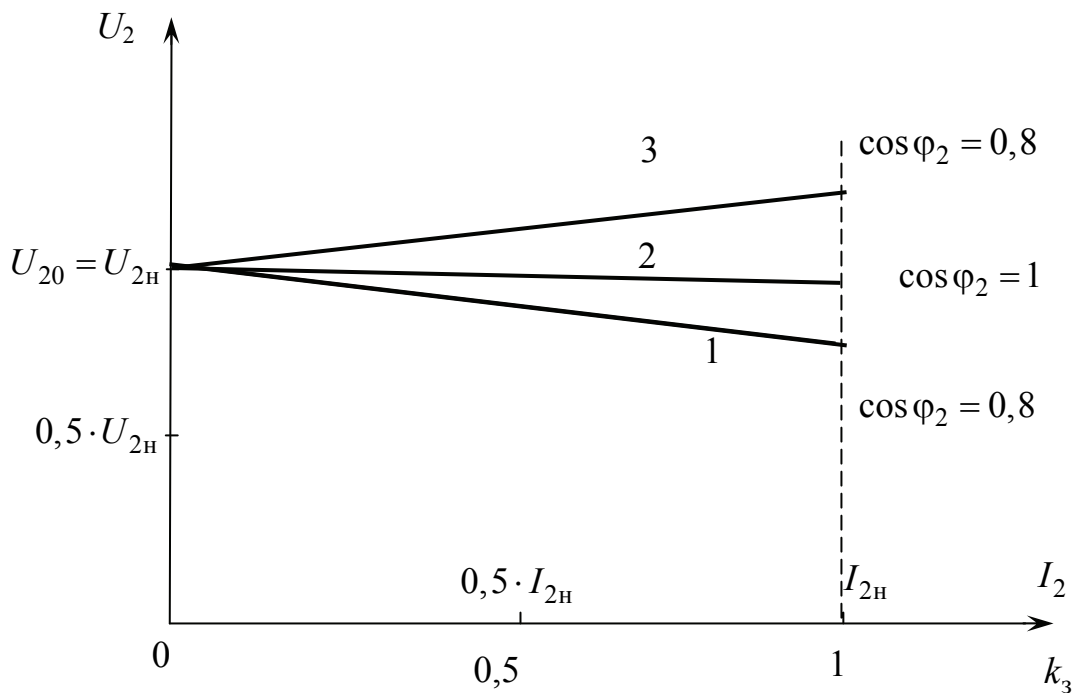


Рис. 5.6. Внешние характеристики трансформатора: 1 – активно-индуктивная нагрузка; 2 – активная нагрузка; 3 – активно-ёмкостная нагрузка

График зависимости $U_2 = f(I_2)$ имеет линейный характер. Из семейства внешних характеристик (рис. 5.6) видно, что чем выше $\cos \varphi_2$, тем меньше изменяется напряжение трансформатора при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки, тем характеристика «жестче». При активно-индуктивной нагрузке всегда напряжение $U_2 < U_{2н}$. При увеличении активно-ёмкостной нагрузки напряжение вторичной обмотки трансформатора возрастает: $U_2 > U_{2н}$, так как Δu изменяет знак $\Delta u < 0$ (в формуле (5.32) нечетная функция $\sin \varphi_2$ меняет знак).

5.4. Регулирование напряжения трансформатора

При работе трансформатора неизбежно изменение его вторичного напряжения из-за колебания нагрузок потребителей и падения напряжения в обмотках трансформатора. Поэтому возникает необходимость регулирования напряжения трансформатора посредством включения или отключения числа регулировочных витков в первичной или вторичной обмотке трансформатора. Для этой цели обмотка, в которой меняют число витков, выполняется с рядом ответвлений, которые переключаются с помощью переключающего устройства.

Ответвления обычно выполняют на той стороне, напряжение на которой в процессе эксплуатации подвергается изменениям. Обычно это сторона высшего напряжения. В обмотке высшего напряжения витков больше, поэтому регулирование можно провести с большей точностью. Кроме того, ток на стороне ВН меньше, и переключающее устройство получается более компактным.

Различают два способа переключения ответвлений для регулирования напряжения:

Переключение без возбуждения (переключающее устройство ПБВ) при отключенном от сети трансформаторе.

Регулирование под нагрузкой (переключающее устройство РПН) без отключения трансформатора от сети.

Трансформаторы с переключением числа витков в отключенном состоянии с ПБВ. В таких трансформаторах возможно ступенчатое регулирование напряжения относительно номинального на $\pm 5\%$ или $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$. В первом случае трансформатор имеет три, во втором случае пять ступеней регулирования.

Переключаемые участки обмотки обычно располагают в средней части по высоте обмотки в окне магнитопровода, чтобы распределение тока в обмотке по отношению к ярмам при работе на разных ответвлениях было по возможности симметричным. При этом магнитное поле рассеяния искажается мало и усилия, действующие на обмотку при коротких замыканиях минимальны.

Схемы регулировочных ответвлений в обмотке ВН при регулировании без возбуждения для одной фазы (фазы А) приведены на рис. 5.7. Согласно ГОСТу предусмотрены пять ответвлений на +5; +2,5; 0; -2,5; -5 % от номинального напряжения. Схему рис. 5.7, а применяют в многослойных обмотках при мощности трансформатора до 160 кВ·А.

В трансформаторах большей мощности при коротком замыкании возникают значительные динамические усилия, опасные для целостности обмоток, поэтому регулировочные витки многослойной обмотки ВН размещают в наружном слое обмотки симметрично относительно середины ее высоты, (симметрируют переключаемые витки по высоте обмотки – схема рис. 5.7, б). В непрерывной катушечной обмотке, соединенной по схеме «звезда», при напряжениях до 35 кВ регулировочные витки размещают в конце фазы по схеме рис. 5.7, в. Схему рис. 5.7, г с регулировочными витками в середине обмотки применяют для непрерывных катушечных обмоток на напряжение от 3 до 220 кВ. При соединении обмотки ВН в «треугольник» схему регулирования по рис. 5.7, в не применяют.

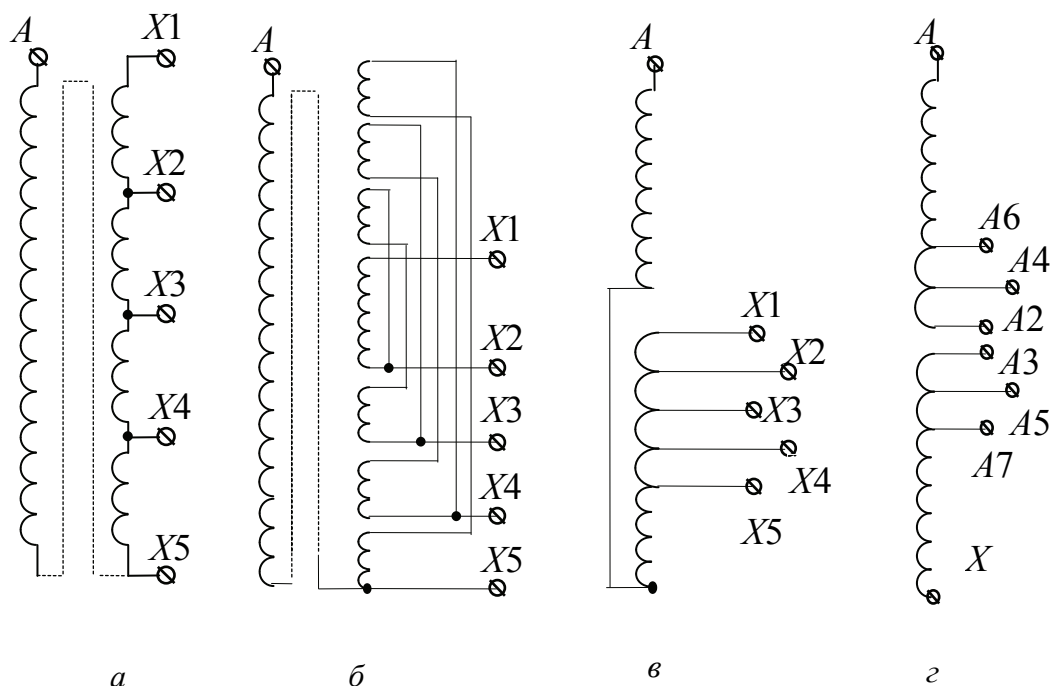


Рис. 5.7. Схемы регулировочных ответвлений в обмотке ВН при регулировании напряжения без возбуждения (ПБВ)

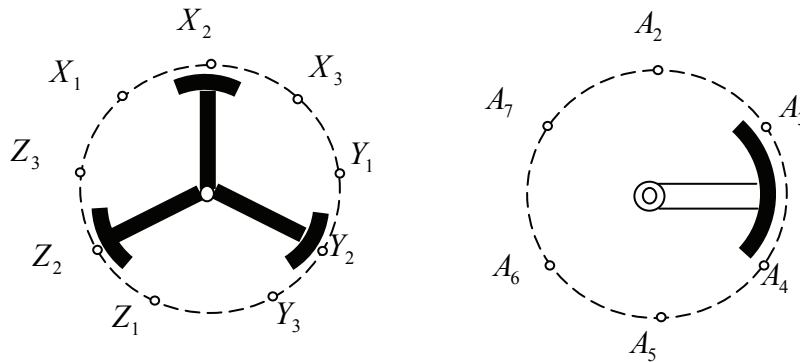


Рис. 5.8. Схемы переключателей для регулирования напряжения

В схемах 5.7, а, б регулировочные витки переключают с помощью трехфазного общего переключателя (рис. 5.8). А в схемах, изображенных на рис. 5.7, в, г, переключения осуществляют отдельным переключателем в каждой фазе (рис. 5.8).

Следует отметить, что устройства ПБВ применяются главным образом для коррекции напряжения сетевых понижающих трансформаторов в зависимости от уровня первичного напряжения на данном участке сети, а также при сезонных изменениях напряжения сети, связанных с сезонным изменением нагрузки.

Трансформаторы с переключением числа витков под напряжением с РПН. Трансформаторы с РПН рассчитаны для регулирования напряжения в пределах $\pm(6-10)\%$ через $(1,25-1,67)\%$. Переход с одной ступени регулирования на другую должен происходить без разрыва цепи тока, поэтому в промежуточном положении переключателя оказываются включенными два соседних ответвления обмотки, а значит, часть обмотки между ними окажется замкнута накоротко. Для ограничения тока короткого замыкания применяются токоограничивающие реакторы или активные сопротивления. Соответственно, переключающее устройство РПН значительно сложнее и дороже, чем ПБВ. Такие устройства применяют в мощных трансформаторах при необходимости частого или непрерывного регулирования напряжения.

На рис. 5.9 показаны схема переключения токоограничивающим реактором P и пять последовательных позиций при переходе с ответвления $X1$ (фрагмент а) на ответвление $X2$ (фрагмент д). В каждой из двух ветвей схемы переключения есть контактор ($K1$ и $K2$) для выключения тока из данной ветви перед её переключением и подвижные контакты переключателя ($П1$, $П2$), которые рассчитаны на переключение ветвей без тока.

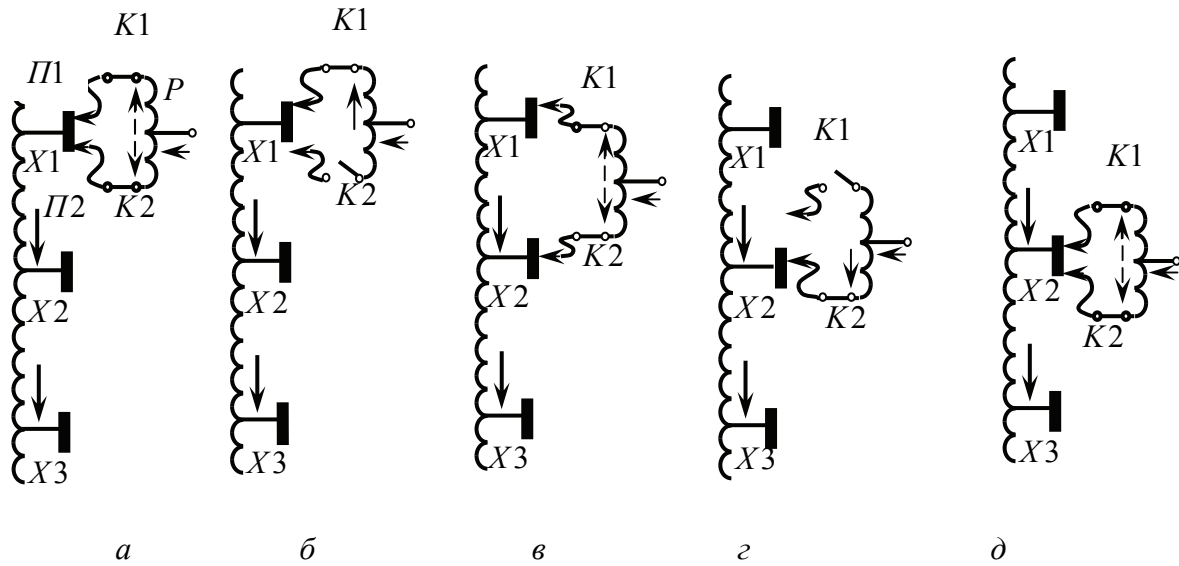


Рис. 5.9. Переключение ответвлений обмотки при регулировании напряжения под нагрузкой с использованием токоограничивающего реактора

В нормальном рабочем положении (рис. 5.9 а, д) токи двух ветвей схемы обтекают две половины обмотки реактора в разных направлениях. Поток в сердечнике реактора практически отсутствует, и индуктивное сопротивление реактора мало. Ток короткого замыкания ступени при промежуточном положении переключателя (рис. 5.9, в) обтекает всю обмотку реактора. Сердечник реактора намагничивается, и сопротивление реактора по отношению к этому току велико. Реактор P и переключатели Π размещают внутри бака трансформатора, а контакторы K в специальном дополнительном баке, который монтируется на боковой стенке бака трансформатора. При таком устройстве масло в баке трансформатора защищено от загрязнения, вызываемого работой контакторов при разрыве ими цепи тока.

В схеме РПН с применением активных токоограничивающих сопротивлений R_1 и R_2 (рис. 5.10) при положении выключателей, показанном на рисунке, трансформатор работает на ответвлении $X2$. При переходе на ответвление $X1$ сначала переключатель $\Pi 1$ переводится на $X1$, а затем переключатель Π размыкает контакты 3, 4 и замыкает контакты 1, 2. При этом цепь рабочего тока I не разрывается. Переключение контактов 3, 4 и 1, 2 происходит в течение долей секунды, и сопротивления R_1 и R_2 не успевают перегреться.

Следует отметить, что применение трансформаторов с РПН все более расширяется.

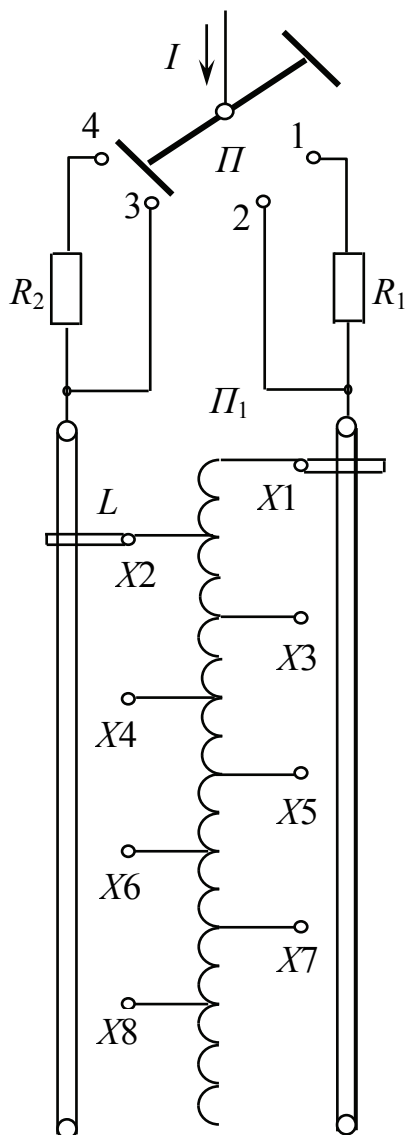


Рис. 5.10. Схема регулирования напряжения под нагрузкой с использованием активных токоограничивающих сопротивлений

Рассмотренные в главе энергетические диаграммы активной и реактивной мощности трансформатора, а также потери мощности в трансформаторе позволяют рассчитать коэффициент полезного действия через полную мощность трансформатора, постоянные и переменные потери мощности так, как регламентирует ГОСТ. Изменение вторичного напряжения трансформатора в зависимости от величины и характера нагрузки определяет вид внешней характеристики трансформатора при различных нагрузках. Для стабилизации выходного напряжения применяют различные способы регулирования напряжения трансформатора.

6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

6.1. Условия параллельной работы трансформаторов

При передаче электроэнергии в энергосистеме вместо одного трансформатора большой мощности целесообразно иметь не один, а несколько трансформаторов, включенных параллельно на общую нагрузку. Такое дробление трансформаторной мощности позволяет лучше решать проблему энергоснабжения потребителей, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, обеспечивать резервирование мощности при авариях и проведении профилактических ремонтов.

При эксплуатации параллельно включенных трансформаторов важно, чтобы нагрузка между ними распределялась пропорционально их номинальным мощностям. Схема включения на параллельную работу двух однофазных трансформаторов и их упрощенная схема замещения показаны на рис. 6.1.

Как видно из схемы замещения, по сопротивлению нагрузки z_H протекает ток нагрузки, равный сумме токов первого \dot{I}_I и второго \dot{I}_{II} трансформаторов: $\dot{I} = \dot{I}_I + \dot{I}_{II}$. Соответственно, полная мощность, отдаваемая параллельно работающими трансформаторами в нагрузку,

$$S = S_I + S_{II}. \quad (6.1)$$

Здесь S_I — полная мощность первого трансформатора; S_{II} — полная мощность второго трансформатора.

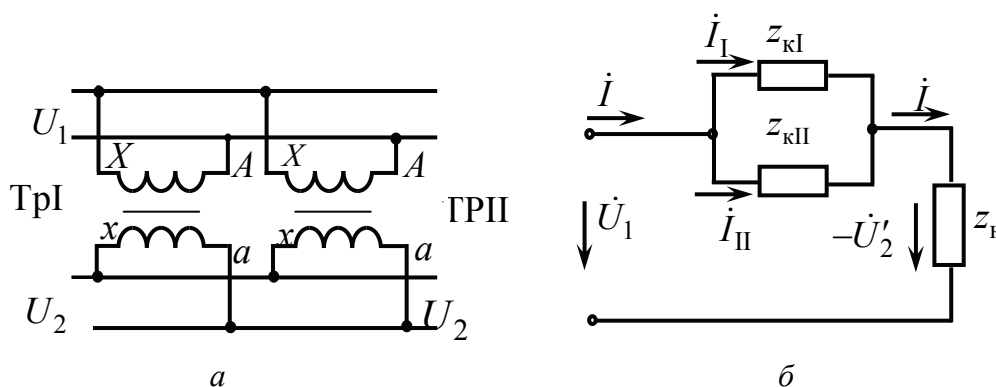


Рис. 6.1. Схема включения на параллельную работу однофазных трансформаторов (а) и их схема замещения (б)

Для включения трансформаторов ТрI и ТрII на параллельную работу необходимо, чтобы в режиме холостого хода в их обмотках не возникали уравнильные токи, а при нагрузке ни один из трансформаторов не перегружался.

Уравнильные токи, протекая между обмотками параллельно работающих трансформаторов, вызывают циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому и неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь мощности и нагрева:

$$\dot{I}_{\text{ур}} = \frac{\dot{E}_{20\text{I}} - \dot{E}_{20\text{II}}}{\dot{Z}_{\text{кI}} + \dot{Z}_{\text{кII}}}, \quad (6.2)$$

где $\dot{E}_{20\text{I}}$ и $\dot{E}_{20\text{II}}$ – ЭДС вторичных обмоток трансформаторов в режиме холостого хода (вторичные напряжения при холостом ходе).

Из формулы (6.2) следует, что уравнильный ток отсутствует ($\dot{I}_{\text{ур}} = 0$), если разность ЭДС вторичных обмоток ненагруженных трансформаторов, равна нулю:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20\text{I}} - \dot{E}_{20\text{II}} = 0. \quad (6.3)$$

Равенство (6.3) выполнимо, если ЭДС вторичных обмоток трансформатора одинаковы по величине и совпадают по фазе, т. е. имеют одинаковое количество витков и принадлежат к одной группе соединения обмоток.

Для n параллельно работающих трехфазных трансформаторов, имеющих различные номинальные мощности $S_{\text{нI}}$; $S_{\text{нII}}$; $S_{\text{нn}}$, на рис. 6.2 показана однолинейная схема их включения. Как видно на рис. 6.2, идеальные условия соответствуют полному использованию каждого трансформатора.

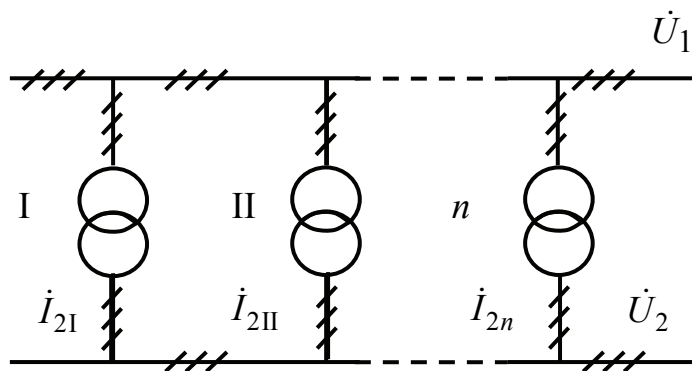


Рис. 6.2. Параллельная работа трехфазных трансформаторов

Параллельную работу n трансформаторов принято считать идеальной, если возможно осуществить режим максимальной нагрузки так, чтобы ее полная мощность S_{\max} была равна сумме номинальных мощностей всех трансформаторов:

$$S_{\max} = S_{\text{нI}} + S_{\text{нII}} + \dots S_{\text{нn}}. \quad (6.4)$$

Равенство (6.4) выполнимо, если дополнительно соблюдены следующие условия:

1. Ток нагрузки I равен арифметической сумме вторичных токов параллельно работающих трансформаторов $\dot{I}_{2\text{I}}, \dot{I}_{2\text{II}}, \dots, \dot{I}_{2n}$ (все вторичные токи совпадают по фазе).

2. При увеличении нагрузки каждый трансформатор нагружается пропорционально своей номинальной мощности.

На схеме замещения (рис. 6.1, б) видно, что токи $\dot{I}_{2\text{I}}, \dot{I}_{2\text{II}}, \dots, \dot{I}_{2n}$ будут совпадать по фазе, если аргументы сопротивлений короткого замыкания $\dot{z}_{\text{кI}}, \dot{z}_{\text{кII}}, \dots, \dot{z}_{\text{кn}}$ будут одинаковыми. При нагрузке каждый трансформатор нагружается пропорционально своей номинальной мощности, если относительные значения сопротивлений $\dot{z}_{\text{кI}}, \dot{z}_{\text{кII}}, \dots, \dot{z}_{\text{кn}}$ (или напряжения короткого замыкания $u_{\text{кI}}, u_{\text{кII}}, \dots, u_{\text{кn}}$) одинаковы.

Таким образом, *идеальные условия параллельной работы трансформаторов* можно сформулировать в следующем виде:

1. *Трансформаторы должны обладать одинаковыми коэффициентами трансформации.*

На практике допускается параллельная работа трансформаторов с различием в коэффициентах трансформации не более 0,5–1 %. При этом разность вторичных ЭДС $\Delta \dot{E} \approx 0$. При больших различиях в коэффициентах трансформации в обмотках трансформаторов циркулируют значительные уравнивающие токи.

2. *Трансформаторы должны иметь одну группу соединения обмоток.*

Применение трансформаторов разных групп при параллельной работе не допустимо, так как даже небольшой фазовый сдвиг между вторичными ЭДС приведет к появлению уравнивающих токов в обмотках, превышающих в несколько раз номинальное значение тока.

3. *Напряжения короткого замыкания и их составляющие должны быть одинаковыми.*

Если при параллельной работе используют трансформаторы с разными напряжениями короткого замыкания $u_{\text{к}}$, т. е. с разными сопротивлениями $z_{\text{к}}$, то перегружается трансформатор с меньшим напряжением короткого замыкания. Остальные трансформаторы остаются недогруженными.

Для равенства составляющих напряжений короткого замыкания не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с различием номинальных мощностей более чем в три раза.

На практике *идеальные условия параллельной работы трансформаторов* выполнить удастся не всегда. Выясним, в какой мере ухудшается использование трансформаторов *при несоблюдении* идеальных условий.

6.2. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации

Пусть на параллельную работу включены два трансформатора (рис. 6.1) с одинаковыми группами соединений обмоток, одинаковыми напряжениями короткого замыкания $u_{кI} = u_{кII}$ и различными коэффициентами трансформации $k_I < k_{II}$. Следовательно, $\dot{E}_{20I} > \dot{E}_{20II}$. В этом случае в замкнутом контуре вторичных обмоток трансформаторов появится разность этих ЭДС: $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II} \neq 0$.

Даже на холостом ходу под действием $\Delta \dot{E}$ в обмотках ненагруженных трансформаторов будут протекать уравнивающие токи $\dot{I}_{ур}$ (рис. 6.3),

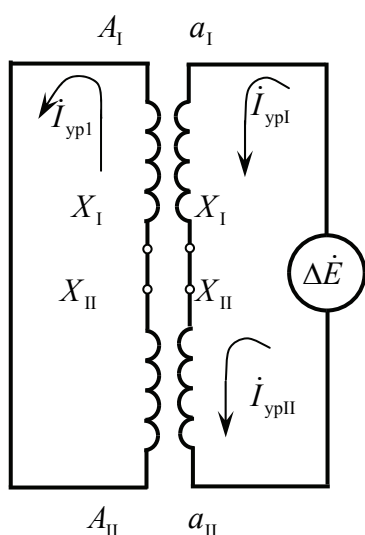


Рис. 6.3. Схема протекания уравнивающих токов в обмотках параллельно работающих трансформаторов

определяемые равенством (6.2). Из схемы протекания уравнивающих токов (рис. 6.3) видно, что уравнивающий ток во вторичных обмотках трансформаторов имеет различные направления. Во вторичной обмотке трансформатора TrI $\dot{I}_{урI}$ протекает от начала обмотки к концу (трансформатор потребляет уравнивающий ток), а во вторичной обмотке трансформатора TrII $\dot{I}_{урII}$ протекает от конца к началу (трансформатор отдает уравнивающий ток). Падения напряжения, вызываемые уравнивающими токами, выравнивают вторичные напряжения обмоток трансформатора (рис. 6.4), понижая его на первом и повышая на втором трансформаторе. В результате устанавливается некоторое напряжение $\dot{E}_{20I} > \dot{U}_2 > \dot{E}_{20II}$.

При включении нагрузки z_n результирующие токи нагрузки первого \dot{I}_I и второго \dot{I}_{II} трансформаторов изменяются на величину уравнивающего тока. Для рассматриваемых трансформаторов ток \dot{I}_{II} уменьшится, а \dot{I}_I увеличится (рис. 6.4). Нагрузка трансформаторов окажется неравномерной.

Рассмотрим, в какой степени ухудшается работа трансформаторов при их параллельном включении и несоблюдении равенств коэффициентов трансформации. Для упрощенной схемы замещения (рис. 6.1)

$$-\dot{U}_2 = k_I \cdot \dot{U}_1 - \dot{z}_{кI} \cdot \dot{I}_I \quad (6.5)$$

или

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \cdot \dot{U}_1 - \dot{z}_{кII} \cdot \dot{I}_{II}, \quad (6.6)$$

где $z_{кI}$, $z_{кII}$ – сопротивления короткого замыкания со стороны вторичных обмоток; $k_I = \frac{W_{II}}{W_{2I}}$ и $k_{II} = \frac{W_{I}}{W_{2II}}$ – коэффициенты трансформации.

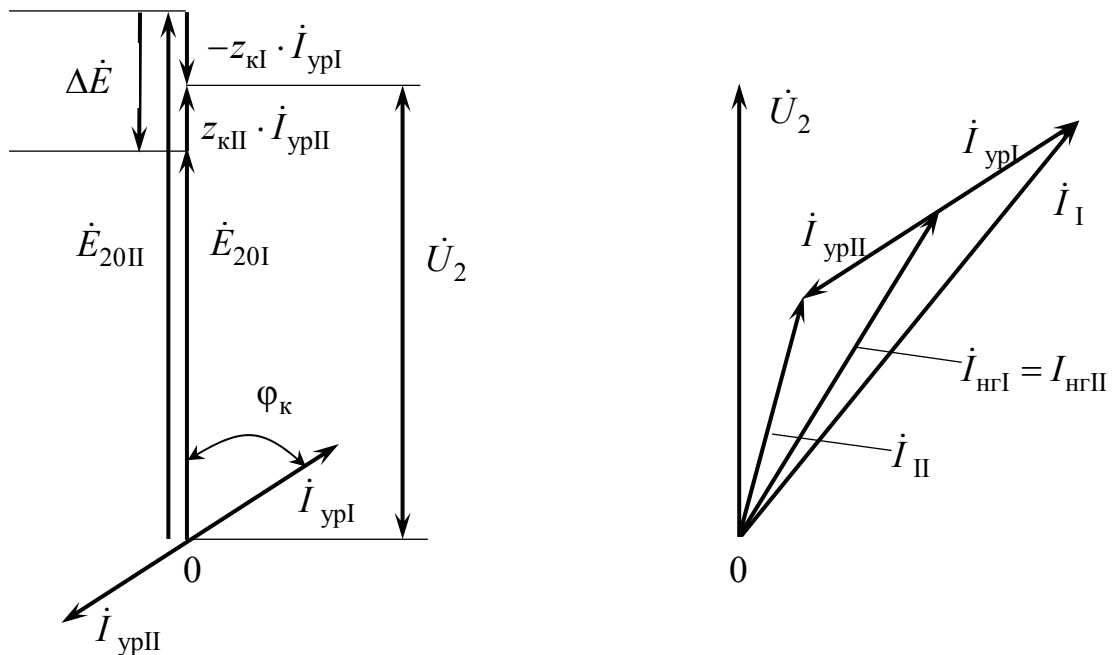


Рис. 6.4. Уравнивающие токи при неравенстве коэффициентов трансформации

Учитывая, что ток нагрузки $\dot{I} = \dot{I}_I + \dot{I}_{II}$, ток вторичной обмотки первого трансформатора $\dot{I}_I = \dot{I} - \dot{I}_{II}$, ток вторичной обмотки второго трансформатора $\dot{I}_{II} = \dot{I} - \dot{I}_I$, запишем (6.5) и (6.6) в следующем виде:

$$-\dot{U}_2 = k_I \cdot \dot{U}_1 + \dot{z}_{кI} \cdot \dot{I}_{II} - \dot{z}_{кI} \cdot \dot{I}, \quad (6.7)$$

$$-\dot{U}_2 = k_{II} \cdot \dot{U}_1 + \dot{z}_{кII} \cdot \dot{I}_I - \dot{z}_{кII} \cdot \dot{I}. \quad (6.8)$$

Решая совместно (6.5) и (6.8) относительно \dot{I}_I , а (6.6) и (6.7) относительно \dot{I}_{II} , получим выражения токов вторичных обмоток трансформатора трансформаторов, учитывающие уравнительный ток:

$$\dot{I}_I = \frac{(k_I - k_{II}) \cdot \dot{U}_1}{\dot{z}_{кI} + \dot{z}_{кII}} + \dot{I} \frac{\dot{z}_{кII}}{\dot{z}_{кI} + \dot{z}_{кII}} = \dot{I}_{yp} + \dot{I}_{нгI}, \quad (6.9)$$

$$\dot{I}_{II} = -\frac{(k_{II} - k_I) \cdot \dot{U}_1}{\dot{z}_{кI} + \dot{z}_{кII}} + \dot{I} \frac{\dot{z}_{кI}}{\dot{z}_{кI} + \dot{z}_{кII}} = -\dot{I}_y + \dot{I}_{нгII}. \quad (6.10)$$

Из формул (6.9), (6.10) следует, что ток каждого трансформатора состоит из уравнительного тока \dot{I}_{yp} (первые слагаемые), обусловленного различием коэффициентов трансформации $k_I \neq k_{II}$, и части тока нагрузки $\dot{I}_{нг}$, определяемого сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов $\dot{z}_{кI}$ и $\dot{z}_{кII}$ (вторые слагаемые). Уравнительные токи протекают по обмоткам трансформатора и при токе нагрузки $\dot{I} = 0$ (режим холостого хода).

При $k_I = k_{II}$ уравнительный ток равен нулю, а ток нагрузки распределяется обратно пропорционально сопротивлениям (напряжениям) короткого замыкания.

В качестве примера допустим, что параллельно работают два трансформатора одинаковой мощности и одинаковыми напряжениями короткого замыкания $u_{кI} = u_{кII} = 5,5 \%$, а их коэффициенты трансформации k_I и k_{II} отличаются на 5 %. Тогда $\Delta E = 0,05 \cdot U_n$. Учитывая, что в относительных

единицах $u_k = z_k$, согласно формуле (6.2) в обмотках трансформатора протекает уравнивающий ток:

$$I_{\text{ур}} = \frac{E_{20I} - E_{20II}}{z_{kI} + z_{kII}} = \frac{\Delta E}{z_{kI} + z_{kII}} = \frac{0,05}{0,055 + 0,055} \cdot I_H = 0,45 \cdot I_H$$

или 45 % от номинального тока, т. е. уравнивающий ток при нагрузке увеличит ток в обмотках трансформатора на 45 %.

Согласно ГОСТу в общем случае допускается отличие коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов на 0,5 %, а для трансформаторов с $k > 3$ и трансформаторов, используемых для собственных нужд электростанций, – на 1 %.

6.3. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми группами соединения обмоток

Пусть на параллельную работу включены два трансформатора с одинаковыми коэффициентами трансформации $k_I = k_{II}$, одинаковыми напряжениями короткого замыкания $u_{kI} = u_{kII} = 5,5\%$ и различными группами соединения обмоток, например, 0 и 6 (рис. 6.5, а). Тогда вторичные ЭДС \dot{E}_{20I} и \dot{E}_{20II} , соответствующих фаз трансформаторов равны по величине, но сдвинуты по фазе на 180° . В замкнутом контуре вторичных обмоток разность этих ЭДС равна двойному номинальному напряжению вторичных обмоток:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - (-\dot{E}_{20II}) = 2 \cdot \dot{E}_{20I}.$$

Учитывая, что в относительных единицах $u_k = z_k$, а номинальное напряжение ненагруженных трансформаторов в относительных единицах $U_2 = E_{20I} = E_{20II} = 1$, согласно формуле (6.3) в обмотках трансформатора даже на холостом ходу протекает уравнивающий ток, примерно равный току установившегося короткого замыкания:

$$\dot{I}_{\text{ур}} = \frac{\Delta \dot{E}}{\dot{z}_{kI} + \dot{z}_{kII}} = \frac{2}{0,055 + 0,055} \cdot I_H = 18,18 \cdot I_H \approx I_{\text{куст}}.$$

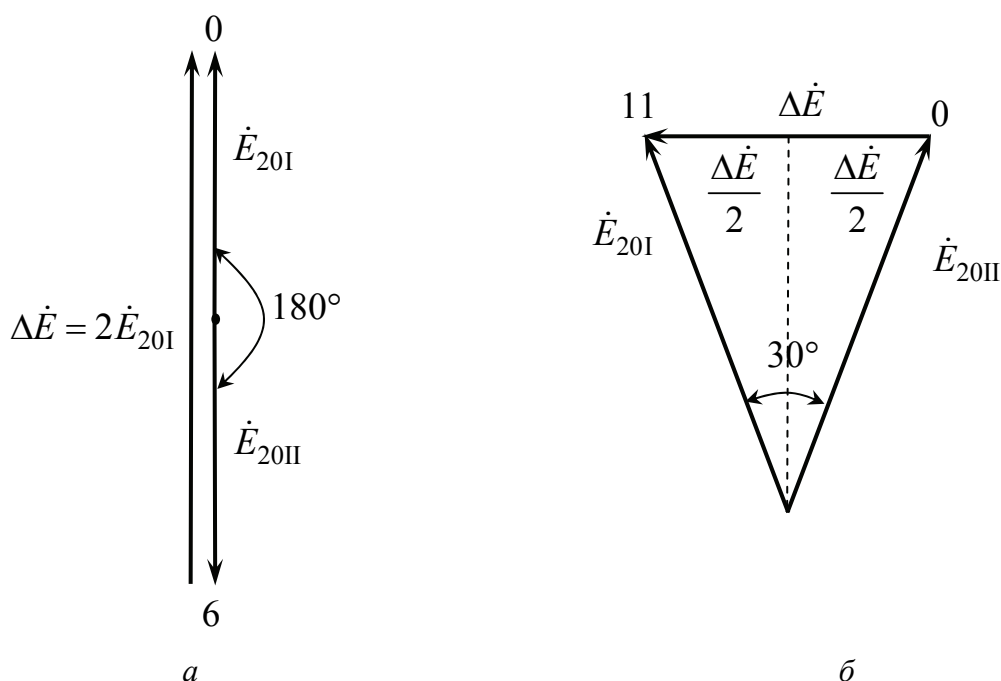


Рис. 6.5. Векторные диаграммы напряжений при параллельной работе трансформаторов: *а* – с группами соединения обмоток 0 и 6; *б* – с группами соединения обмоток 11 и 0

Наименьшее значение уравнивающего тока, протекающего по обмоткам параллельно работающих трансформаторов, имеет место, если группа трансформаторов отличается на единицу, например, 11 и 0 (рис. 6.5, *б*). Вторичные ЭДС \dot{E}_{20I} и \dot{E}_{20II} соответствующих фаз трансформаторов равны по величине, но сдвинуты по фазе на 30° . В замкнутом контуре вторичных обмоток разность этих ЭДС

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}$$

не равна 0. Действующее значение этой разности, как следует из векторной диаграммы (рис. 6.5, *б*),

$$\Delta E = 2 \cdot E_{20I} \sin 15^\circ = 0,518 \cdot E_{20I}.$$

На холостом ходу по вторичным обмоткам трансформаторов протекает уравнивающий ток

$$\dot{I}_{\text{ур}} = \frac{\Delta \dot{E}}{\dot{z}_{\text{кI}} + \dot{z}_{\text{кII}}} = \frac{0,518}{0,055 + 0,055} \cdot I_{\text{н}} = 4,7 \cdot I_{\text{н}},$$

равный примерно пятикратному номинальному значению вторичного тока.

Таким образом, *параллельное включение трансформаторов различных групп соединения обмоток недопустимо.*

Этот вывод касается трансформаторов, один из которых принадлежит к четным группам соединения обмоток, а другой – к нечетным. Если оба трансформатора принадлежат к четной или нечетной группе, то практически всегда можно перемаркировкой концов фазных обмоток привести их к одной группе.

6.4. Параллельная работа трансформаторов с различными напряжениями короткого замыкания

Рассмотрим параллельную работу трех трансформаторов с одинаковыми коэффициентами трансформации $k_I = k_{II}$, одинаковыми группами соединения обмоток. Получаемые при этом результаты легко можно распространить на любое число параллельно работающих n трансформаторов. Пренебрегая намагничивающими токами и используя упрощенную схему замещения, представим схему параллельной работы трех трансформаторов в виде, изображенном на рис. 6.6.

У всех трех трансформаторов падения напряжения одинаковые и равны

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2 = \dot{Z} \cdot \dot{I}, \quad (6.11)$$

где $\dot{I} = \dot{I}_I + \dot{I}_{II} + \dot{I}_{III}$ – полный ток нагрузки; \dot{Z} – суммарное сопротивление обмоток трансформаторов,

$$\dot{Z} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{z}_{kI}} + \frac{1}{\dot{z}_{kII}} + \frac{1}{\dot{z}_{kIII}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{\dot{z}_{kn}}}. \quad (6.12)$$

Токи отдельных трансформаторов равны:

$$\dot{I}_I = \frac{\Delta \dot{U}}{\dot{z}_{kI}} = \frac{\dot{Z} \cdot \dot{I}}{\dot{z}_{kI}} = \frac{I}{\dot{z}_{kI} \cdot \sum_n \frac{1}{\dot{z}_{kn}}}; \quad \dot{I}_{II} = \frac{I}{\dot{z}_{kII} \cdot \sum_n \frac{1}{\dot{z}_{kn}}}; \quad \dot{I}_{III} = \frac{I}{\dot{z}_{kIII} \cdot \sum_n \frac{1}{\dot{z}_{kn}}}. \quad (6.13)$$

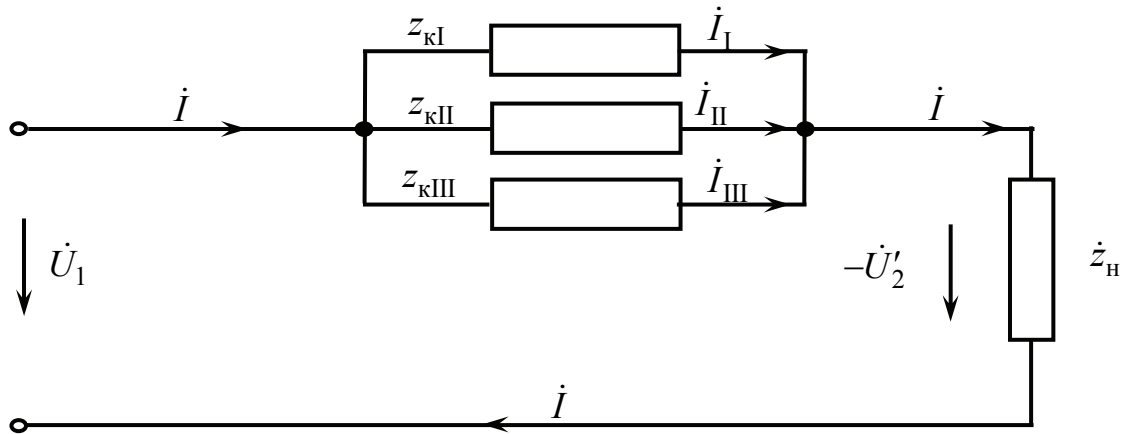


Рис. 6.6. Упрощенная схема параллельной работы трансформаторов с одинаковыми группами соединений и коэффициентами трансформации, при разных u_k

В общем случае эти токи не совпадают по фазе, так как аргументы $\varphi_{кI}, \varphi_{кII}, \varphi_{кIII}$ комплексных сопротивлений короткого замыкания могут быть неравными. Однако в обычных условиях сдвиги токов по фазе незначительны, и арифметическая сумма полных мощностей трансформаторов с большой точностью равна полной мощности нагрузки:

$$S = S_I + S_{II} + S_{III}. \quad (6.14)$$

Поэтому комплексные величины в выражениях (6.12), (6.16) можно заменить их модулями.

Согласно определению напряжения короткого замыкания, для первого трансформатора сопротивление короткого замыкания (напряжение короткого замыкания) в относительных единицах

$$z_{кI*} = u_{кI*} = \frac{z_{кI} \cdot I_{HI}}{U_H}, \quad (6.15)$$

откуда получим

$$z_{кI} = \frac{z_{кI*} \cdot U_H}{I_{HI}} = \frac{u_{кI\%}}{100} \cdot \frac{U_H}{I_{HI}}. \quad (6.16)$$

Выражения для $z_{кII}$ и $z_{кIII}$ аналогичны (6.16).

Подставим (6.16) в (6.13) и заменим токи на пропорциональные им полные мощности, умножив левую и правую части (6.13) на $m \cdot U_H$:

$$m \cdot U_H \cdot \dot{I}_I = \frac{m \cdot U_H \cdot I}{\frac{u_{KI\%}}{100} \cdot \frac{U_H}{I_H} \cdot \frac{m}{m} \cdot \sum_n \frac{100 \cdot I_{Hn}}{u_{Kn\%} U_H}}$$

или

$$S_I = \frac{S}{\frac{u_{KI\%}}{S_{HI}} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} . \quad (6.17)$$

Аналогично определяются полные мощности второго и третьего трансформаторов:

$$S_{II} = \frac{S}{\frac{u_{KII\%}}{S_{HII}} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} , \quad (6.18)$$

$$S_{III} = \frac{S}{\frac{u_{KIII\%}}{S_{HIII}} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} . \quad (6.19)$$

В относительных единицах выражения (6.17)–(6.19) принимают вид

$$S_{I*} = \frac{S_I}{S_{HI}} = \frac{S}{u_{KI\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} ; \quad (6.20)$$

$$S_{II*} = \frac{S_{II}}{S_{HII}} = \frac{S}{u_{KII\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} ; \quad (6.21)$$

$$S_{III*} = \frac{S_{III}}{S_{HIII}} = \frac{S}{u_{KIII\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}} . \quad (6.22)$$

Из равенств (6.20)–(6.22) следует, что относительные нагрузки параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания:

$$S_{I*} : S_{II*} : S_{III*} = \frac{1}{u_{кI\%}} : \frac{1}{u_{кII\%}} : \frac{1}{u_{кIII\%}}. \quad (6.23)$$

Если напряжения короткого замыкания одинаковы: $u_{кI\%} = u_{кII\%} = u_{кIII\%}$, то $S_{I*} = S_{II*} = S_{III*}$, т. е. трансформаторы нагружаются равномерно и при увеличении нагрузки достигают номинальных мощностей одновременно. Если же $u_{к\%}$ не равны, то при повышении нагрузки номинальной мощности прежде всего достигнет трансформатор с наименьшим $u_{к\%}$. Другие трансформаторы при этом будут еще недогружены, но в то же время дальнейшее увеличение общей нагрузки недопустимо, так как первый трансформатор будет перегружаться. Установленная мощность трансформаторов останется недоиспользованной. Рекомендуется включать на параллельную работу такие трансформаторы, для каждого из которых значения $u_{к\%}$ отличаются от арифметического среднего значения $u_{к\%}$ всех этих трансформаторов не более чем на $\pm 10\%$ и отношение номинальных мощностей которых находится в пределах 3:1.

Рассмотрим в качестве примера параллельную работу трех трансформаторов с одинаковыми коэффициентами и группами соединений обмоток.

Номинальные мощности и напряжения короткого замыкания трансформаторов:

$$S_{HI} = 180 \text{ кВ}\cdot\text{А}, \quad S_{HII} = 240 \text{ кВ}\cdot\text{А}, \quad S_{HIII} = 320 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$u_{кI\%} = 5,4\%, \quad u_{кII\%} = 6,0\%, \quad u_{кIII\%} = 6,6\%.$$

Определим нагрузку каждого из трансформаторов для случая, когда *общая нагрузка равна сумме их номинальных мощностей*.

Мощность нагрузки, кВ·А,

$$S = S_I + S_{II} + S_{III}; \quad S = 180 + 240 + 320 = 740.$$

Сумма мощности по выражениям (6.20)–(6.22)

$$\sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{кH\%}} = \frac{180}{5,4} + \frac{240}{6} + \frac{320}{6,6} = 121,8.$$

Полные мощности трансформаторов в относительных единицах находим по формулам

$$S_{I*} = \frac{S}{u_{KI\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}}, \quad S_{I*} = \frac{740}{5,4 \cdot 121,8} = 1,125;$$

$$S_{II*} = \frac{S}{u_{KII\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}}, \quad S_{II*} = \frac{740}{6 \cdot 121,8} = 1,01;$$

$$S_{III*} = \frac{S}{u_{KIII\%} \cdot \sum_n \frac{S_{Hn}}{u_{Kn\%}}}, \quad S_{III*} = \frac{740}{6,6 \cdot 121,8} = 0,92.$$

Полные мощности трансформаторов в именованных единицах, кВ·А,

$$S_I = 1,125 \cdot 180 = 202,5;$$

$$S_{II} = 1,01 \cdot 240 = 243;$$

$$S_{III} = 0,92 \cdot 320 = 294,4.$$

Таким образом, трансформатор I перегружен на 12,5 %, трансформатор II перегружен на 1 %, а трансформатор III недогружен на 8 %. Для устранения перегрузки первого трансформатора необходимо уменьшить нагрузку всей подстанции до $740:1,125 = 657$ кВ·А или на 83 кВ·А, т. е. 83 кВ·А установленной мощности остаются недоиспользованными.

Сформулированные в главе условия параллельной работы трансформаторов и последствия несоблюдения этих условий показывают возможность и экономичность работы трансформаторов параллельно с сетью. Для каждого случая определена величина уравнивающего тока в режиме холостого хода параллельно работающих трансформаторов и дана оценка возможности параллельной работы трансформаторов при различной величине уравнивающего тока.

7. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

7.1. Основные допущения и применение метода симметричных составляющих

При эксплуатации трехфазных трансформаторов нередко случаи неравномерного распределения токов по фазам из-за неравномерного распределения мощных однофазных приемников нагрузки или вследствие аварийных режимов при однофазных и двухфазных коротких замыканиях. Возникающая при этом несимметрия вторичных напряжений трансформатора весьма неблагоприятно отражается на потребителях: при питании несимметричным напряжением у двигателей переменного тока снижается допустимая мощность, резко уменьшается срок службы ламп накаливания при питании от возможного повышенного напряжения, а при питании пониженным напряжением уменьшается сила света. Несимметричная нагрузка вызывает перегрузку отдельных фаз трансформатора или чрезмерное повышение фазных напряжений и насыщение магнитопровода. Поэтому исследование процессов, возникающих в трансформаторе при несимметричных нагрузках, имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определить допустимые нагрузки, обеспечивающие работоспособность как потребителя, так и самого трансформатора. Цель исследования – определить при известных сопротивлениях нагрузки, фазные токи и напряжения на обеих сторонах трансформатора. Для исследования подобных режимов применяют метод симметричных составляющих.

Согласно этому методу, несимметричная многофазная система токов и напряжений представляется в виде совокупности m симметричных систем, где m – число фаз.

Так, трехфазная система несимметричных токов I_a, I_b, I_c эквивалентна трем симметричным системам, отличающимся последовательностью прохождения токов через максимумы (системы токов прямой, обратной и нулевой последовательности):

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}, \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2}, \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c0} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2},\end{aligned}\tag{7.1}$$

где индексами 0, 1 и 2 обозначены, соответственно, токи нулевой, прямой и обратной последовательностей.

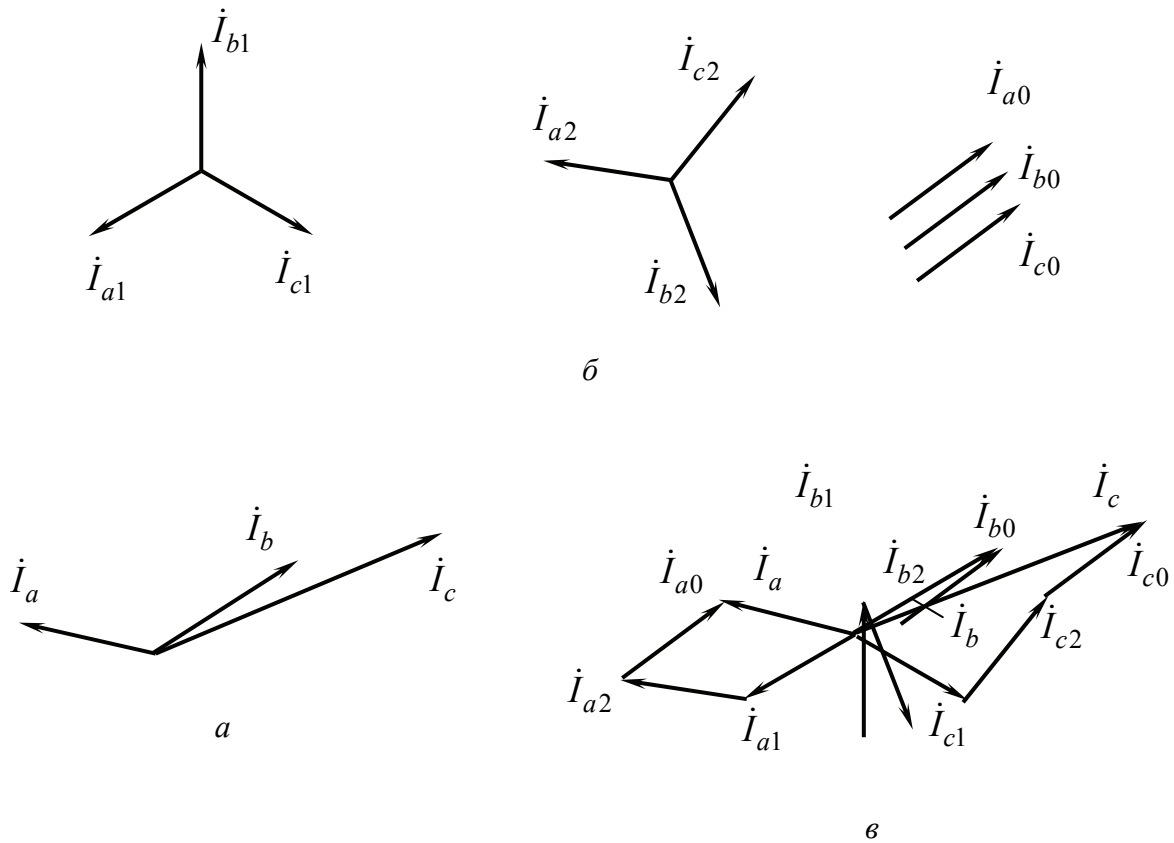


Рис. 7.1. Разложение несимметричной системы токов (а) на симметричные составляющие (б) и их сложение (в)

Как известно, симметричные токи, образующие систему прямой последовательности, достигают максимумов, соответственно, в фазах a , b , c ; порядок прохождения через максимумы токов обратной последовательности – a , c , b ; токи нулевой последовательности во всех трех фазах совпадают по фазе (рис. 7.1, б). Графически метод разложения показан на рис. 7.1, а, в.

Для фазных токов, обозначив для краткости $i_{a0} = i_0$, $i_{a1} = i_1$, $i_{a2} = i_2$, запишем

$$i_a = i_0 + i_1 + i_2; \quad (7.2)$$

$$i_b = i_0 + a^2 i_1 + a i_2; \quad (7.3)$$

$$i_c = i_0 + a i_1 + a^2 i_2, \quad (7.4)$$

где вектор поворота $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ и $a + a^2 + 1 = 0$.

По формулам (7.2)–(7.4) токи различных последовательностей могут быть выражены через несимметричные токи в виде

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c); \quad (7.5)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c); \quad (7.6)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c); \quad (7.7)$$

Подобные же соотношения связывают несимметричные фазные напряжения U_a, U_b, U_c :

$$\dot{U}_a = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \quad (7.8)$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_0 + a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2; \quad (7.9)$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_0 + a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 \quad (7.10)$$

и их симметричные составляющие U_0, U_1, U_2 :

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c); \quad (7.11)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c); \quad (7.12)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c). \quad (7.13)$$

Применение метода симметричных составляющих, как известно, основано на принципе наложения. Тем самым предполагается, что для всех участков магнитной цепи трансформатора $\mu = \text{const}$, чем и обусловлена возможность его применения.

При анализе несимметричных режимов будем полагать, что сам трансформатор устроен симметрично, т. е. все три фазы одинаковы в магнитном и электрическом отношениях. Некоторая несимметрия, проявляю-

щаяся на холостом ходу и вызванная неодинаковым взаимным расположением фаз, не имеет практического значения. В обозначении приведенных величин вторичной обмотки трансформатора опустим применявшийся ранее штрих над символом, анализируя, как и прежде, приведенный трансформатор. Это допущение позволяет пользоваться простыми соотношениями между первичным и вторичным токами. Если эти токи не содержат нулевой последовательности, то

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \quad (7.14)$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (7.15)$$

Будем считать, что ток намагничивания (ток холостого хода) равен нулю, тогда полные токи первичной и вторичной обмоток фазы равны, следовательно,

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a, \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_b, \quad \dot{I}_C = -\dot{I}_c. \quad (7.16)$$

Выражения (7.16) справедливы для любой последовательности токов (или фазных напряжений), в том числе тогда, когда присутствуют токи нулевой последовательности в первичной и вторичной обмотках:

$$\dot{I}_{A0} = -\dot{I}_{a0}, \quad \dot{I}_{B0} = -\dot{I}_{b0}, \quad \dot{I}_{C0} = -\dot{I}_{c0}. \quad (7.17)$$

Следует иметь в виду, что нулевая последовательность тока появляется в цепи только при совместном наличии двух факторов: напряжения или индуцированной ЭДС нулевой последовательности; конфигурации цепи, допускающей протекание токов нулевой последовательности (замкнутый треугольник или звезда с нейтральным проводом). Индуцируемая ЭДС нулевой последовательности возникает в первичной или во вторичной обмотках, если по этим обмоткам (по одной из них или по обеим) протекает ток нулевой последовательности, обуславливающий в сердечнике магнитный поток нулевой последовательности. Сопротивления нулевой последовательности отличаются от сопротивлений прямой и обратной последовательностей отсутствием сдвига фаз токов нулевой последовательности. Сопротивления нулевой последовательности зависят от схемы соединения обмоток и конструкции магнитной системы трансформатора.

В отличие от вращающихся машин в трансформаторе сопротивления прямой и обратной последовательностей равны. Действительно, если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, изменить

порядок чередования фаз (поменять местами два подводящих провода), то изменится на обратное и чередование токов фаз трансформатора, но внутренние сопротивления останутся неизменными. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из вторичной обмотки в первичную так же, как и токи прямой последовательности, и имеют одни и те же схемы замещения, применяемые в симметричных режимах. По этой причине часто при анализе и расчетах несимметричных режимов рассматривают их геометрическую сумму вместо отдельного рассмотрения составляющих прямой и обратной последовательностей.

При анализе несимметричных режимов считаем, что трансформатор работает от сети бесконечной мощности. Это, во-первых, справедливо при современных достаточно мощных электрических сетях, во-вторых, упрощает анализ режима, поскольку напряжение сети при этом следует считать постоянным, не зависящим от режима работы трансформатора. Будем рассматривать крайние случаи однофазной и двухфазной нагрузки – однофазные и двухфазные короткие замыкания, произошедшие на холостом ходу трансформатора. При этом считаем активные сопротивления несравнимо меньше индуктивных.

7.2. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y_0 .

Трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y_0 применяют в распределительных сетях, где имеются силовая и осветительная нагрузки, работающие с различным напряжением. Выведенная нейтральная точка на вторичной стороне понижающего трансформатора позволяет иметь два рабочих напряжения: фазное и линейное.

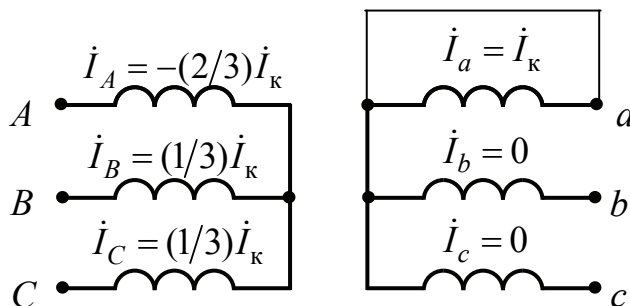


Рис. 7.2. Однофазное короткое замыкание в схеме Y/Y_0

Пусть однофазное короткое замыкание произошло в фазе a (рис. 7.2), тогда при отсутствии токов в фазах b и c составляющие симметричной системы:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a = \frac{1}{3}\dot{I}_k, \quad (7.18)$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a = \frac{1}{3}\dot{I}_k, \quad (7.19)$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a = \frac{1}{3}\dot{I}_k. \quad (7.20)$$

Системам токов \dot{I}_{a0} , \dot{I}_{a1} , \dot{I}_{a2} вторичной обмотки соответствуют такие же системы токов в первичной обмотке, но находящиеся в противофазах с ними:

$$\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{a1}; \quad (7.21)$$

$$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{a2}; \quad (7.22)$$

$$\dot{I}_{A0} = -\dot{I}_{a0}, \quad (7.23)$$

что следует из уравнения (7.16).

У первичной обмотки (рис. 7.2) выведенной нейтрали нет, поэтому токов нулевой последовательности в ней быть не может. Следовательно,

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 0, \quad (7.24)$$

реальные значения токов первичной обмотки:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}, \quad (7.25)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}, \quad (7.26)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2}. \quad (7.27)$$

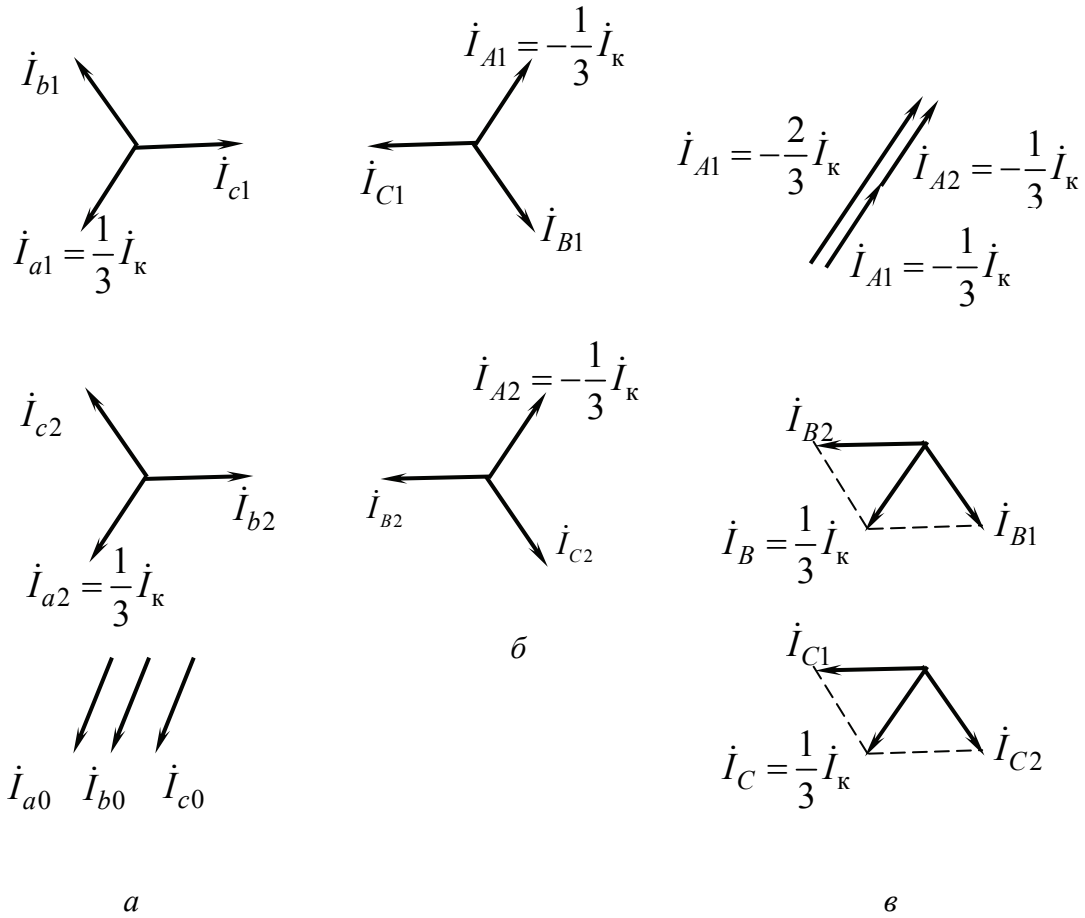


Рис. 7.3. Симметричные составляющие токов вторичной (а), первичной (б) обмоток и токи первичной обмотки (в) трансформатора при однофазном коротком замыкании

Если представить системы вторичных токов векторами, то относительно их векторы первичных токов должны быть показаны противоположно направленными (рис. 7.3).

Геометрическим сложением векторов токов прямой и обратной последовательностей получим реальные фазные токи первичной обмотки:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -\frac{2}{3}\dot{I}_K, \quad (7.25)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = -\frac{1}{3}\dot{I}_K, \quad (7.26)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = -\frac{1}{3}\dot{I}_K, \quad (7.27)$$

Результаты сложения показывают истинное распределение токов в обмотках трансформатора при однофазном коротком замыкании

Таким образом, однофазное короткое замыкание трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y/Y_0 , можно рассматривать как результат наложения трех режимов: двух симметричных режимов трехфазного короткого замыкания системы токов прямой и обратной последовательностей и третьего режима однофазного тока во вторичной обмотке (токи нулевой последовательности вторичной обмотки).

Прямая и обратная системы токов образуют нормальные трехфазные системы, в каждой из которых первичные и вторичные МДС взаимно уравновешены.

Для этих систем токов существует схема замещения с сопротивлением короткого замыкания $Z_k = Z_1 + Z'_2$ (рис. 7.4), аналогичная схеме замещения на рис. 4.8. Это объясняется тем, что трансформатор представляет собой аппарат, в котором, в противоположность вращающимся машинам, порядок следования фаз ($A - B - C$ или $A - C - B$) безразличен.

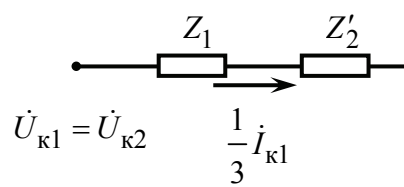


Рис. 7.4. Схема замещения для токов прямой и обратной последовательностей

Токи нулевой последовательности $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$, текущие только во вторичной обмотке, равны по величине и совпадают по фазе, т. е. они протекают по обмотке в одном направлении – от начала фазных обмоток к их концам или в обратном направлении. Это равносильно соединению фаз вторичной обмотки последовательно по схеме $(a - x) - (b - y) - (c - z)$ и образующих цепь, по которой течет ток $\dot{I}_{0п} = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_k / 3$ от источника однофазного тока номинальной частоты с напряжением $\dot{U}_{0п}$ (рис. 7.5):

$$\dot{I}_{0п} = \frac{\dot{U}_{0п}}{3Z_{0п}}, \quad (7.28)$$

где $Z_{0п}$ – полное сопротивление нулевой последовательности.

Проходя по обмоткам, ток $\dot{I}_{0п} = \dot{I}_k / 3$ создает три равные по величине и совпадающие по фазе МДС $\dot{F}_{0п} = w_2 \dot{I}_{0п} = w_2 \dot{I}_k / 3$. Действие этой МДС зависит целиком от конструкции магнитной системы трансформатора.

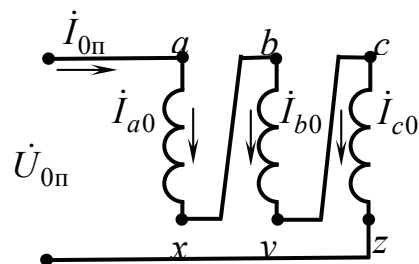


Рис. 7.5. Токи нулевой последовательности

В трехстержневом трансформаторе МДС $F_{0п}$ направлены одинаково во всех трех стержнях (рис. 7.6) и создают однофазный поток $\Phi_{0п}$, замыкающийся от ярма к ярму (штриховые тонкие линии на рис. 7.6) в среде, окружающей сердечник трансформатора: обмотки, масло, стенки бака и т. д.

Так как магнитное сопротивление этой среды велико, то при заданном значении тока поток $\Phi_{0п}$ сравнительно невелик. Замыкание потока $\Phi_{0п}$ через крепежные детали стенки кожуха или бака трансформатора вызывает дополнительные потери на вихревые токи. В этом отношении поток нулевой последовательности $\Phi_{0п}$ аналогичен потоку третьей гармонической Φ_3 , возникающему вследствие насыщения магнитной системы трансформатора (см. рис. 3.7, б). Но между ними есть существенная разница, заключающаяся в следующем:

1) поток $\Phi_{0п}$ зависит от нагрузки трансформатора, а поток Φ_3 практически имеет одно и то же значение как при холостом ходе, так и при нагрузке;

2) поток $\Phi_{0п}$ циркулирует с частотой сети, а поток Φ_3 – с тройной частотой сети;

3) поток $\Phi_{0п}$, как будет показано далее, не искажает формы фазных ЭДС в первичной и вторичной обмотках, но нарушает их симметрию, а поток Φ_3 , не нарушая симметрию ЭДС, искажает их форму.

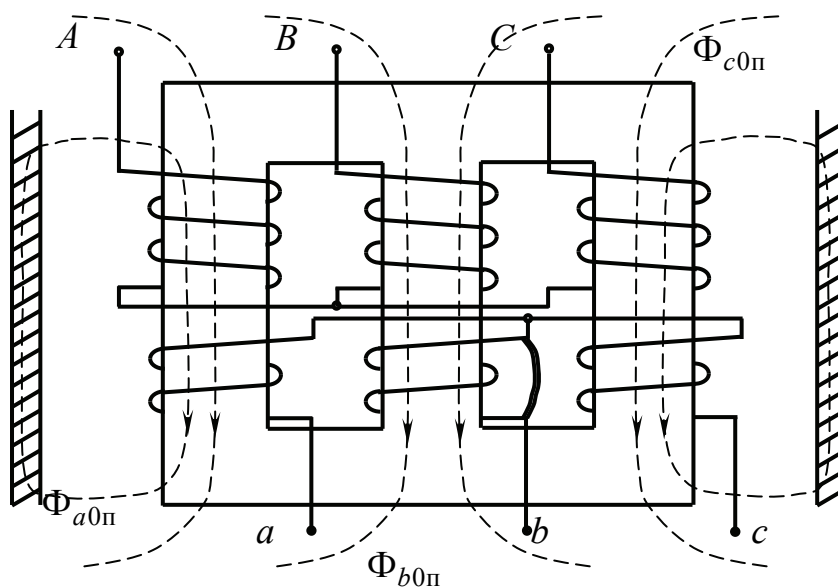


Рис. 7.6. Потоки нулевой последовательности в трехстержневом трансформаторе

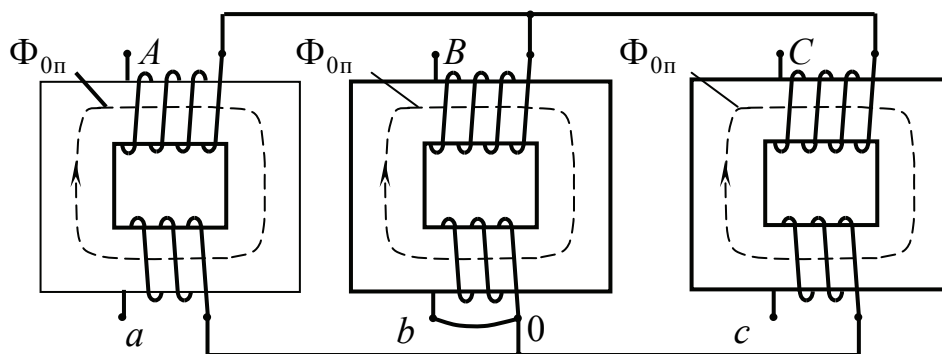


Рис. 7.7. Потoki нулевой последовательности в групповом трансформаторе

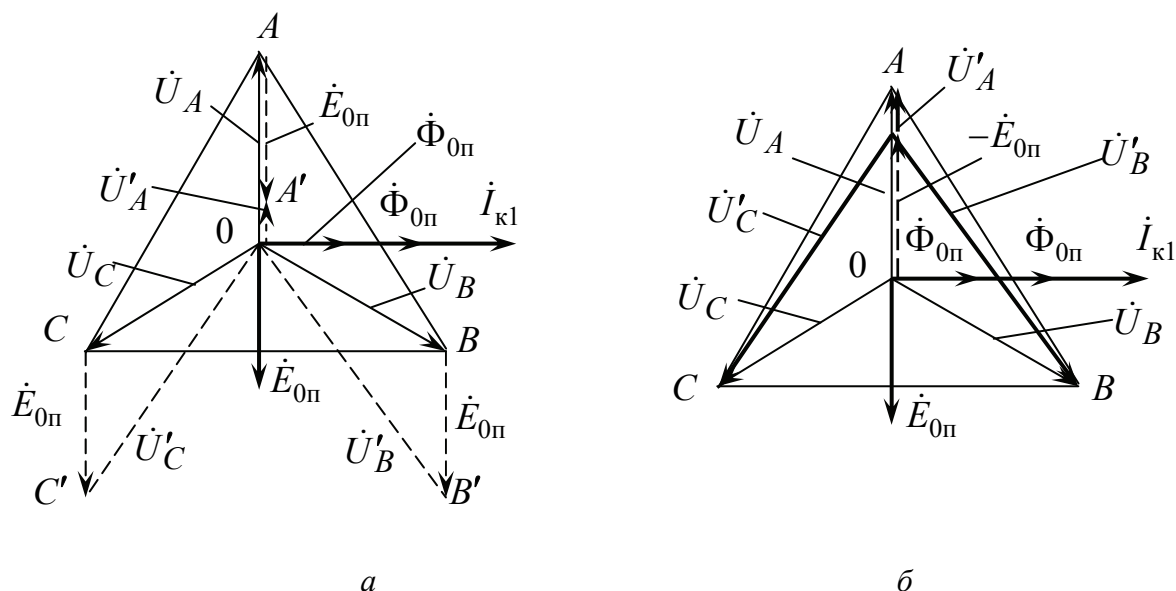


Рис. 7.8. Действие потока нулевой последовательности $\Phi_{0п}$ при соединении обмоток по схеме Y/Y_0

В групповом трансформаторе поток $\Phi_{0п}$ замыкается по сердечнику каждого из однофазных трансформаторов (рис. 7.7), т. е. по пути основного потока (в среде с минимальным магнитным сопротивлением). Поэтому даже небольшой ток $\dot{I}_{0п}$ — близкий к току холостого хода — создает поток $\Phi_{0п}$, соизмеримый по величине с основным магнитным потоком трансформатора. Этот поток наводит в обмотках трансформатора значительную ЭДС.

В ненагруженном (или равномерно нагруженном) трансформаторе напряжения симметричны и изображены на диаграмме (рис. 7.8, а) тонкими линиями. При однофазном коротком замыкании, кроме токов прямой

и обратной последовательностей, протекающих в первичной и во вторичной обмотках и уравнивающих друг друга, во вторичной обмотке появится нескомпенсированный ток нулевой последовательности, по (7.18) равный $\dot{I}_{0п} = \frac{1}{3} \dot{I}_к$, вектор которого (при пренебрежении малым активным сопротивлением) отстает от вектора напряжения на угол $\pi/2$. Ток $\dot{I}_{0п}$ вызовет появление потока $\Phi_{0п}$, который в свою очередь наведет в обмотках равные по величине и направлению ЭДС $\dot{E}_{0п}$. Складываясь с фазными напряжениями $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, ЭДС $\dot{E}_{0п}$ должны были бы сместить концы векторов $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, соответственно, в точки A', B', C' , но положение точек ABC жестко закреплено сетью (трансформатор питается от сети бесконечной мощности). Следовательно, действие токов нулевой последовательности выразится в смещении нейтральной точки на величину ЭДС $\dot{E}_{0п}$. При коротком замыкании напряжение замкнутой фазы обращается в нуль, нейтраль перемещается в одну из вершин треугольника (рис. 7.8, б), а напряжения двух свободных фаз (в данном случае \dot{U}_B и \dot{U}_C) возрастают до линейных.

Значительная несимметрия напряжений наступает при токах нулевой последовательности, близких к току холостого хода, величина же тока короткого замыкания не превышает тока холостого хода.

Аналогичная несимметрия напряжений возникает не только в групповых, но и в броневых и бронестержневых трансформаторах, также имеющих независимые магнитные системы. Такое искажение фазных напряжений совершенно недопустимо и поэтому трансформаторы с независимой магнитной системой (групповой, броневой, бронестержневой) не применяют при соединении обмоток по схеме Y/Y_0 .

Значение тока однофазного короткого замыкания определяют по уравнениям фазных ЭДС, с учетом того, что в замкнутой накоротко фазе A напряжение на зажимах практически равно нулю, напряжения в фазах B и C равны, соответственно, \dot{U}'_B и \dot{U}'_C :

$$\dot{U}_A + \dot{E}_0 - Z_k \dot{I}_{A1} - Z \dot{I}_{kA2} = 0, \quad (7.29)$$

$$\dot{U}_B + \dot{E}_0 - Z_k \dot{I}_{B1} - Z_k \dot{I}_{B2} = \dot{U}'_B, \quad (7.30)$$

$$\dot{U}_C + \dot{E}_0 - Z_k \dot{I}_{C1} - Z_k \dot{I}_{C2} = \dot{U}'_C. \quad (7.31)$$

Используя равенство (7.18) и заменяя ЭДС падением напряжения:

$$\dot{E}_{0\text{п}} = -Z_0 \dot{I}_{0\text{п}} = -\frac{1}{3} Z_0 \dot{I}_{0\text{п}}, \quad (7.32)$$

можно (7.29) представить в виде

$$\dot{U}_A - \frac{1}{3} Z_{0\text{п}} \dot{I}_{\text{к}} - \frac{1}{3} Z_{\text{к}} \dot{I}_{A1} - \frac{1}{3} Z_{\text{к}} \dot{I}_{A2} = 0. \quad (7.33)$$

Кроме того, $\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \frac{1}{3} \dot{I}_{\text{к}}$. Следовательно,

$$\dot{U}_A - \frac{1}{3} Z_{0\text{п}} \dot{I}_{\text{к}} - \frac{1}{3} Z_{\text{к}} \dot{I}_{\text{к}} - \frac{1}{3} Z_{\text{к}} \dot{I}_{\text{к}} = 0, \quad (7.34)$$

откуда

$$\dot{I}_{\text{к}} = \frac{3\dot{U}_A}{Z_{0\text{п}} + 2Z_{\text{к}}}. \quad (7.35)$$

В формуле (7.35) $\dot{U}_A = \dot{U}_{\text{ф}} = \dot{U}_{\text{л}} / \sqrt{3}$; сопротивление $Z_{\text{к}}$ находят из опыта короткого замыкания; сопротивление $Z_{0\text{п}}$ определяют опытным путем, соединяя обмотки трансформатора в схему, обеспечивающую протекание по всем трем фазам равных по величине и совпадающих по фазе токов (рис. 7.9).

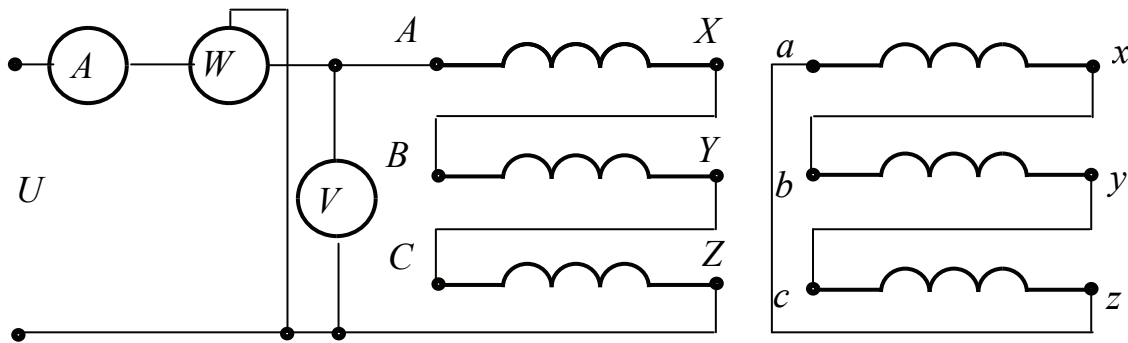


Рис. 7.9. Экспериментальное определение сопротивления нулевой последовательности

Измерив напряжение $U_{0\text{пф}}$, ток $I_{0\text{пф}}$ и мощность $P_{0\text{пф}}$ на фазу, получаем:

$$Z_{0\text{п}} = \frac{U_{0\text{пф}}}{3 \cdot I_{0\text{пф}}}; \quad r_{0\text{п}} = \frac{P_{0\text{пф}}}{3 \cdot I_{0\text{пф}}^2}; \quad x_{0\text{п}} = \sqrt{Z_{0\text{п}}^2 - r_{0\text{п}}^2}. \quad (7.36)$$

При определении $Z_{0\text{п}}$ вторичная обмотка трансформатора должна быть замкнута накоротко, если в ней могут течь токи нулевой последовательности (схемы Д и Y_0), и разомкнута, если этих токов быть не может (схема У).

7.3. Однофазное короткое замыкание в схеме Д/ Y_0

В случае работы трансформатора на однофазную нагрузку при соединении обмоток Д/ Y_0 (рис. 7.10) по вторичной обмотке протекает ток нулевой последовательности $\dot{I}_{0\text{п}}$ так же, как и при соединении обмоток У/ Y_0 . Но при этой схеме соединения обмоток ток $\dot{I}_{0\text{п}}$ течет и по контуру первичной обмотки, соединенной

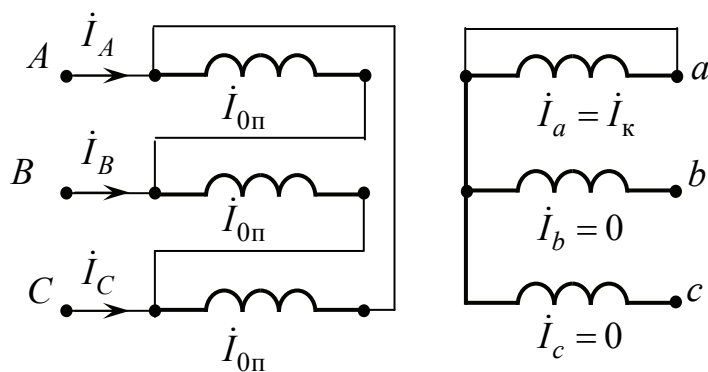


Рис. 7.10. Однофазное короткое замыкание в схеме Д/ Y_0

в схему «треугольник» $A - X - B - Y - C - Z$. Таким образом, в обеих обмотках трансформатора при соединении их по способу Д/ Y_0 текут токи всех трех последовательностей. Создаваемые каждой из этих систем токов МДС взаимно уравниваются, вследствие чего однофазный поток $\Phi_{0\text{п}}$ является практически потоком

рассеивания и сдвиг нейтральной точки практически отсутствует. Фазные напряжения искажаются значительно меньше, чем в системе У/ Y_0 , при любой величине однофазной нагрузки. Поэтому применение этой схемы соединения обмоток является предпочтительной для любой схемы магнитопровода: трехстержневого, группового, броневого, бронестержневого.

7.4. Двухфазное короткое замыкание в схемах У/У

При коротком замыкании фаз B и C на холостом ходу (ток $I_A = 0$, рис. 7.11) в схеме отсутствует выведенная нейтраль, что не позволяет циркулировать в ней токам нулевой последовательности и устраняет причины искажения ЭДС (смещение нейтрали).

Токи короткозамкнутых фаз равны по величине и противоположно направлены (ток I_B от конца к началу фазы, а ток I_C – от начала к концу). В этом случае $\dot{I}_b = -\dot{I}_B$, $\dot{I}_c = -\dot{I}_C$. Учитывая, что $\dot{I}_{0\pi} = 0$, а сопротивления обмоток трансформатора токам прямой и обратной последовательностей одинаковы, ток короткого замыкания определяют по формуле

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_b - \dot{U}_c}{2Z_K}, \quad (7.37)$$

или, пренебрегая активным сопротивлением, находят ток короткого замыкания по абсолютному значению:

$$I_K = \frac{U}{2x_K}. \quad (7.38)$$

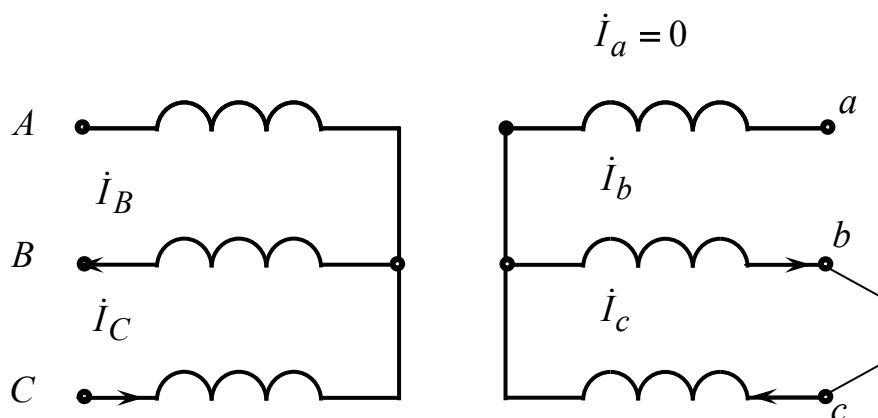


Рис. 7.11. Двухфазное короткое замыкание в схеме У/У

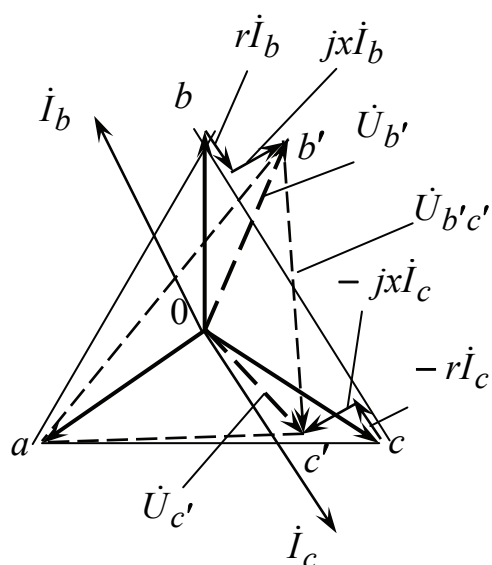


Рис. 7.12. Векторная диаграмма при двухфазной нагрузке в схеме У/У

При активной нагрузке ток \dot{I}_B совпадает с линейным напряжением \dot{U}_{bc} (рис. 7.12). При отсутствии токов нулевой последовательности нейтральная точка системы не смещается, потенциалы точек A, B, C являются заданными и, соответственно, фазные первичные напряжения при нагрузке не изменяются. Вторичные фазные и линейные напряжения можно получить, не производя разложения несимметричной системы двухфазного тока на симметричные составляющие. Для этого нужно сложить вектор фазного напряжения \dot{U}_b с векторами па-

дений напряжения на сопротивлениях этой фазы обмотки $-r_k \dot{I}_b$ и $-jx_k \dot{I}_b$, а вектор \dot{U}_c — с векторами $-r_k \dot{I}_c$ и $-jx_k \dot{I}_c$, и получить новое значение вектора вторичного линейного напряжения $\dot{U}_{b'c'}$ (рис. 7.12). В рассматриваемом случае фазное напряжение \dot{U}_b возрастает, а фазное напряжение \dot{U}_c уменьшается. При токах $\dot{I}_b = \dot{I}_H$ изменение напряжений остается в пределах нескольких процентов (в пределах паспортных напряжений короткого замыкания).

Трехфазная система токов и напряжений считается практически симметричной, если отношение тока или напряжения обратной последовательности, соответственно, к току или напряжению прямой последовательности не превышает 5 %.

При симметричном первичном напряжении и двухфазной нагрузке нагрузочный ток трансформатора, при котором вторичные напряжения практически симметричны, определяют по формуле

$$I_2 \leq \frac{5\sqrt{3}(1 - \Delta u/100)}{u_k} I_{2H}, \quad (7.39)$$

где Δu и u_k — соответственно, падение напряжения и напряжение короткого замыкания трансформатора, выраженное в процентах.

7.5. Работа трансформатора в схеме открытого треугольника

Трансформатор, включенный в схему Д/Д, обеспечивает практическую симметричность линейных токов и напряжений даже в том случае, когда первичная и вторичная обмотки одной фазы будут из схемы удалены (открытый Д). Сравним условия работы трансформатора с закрытым и открытым треугольниками, для упрощения анализа добавив к допущениям, приведенным в п. 7.1, еще два: нагрузка симметричная и по характеру активная, падением напряжений пренебрегаем. Схема работы трансформатора со схемой Д/Д приведена на рис. 7.13, а. На диаграмме рис. 7.13, б, построенной для закрытого треугольника, векторы \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} представляют собой симметричную систему первичных линейных напряжений и являются также первичными фазными напряжениями \dot{U}_{AX} , \dot{U}_{BY} и \dot{U}_{CZ} . При активной нагрузке фазные токи \dot{I}_{AX} , \dot{I}_{BY} и \dot{I}_{CZ} совпадают с соответствующими им фазными напряжениями, а линейные токи представляют собой геометрическую разность двух фазных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{CZ} - \dot{I}_{AX}, \quad (7.40)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{AX} - \dot{I}_{BY}, \quad (7.41)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{BY} - \dot{I}_{CZ}. \quad (7.42)$$

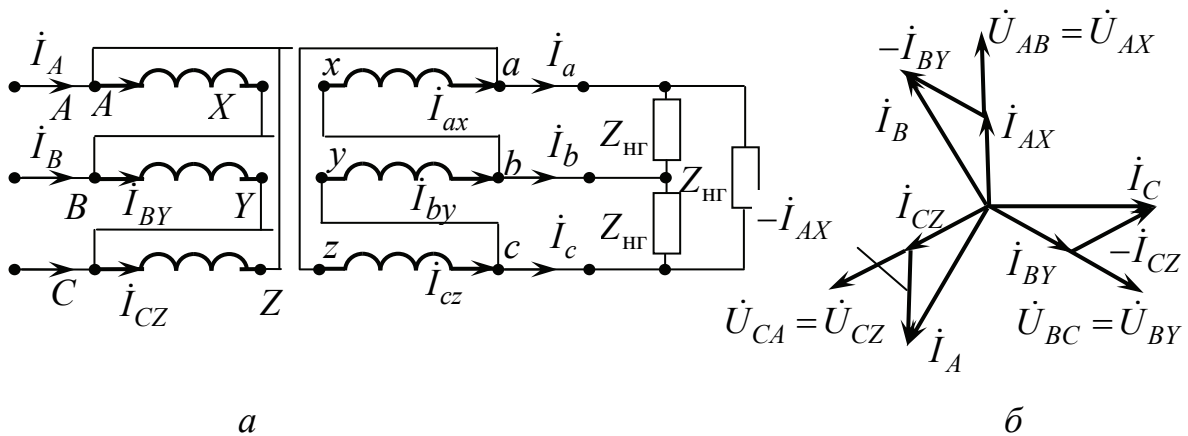


Рис. 7.13. Симметричная работа трансформатора в схеме Д/Д

Аналогичные соотношения напряжений и токов можем составить для вторичной цепи.

Посмотрим, как изменится работа трансформатора, если открыть первичный и вторичный треугольники, удалив из схемы фазу $BY - by$ (рис. 7.14, а). Поскольку по условию первичные линейные напряжения \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} и, соответственно, фазные напряжения \dot{U}_{AX} , \dot{U}_{BY} и \dot{U}_{CZ} не изменяются, то по условию равновесия ЭДС не могут измениться ни первичные ЭДС фаз $A - X$ и $C - Z$, ни магнитные потоки, необходимые для создания этих ЭДС.

При отсутствии падений напряжений $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}$ и $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}$, т. е. вторичные напряжения \dot{U}_{ab} и \dot{U}_{ca} тоже не изменяются ни по величине, ни по фазе. Так как $\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca} = 0$, то напряжение \dot{U}_{bc} остается неизменным (рис. 7.14, б).

Таким образом, если к вторичной цепи подключена какая-нибудь нагрузка ($Z_{\text{нг}}$), то при открытом треугольнике и отсутствии падений напряжения на ней остается то же напряжение, как и в закрытом треугольнике. Поэтому линейные вторичные и, соответственно, первичные токи остаются без изменения, но фазные токи изменяются как по величине, так и по фазе. Действительно, в соответствии с (7.41) при $I_{BY} = 0$ ток $\dot{I}_B = \dot{I}_{AX}$ остается неизменным. Следовательно, фазный ток возрастает до линейного, увеличившись в $\sqrt{3}$ и изменив свою фазу на $+30^\circ$ (рис. 7.14, б). Аналогично этому при токе $I_{BY} = 0$ ток в линии $\dot{I}_C = -\dot{I}_{CZ}$ также измениться не может. Значит, изменится в $\sqrt{3}$ раз величина фазного тока \dot{I}_{CZ} и на -30° его фаза (рис. 7.14, б).

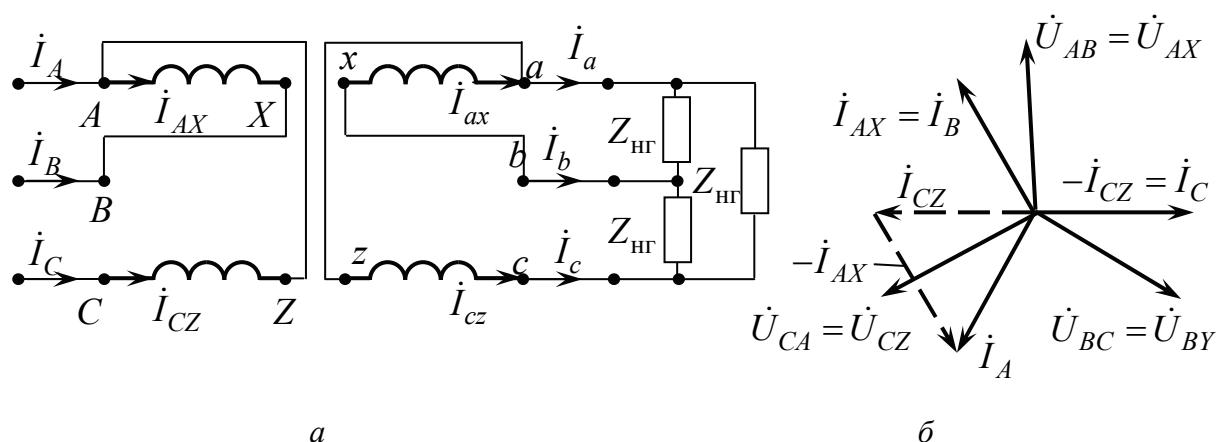


Рис. 7.14. Работа трансформатора в схеме открытого треугольника

Для предупреждения перегрева обмоток общая нагрузка трансформатора, переведенного на работу по схеме открытого треугольника, должна быть снижена в $\sqrt{3}$ раз, т. е. не превышать 58 % номинальной.

За счет неизбежных падений напряжения на сопротивлениях обмотки симметрия вторичных напряжений в схеме открытого треугольника несколько нарушится (в пределах напряжения короткого замыкания).

Работу трансформатора при открытом треугольнике используют в линиях передачи при слабых нагрузках или когда при выходе из строя одного из трех трансформаторов группы все же нужна непрерывная работа при уменьшенной нагрузке. Кроме того, по схеме открытого треугольника включаются измерительные трансформаторы.

Понимание особенностей работы трансформаторов при несимметричных нагрузках позволяет избежать нарушений их работы, опасных для их надежной работы, от которой зависит бесперебойное электроснабжение потребителей. Возможность возникновения таких режимов учитывается при расчете, проектировании и эксплуатации трансформаторов.

8. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

8.1. Включение ненагруженного трансформатора в сеть

Переходные процессы возникают в трансформаторах при всяком изменении режима его работы: включение трансформатора в сеть, резкое изменение нагрузки, короткое замыкание в первичной или на выходе вторичной обмотки, волновые процессы в линии, питающей трансформатор, и в ряде других случаев. Несмотря на очень короткое время переходных процессов, они сопровождаются значительным повышением токов, электромагнитных сил, магнитных потоков, возникновением опасных для целостности трансформатора больших механических усилий между обмотками, крайне неравномерного распределения напряжения между отдельными частями обмоток, резкого перегрева обмоток и т. д.

Поэтому без учета переходных процессов в трансформаторе при его проектировании не могут быть правильно выбраны размеры, определены условия, в которых он должен эксплуатироваться, и сформулированы требования к его защите.

При установившемся режиме работы ток холостого хода силового трансформатора не превышает 3–5 % номинального. При включении трансформатора в сеть на номинальное напряжение могут наблюдаться резкие броски тока, во много раз превышающие номинальные значения тока холостого хода.

Уравнение ЭДС при включении трансформатора на синусоидальное, не зависящее от его режима работы, напряжение можно записать в виде

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_0) = r_1 i_0 + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (8.1)$$

где ψ_0 – фаза включения, т. е. фазовый угол, определяющий значение u_1 в момент включения трансформатора в сеть (рис. 8.1). Зависимость $\Phi_t = f(i_0)$ нелинейна, поэтому решение уравнения (8.1) возможно при упрощающем положении о пропорциональности потокосцепления току i_0 :

$$L_1 i_0 = w_1 \Phi_t. \quad (8.2)$$

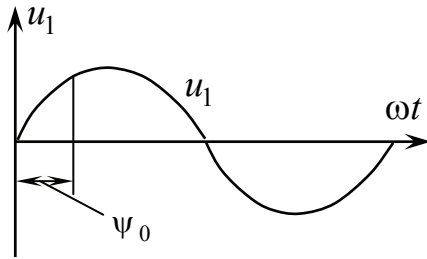


Рис. 8.1. Фаза включения трансформатора

или

Тогда уравнение (8.1) приобретает вид

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi_0) = r_1 \frac{\Phi_t w_1}{L_1} + w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \quad (8.3)$$

$$\frac{d\Phi_t}{dt} + \frac{\Phi_t}{L_1} r_1 = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi_0). \quad (8.4)$$

Поток Φ_t выражается в виде суммы двух потоков – периодического потока $\Phi_{уст}$, соответствующего установившемуся режиму, и свободного потока $\Phi_{св}$, соответствующего переходному режиму. Таким образом,

$$\Phi_t = \Phi_{уст} + \Phi_{св}. \quad (8.5)$$

Поток $\Phi_{уст}$ отстает от подводимого к трансформатору напряжения u_1 почти на 90° , поэтому

$$\Phi_{уст} = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_0 - \pi/2) = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0), \quad (8.6)$$

где Φ_m – амплитуда потока при установившемся режиме работы.

Для определения свободной составляющей потока правую часть (8.4) приравнивают нулю:

$$\frac{d\Phi_t}{dt} + \frac{\Phi_t}{L_1} r_1 = 0. \quad (8.7)$$

Решение (8.7) отыскивается в виде

$$\Phi_{св} = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t}, \quad (8.8)$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий:

$t = 0$. При $t = 0$ функция $e^{-\frac{r_1}{L_1} t} = 1$ и поток $\Phi_{св} = C$, а в магнитопроводе

существует только поток остаточного намагничивания $\pm\Phi_{\text{ост}}$. В этом случае уравнение (8.5) с учетом (8.6) можно записать в виде

$$\Phi_t = \pm\Phi_{\text{ост}} = \Phi_{\text{уст}} + \Phi_{\text{св}} = -\Phi_m \cos \psi_0 + C, \quad (8.9)$$

откуда

$$C = -\Phi_m \cos \psi_0 \pm \Phi_{\text{ост}}. \quad (8.10)$$

Подставляя это значение C в уравнение (8.8), находим

$$\Phi_{\text{св}} = \Phi_m \cos \psi_0 e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t} \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t}. \quad (8.11)$$

Окончательно поток в магнитопроводе трансформатора для любого времени переходного процесса

$$\Phi_t = \Phi_{\text{уст}} + \Phi_{\text{св}} = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0) + \Phi_m \cos \psi_0 e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t} \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t}. \quad (8.12)$$

Характер изменения магнитного потока будет зависеть от момента включения трансформатора.

При $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$ и $u_1 = U_{1m}$ магнитный поток

$$\Phi_t = -\Phi_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t} = \Phi_m \sin \omega t \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{\eta_1}{L_1} t}. \quad (8.13)$$

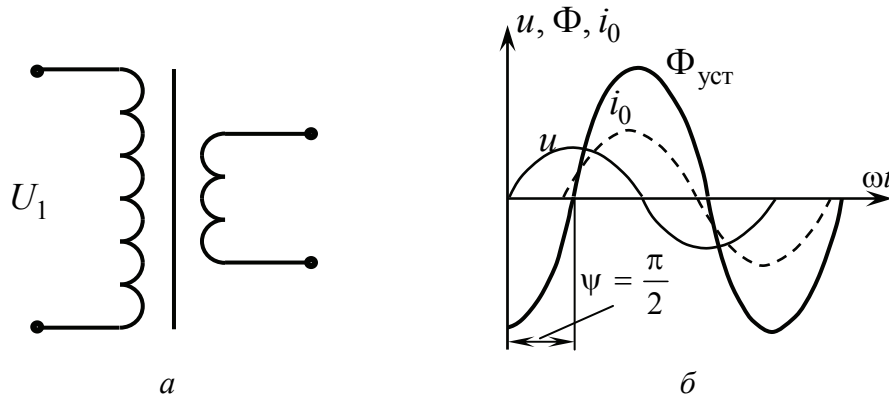


Рис. 8.2. Включение ненагруженного трансформатора (а) и изменение магнитного потока при $\psi = \pi/2$ (б)

Если остаточный поток отсутствует, то при включении трансформатора в сеть поток и ток намагничивания (рис. 8.2) достигают установившегося значения без переходного процесса.

При $\psi_0 = 0$ и $u_1 = 0$ магнитный поток

$$\Phi_t = -\Phi_m \cos(\omega t) + \Phi_m e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \quad (8.14)$$

имеет апериодическую составляющую даже при потоке $\Phi_{\text{ост}} = 0$ и переходный процесс неизбежен. На рис. 8.3 приведены кривые, характеризующие изменения во времени магнитного потока Φ и его составляющих при процессе включения однофазного трансформатора, протекающем согласно уравнению (8.14).

Наибольшего значения магнитный поток достигнет через полупериод от момента включения, когда

$$\omega t = 2\pi f t = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} = \pi; \quad \cos \omega t = \cos \pi = -1, \quad (8.15)$$

с учетом (8.15) магнитный поток

$$\Phi_t = \Phi_m + \Phi_m e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \quad (8.16)$$

Из (8.15) следует:

$$\omega t = \pi; \quad t = \pi/\omega, \quad \text{а} \quad \frac{r_1}{L_1} t = \frac{\pi r_1}{\omega L}. \quad (8.17)$$

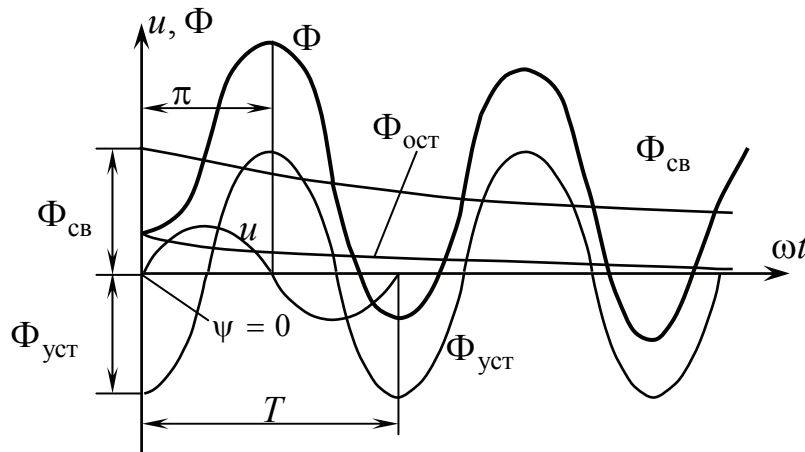


Рис. 8.3. Изменение магнитного потока при $\psi = 0$

Обычно $r_1 \ll \omega L_1$ и в первом приближении можно считать, что значение $e^{\frac{\pi r_1}{\omega L_1}} \approx 1$, особенно в больших трансформаторах. Остаточный же поток может быть значительным и достигать иногда $\Phi_{\text{ост}} = (0,2 - 0,3)\Phi_{\text{уст}}$, и наибольшее значение магнитного потока в переходном процессе в два с лишним раза превышает установившееся:

$$\Phi = (2,2 - 2,3)\Phi_m. \quad (8.18)$$

Намагничивающий ток i_0 , необходимый для создания такого потока, определяется по кривой намагничивания (рис. 8.4).

На кривой (рис. 8.4) точки A и C соответствуют номинальному и двойному значениям магнитной индукции силовых трансформаторов, т. е. нормальному и двойному значениям потока $\Phi_{\text{уст}}$. Из рисунка следует, что амплитуда тока включения может превысить амплитуду номинального намагничивающего тока холостого хода в 50–100 раз. Если иметь в виду, что ток $I_0 \approx 5\% I_n$, то ток включения может превысить номинальный рабочий ток в 3–4 раза. Амплитудное значение тока тем больше, чем больше насыщена сталь магнитопровода. Длительность переходного процесса включения невелика и не превосходит нескольких периодов.

С возрастанием номинальной мощности трансформатора отношение r_1/L_1 обычно уменьшается (увеличивается электромагнитная постоянная), поэтому у трансформаторов малой мощности переходный процесс при включении протекает быстрее и связан с меньшими бросками тока.

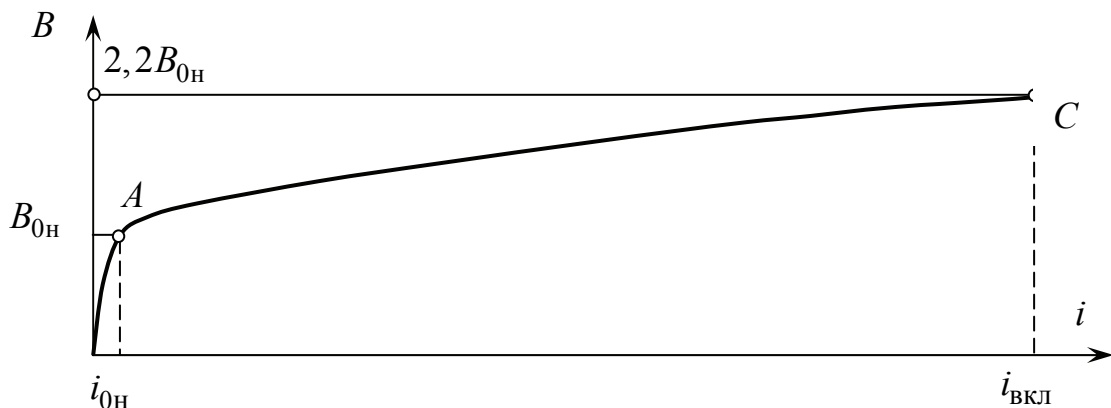


Рис. 8.4. Кривая намагничивания

Процесс включения в отдельных фазах трехфазного трансформатора протекает различно, так как магнитные потоки фаз сдвинуты между собой на 120° и всегда следует ожидать более или менее значительных толчков тока, поскольку всегда будет фаза, напряжение которой в момент включения близко нулю. Однако уравнение (8.14) для каждой фазы в отдельности остается справедливым.

Ток включения трансформатора не представляет опасности непосредственно для трансформатора, но он может привести к выключению трансформатора из сети. Поэтому защитную аппаратуру рассчитывают на токи включения трансформатора, чтобы избежать неправильных отключений трансформатора. Следует помнить, что при резком повышении токов увеличиваются электромагнитные силы, стремящиеся сдвинуть витки обмоток.

Многократное возрастание тока при включении трансформатора можно объяснить и физически. В силу инертности проводящих контуров трансформатор стремится сохранить потокосцепление неизменным, а при включении – равным нулю или некоторому остаточному потоку. Следовательно, в момент включения трансформатора в его обмотке возникнет ток, который создаст собственный магнитный поток, равный по величине, но противоположный по знаку вынужденному потоку в магнитопроводе.

В те периоды времени, когда вынужденный и собственный потоки совпадают по направлению, магнитопровод сильно насыщается и намагничивающий поток многократно увеличивается.

8.2. Внезапное короткое замыкание

Внезапное короткое замыкание трансформатора является аварийным процессом. При его исследовании условно считают, что подводимое к трансформатору напряжение остается неизменным и вторичная обмотка замыкается накоротко непосредственно на ее зажимах. Первое допущение обосновано достаточно мощными современными электрическими сетями, второе – тем, что удаление короткого замыкания от вторичных зажимов трансформатора несущественно увеличивает сопротивление вторичной обмотки трансформатора, но усложняет анализ явления.

Короткие замыкания в электрических установках возникают обычно из-за различных неисправностей в сетях: при механическом повреждении изоляции, электрическом ее пробое в результате ошибочных действий эксплуатационного персонала и в ряде других случаев.

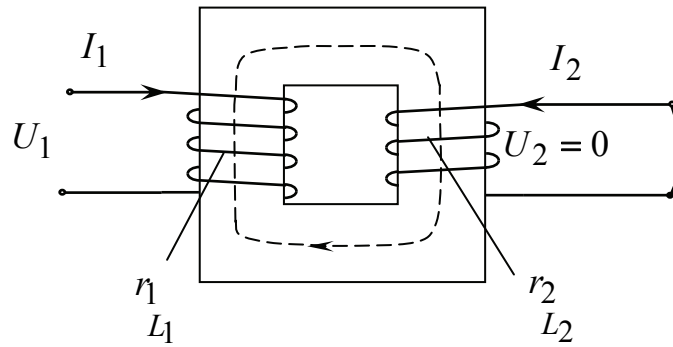


Рис. 8.5. Короткое замыкание однофазного трансформатора

Короткое замыкание представляет для трансформатора серьезную опасность, так как при этом возникают чрезмерно большие токи, резко повышающие температуру обмоток, что угрожает целостности изоляции. В обмотках трансформатора существенно возрастают электромагнитные силы, что также приводит к выходу трансформатора из строя.

Рассмотрим переходный процесс наиболее типичного случая короткого замыкания однофазного трансформатора (рис. 8.5). Особенности этого процесса характерны и для трехфазных трансформаторов.

Для упрощения анализа рассматриваем приведенный трансформатор, т. е. принимаем $w_1 = w_2$ и пренебрегаем током холостого хода. В основу исследования положим схему короткого замыкания, приведенную на рис. 4.8. Схема замещения трансформатора представляет собой электрическую цепь с общим активным сопротивлением $r_k = r_1 + r'_2$ и общим индуктивным сопротивлением $x_k = x_1 + x'_2 = \omega L_{\sigma 1} + \omega L'_{\sigma 2} = \omega L_k$, где L_k – индуктивность рассеяния трансформатора. Так как потоки рассеяния распределяются главным образом в немагнитной среде, то $L_k = \text{const}$. С учетом этого уравнение ЭДС при внезапном коротком замыкании пишется в виде

$$u_{1k} = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_k) = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt}, \quad (8.19)$$

где ψ_k угол, характеризующий мгновенное значение напряжения в момент короткого замыкания ($t = 0$).

В соответствии с теорией переходного процесса ток короткого замыкания в каждый момент времени можно рассматривать как сумму двух токов – установившегося тока короткого замыкания и свободного тока:

$$i_{1k} = i_{уст} + i_{св}. \quad (8.20)$$

В формуле (8.20) $i_{1\text{уст}}$ – мгновенное значение установившегося тока короткого замыкания с амплитудой:

$$I_{1\text{уст}m} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}}. \quad (8.21)$$

Вектор тока короткого замыкания отстает от вектора напряжения на угол

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k} \approx 90^\circ, \quad (8.22)$$

получаем

$$i_{1\text{уст}} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \psi_k - \pi/2) = -\sqrt{2} I_{1\text{уст}} \cos(\omega t + \psi_k). \quad (8.23)$$

Значение свободного тока $i_{\text{св}}$ определяется как решение однородного уравнения ЭДС (уравнение (8.19) при равенстве 0 его правой части):

$$r_k i_{\text{св}} + L_k \frac{di_{\text{св}}}{dt} = 0, \quad (8.24)$$

в виде

$$i_{\text{св}} = C e^{-\alpha_k t}, \quad (8.25)$$

где $\alpha_k = r_k / L_k$ корень характеристического уравнения.

Постоянная интегрирования C определяется из начальных условий: если до короткого замыкания трансформатор работал холостую при $t = 0$, $i_1 = 0$,

$$i_k = i_{\text{св}} + i_{\text{уст}} = C - \sqrt{2} I_{1\text{уст}} \cos \psi = 0, \quad (8.26)$$

откуда постоянная интегрирования $C = \sqrt{2} I_{1\text{уст}} \cos \psi$.

Таким образом, переходный ток

$$i_k = -\sqrt{2} I_{1\text{уст}} \cos(\omega t + \psi_k) + I_{1\text{уст}} e^{-\frac{r_k}{L_k} t} \cos \psi_k, \quad (8.27)$$

Длительность переходного процесса соответствует времени затухания свободной составляющей тока, т. е. соотношения индуктивности и активного сопротивления обмоток трансформатора. В силовых трансформаторах, где индуктивное сопротивление обмоток больше его активного сопротивления, время затухания переходного процесса не превышает (0,5–0,7) с.

Наиболее характерны два момента внезапного короткого замыкания трансформатора:

1) короткое замыкание при $\psi_k = \frac{\pi}{2}$ и $u_1 = U_{1\max}$;

2) короткое замыкание при $\psi_k = 0$ и $u_1 = 0$;

В первом случае по (8.27)

$$i_k = -\sqrt{2}I_{1\text{уст}} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2}I_{1\text{уст}} \sin \omega t, \quad (8.28)$$

свободный ток не возникает, и ток i_k сразу принимает установившееся значение.

Во втором случае по (8.27)

$$i_k = -\sqrt{2}I_{1\text{уст}} \cos \omega t + I_{1\text{уст}} e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (8.29)$$

Процесс становления тока короткого замыкания показан на рис. 8.6.

В предельном случае, при $r_k/L_k = 0$ и $e^{-\frac{r_k}{L_k} t} \approx 1$, наибольшее значение тока, или *ударный ток короткого замыкания*, наступит через полупериод $t = T/2$ и будет равен удвоенному значению установившегося тока:

$$i_{\text{уд}} = 2\sqrt{2}I_{1\text{уст}}, \quad (8.30)$$

поскольку при $t = T/2$ $\cos \omega t = -1$.

В реальном трансформаторе свободная составляющая тока затухает тем быстрее, чем больше отношение r_k/L_k .

Уравнение (8.29) перепишем в виде

$$i_k = \sqrt{2}I_{1\text{уст}} (1 + e^{-\frac{r_k}{L_k} t}). \quad (8.31)$$

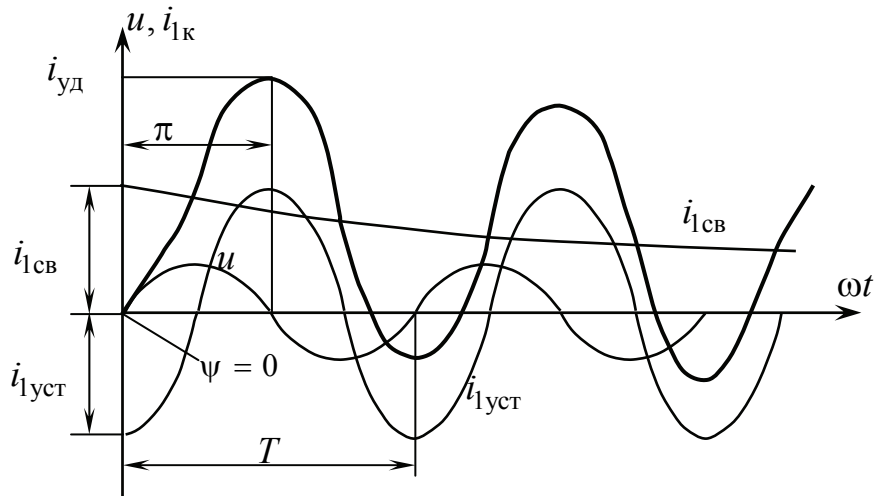


Рис. 8.6. Ток внезапного короткого замыкания при $\psi = 0$

В предыдущих формулах установившийся ток короткого замыкания

$$I_{1уст} = \frac{U_H}{Z_K} = \frac{100}{u_K} I_H. \quad (8.32)$$

С учетом того, что при $t = T/2$

$$\frac{r_K}{L_K} t = \frac{r_K T}{2L_K} = \frac{r_K 2\pi f}{2L_K 2\pi f} \cdot \frac{1}{f} = \frac{r_K \pi}{x_K}, \quad (8.33)$$

ударный ток (8.31) можно записать в более удобной для расчетов форме:

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{1уст} \left(1 + e^{-\frac{r_K \pi}{x_K}}\right) = \sqrt{2} \frac{I_H}{u_{K\%}} \left(1 + e^{-\frac{r_K \pi}{x_K}}\right) \cdot 100, \quad (8.34)$$

в которой u_K – напряжение короткого замыкания в процентах; I_H – номинальный ток в амперах.

8.3. Влияние токов короткого замыкания на работу трансформатора

Хотя короткое замыкание трансформатора длится обычно очень недолго (поврежденный трансформатор автоматически отключается от сети), тем не менее температура его обмоток может достигнуть значений, непосредственно угрожающих целостности изоляции. Чтобы температура обмотки не превысила допустимых 200° – 250° , время протекания тока короткого замыкания не должно превышать:

$$t \approx 2,5 \left(\frac{u_k}{J_{\text{cp}}} \right)^2. \quad (7.35)$$

Здесь u_k – напряжение короткого замыкания в %; J_{cp} – средняя плотность тока в обмотках трансформатора, А/мм^2 , для трансформаторов с медными обмотками оно составляет $t \approx 0,1 u_k^2$.

Время нагревания обмоток до предельной температуры не превышает 4–10 с. Но время остывания обмотки до рабочей температуры после отключения короткого замыкания часто исчисляется десятками минут, что объясняется относительно слабой интенсивностью процесса отведения тепла с поверхности обмоток в окружающую среду.

Установившийся ток короткого замыкания опасен своим тепловым воздействием. Ударный ток – динамическим: возникновением больших электромагнитных сил вследствие взаимодействия протекающих по проводникам обмоток токов с магнитным полем трансформатора. Между проводниками, по которым ток протекает в противоположные стороны, что и происходит при коротком замыкании трансформатора, возникают механические силы $F_1 = -F_2$ (рис. 8.7), которые раскладывают на радиальные (поперечные) составляющие F_{q1} и F_{q2} и осевые (продольные) F_{d1} и F_{d2} . Первые стремятся растянуть наружную обмотку и сжать внутреннюю, вторые – сместить обмотку в осевом направлении. Кроме сил F_q и F_d , между витками одной и той же обмотки действуют силы F_i , которые стремятся сжать обмотку по высоте. Указанные силы имеют место и в обычных условиях работы, но тогда они не велики и не представляют опасности, тогда как при коротком замыкании они увеличиваются в сотни раз и могут привести к аварии трансформатора.

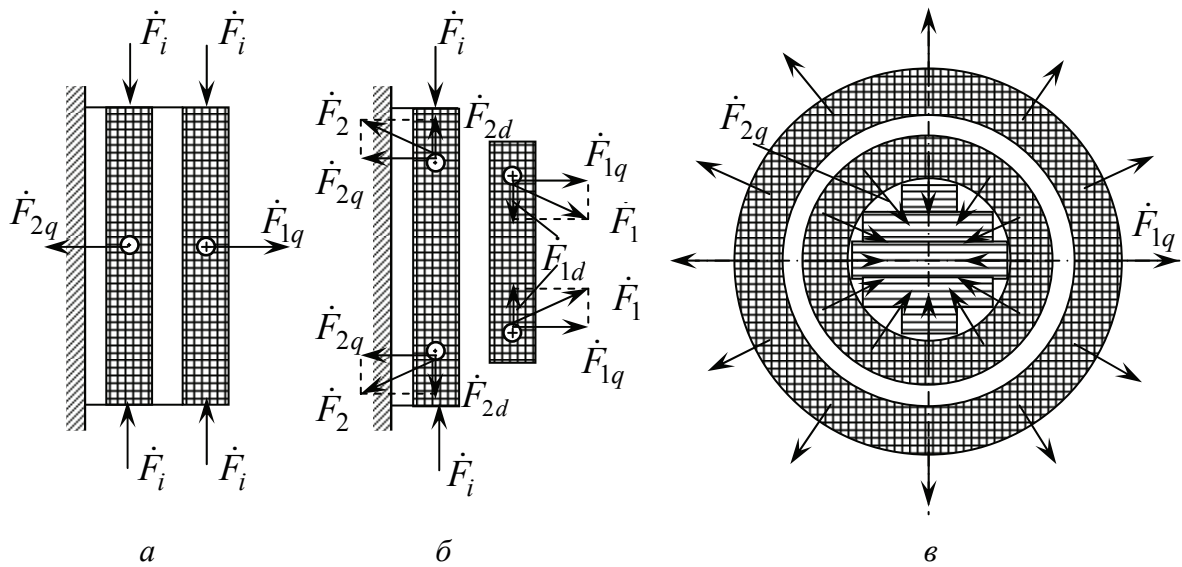


Рис. 8.7. Осевые, радиальные и внутренние силы: *а* – при одинаковой высоте обмоток; *б* – при двустороннем укорочении обмоток; *в* – поперечное сечение обмоток

Наибольшего значения достигают силы, действующие в радиальном направлении. Их рассчитывают по уравнению

$$F = 0,628k_p \frac{\pi D_{cp}}{l} (i_{km} w_{2H})^2 \cdot 10^{-6}, \quad (8.36)$$

где k_p – коэффициент Роговского, равный для большинства силовых трансформаторов 0,98; D_{cp} – средний диаметр обмотки; l – осевой размер обмотки; $i_{уд}$ – ударный ток короткого замыкания; w_{2H} – число витков обмотки ВН при номинальном напряжении.

Осевые силы существенно меньше радиальных и часто не учитываются при расчетах. Для уменьшения этих сил первичные и вторичные обмотки располагают на магнитопроводе с предельно возможной симметричностью (рис. 8.7, *б*).

8.4. Перенапряжения в трансформаторах

Под перенапряжением в трансформаторе понимают кратковременные процессы, имеющие характер отдельных коротких импульсов, носящих периодический или аperiodический характер.

Причинами перенапряжений бывают:

- явления атмосферного характера, возникающие вследствие прямых ударов молнии в линию передачи;
- коммутационные процессы – включение, выключение, быстрые изменения нагрузок, сопровождающиеся резким изменением электромагнитной системы трансформатора.

Исследования показали, что коммутационные перенапряжения могут превышать номинальное фазное напряжение в 2–5 раз, атмосферные перенапряжения достигают 7–12 номинальных напряжений и являются опасными для целостности трансформатора.

Достигающие зажимов трансформаторов перенапряжения могут быть ограничены устройствами защиты, находящимися вне трансформатора. Гораздо опаснее перенапряжения, возникающие внутри трансформатора при распределении электромагнитной волны вдоль обмотки, при этом напряжения между отдельными витками обмотки могут значительно превысить напряжения установившегося режима. Чаще всего повреждаются витки, ближайšie к выводам трансформатора. Пробой изоляции влечет за собой выход трансформатора из строя и нарушение нормальных условий эксплуатации данной установки.

Процессы, происходящие в трансформаторе при перенапряжениях, являются случайными и в полном объеме не поддаются математическому анализу. Тем не менее даже при упрощенном подходе к анализу процессов полученные результаты дали возможность сделать ряд практических выводов, позволивших создать так называемый грозоупорный трансформатор.

Рассмотрим простейший случай, когда волна перенапряжения с крутым фронтом (весьма высокой частоты, достигающей сотни килогерц) распространяется по линии в обе стороны от места разряда грозового облака и набегаєт на вывод трансформатора. Вследствие весьма большой скорости (частоты) изменения напряжения (от $U = 0$ до $U = U_{\max}$ напряжение нарастает за несколько микросекунд), индуктивное сопротивление x_L обмоток трансформатора оказывается для разрядного тока чрезвычайно большим, тогда как емкостное сопротивление, наоборот, уменьшается. Разрядный ток устремляется в землю через неизбежные емкостные связи трансформатора: вдоль обмотки по цепочке продольных (межвитковых) емкостей C_d и поперечных (между витками обмотки и стенкой бака) емкостей C_q (рис. 7.8). Если допустить, что поперечные емкости отсутствуют, то разрядный ток устремится в землю по цепочке

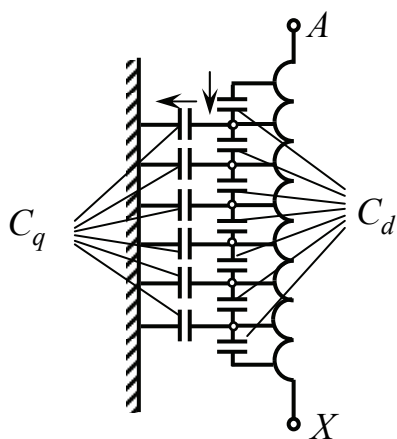


Рис. 8.8. Емкостные связи в трансформаторе

продольных емкостей, а напряжение набежавшей волны распределится вдоль обмотки равномерно (рис. 8.9, *а*), если допустить отсутствие продольных емкостей, то единственным путем разрядного тока на землю будут емкости C_q , ближайšie к началу обмотки. При этом все падение напряжения (напряжение волны) придется на первые витки. Распределение напряжения вдоль обмотки изобразится вертикальной прямой (рис. 8.9, *б*).

Фактически существуют те и другие емкости, и в неустановившемся периоде распределение напряжения вдоль обмотки происходит по кривой (рис. 8.9, *в*).

Наибольшее напряжение волны приходится именно на первые витки обмотки. Вследствие резонансных колебаний (в неустановившемся режиме) возможно, что наибольшее напряжение придется на витки, несколько удаленные от начала обмотки.

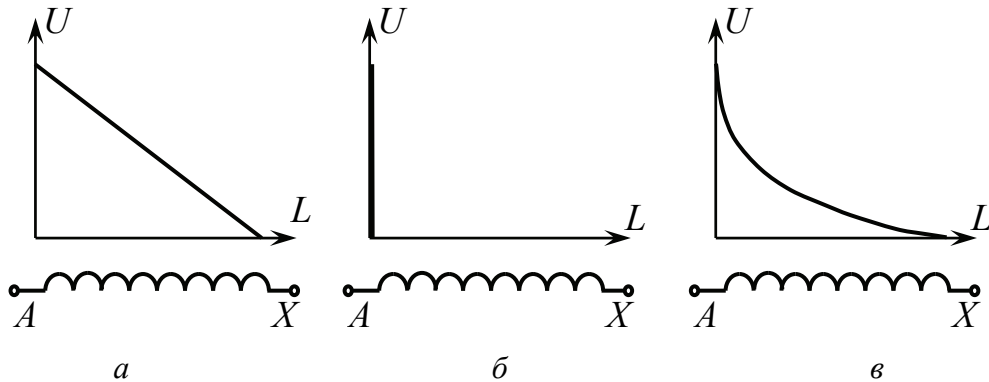


Рис. 8.9. Начальное распределение напряжения в трансформаторе

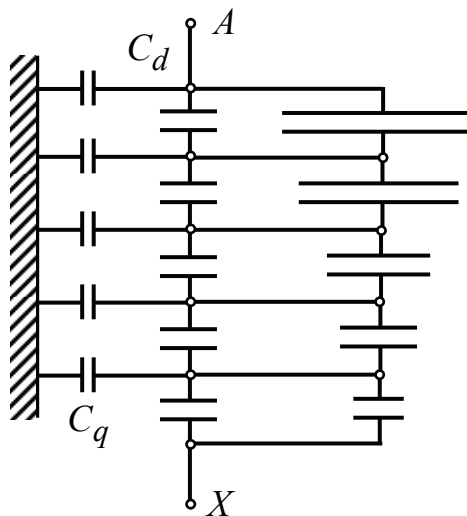


Рис. 8.10. Схема замещения грозупорного трансформатора

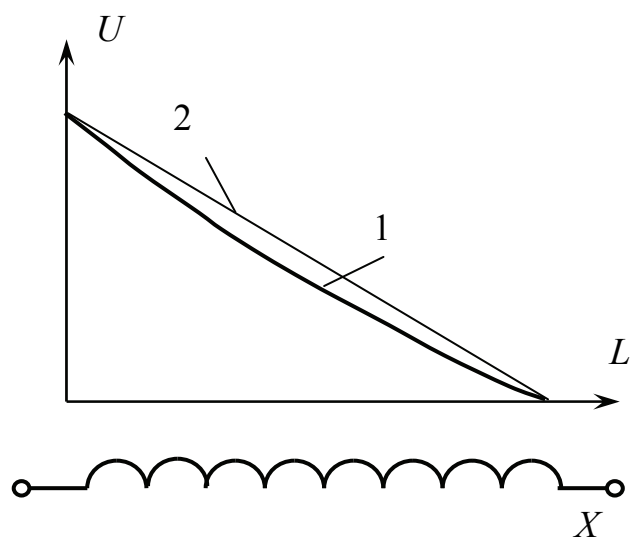


Рис. 8.11. Распределение напряжения в грозоупорном трансформаторе

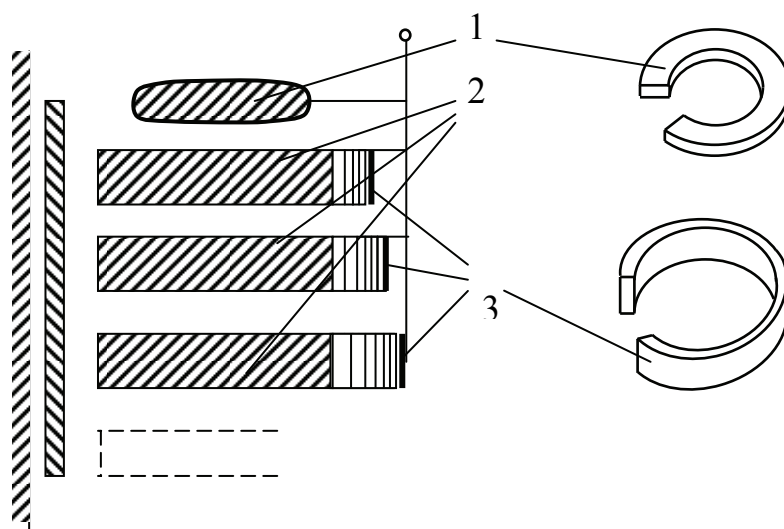


Рис. 8.12. Установка защитных экранов в грозоупорном трансформаторе

Для увеличения грозоупорности трансформатора усиливают изоляцию крайних (с обеих сторон обмотки) витков (в трансформаторах класса напряжений до 20 кВ) или искусственно перераспределяют емкости обмотки (рис. 8.10). Для уменьшения падения напряжения на участ-

ке первых витков надо уменьшить сопротивление этого участка, увеличив его емкость ($x_c = 1/\omega C$). Так же следует подобрать и емкостные сопротивления остальных групп витков (рис. 8.10). В искусственно созданной таким образом схеме разрядный ток потечет по поперечным и продольным емкостям, значительно приблизив кривую начального распределения напряжения (кривая 1, рис. 8.11) к установившемуся (кривая 2, рис. 8.11).

В качестве дополнительной емкости в продольной цепи используют защитные кольца 1, незамкнутые экраны 3 (рис. 8.12), прибандажированные к катушкам 2. Разное удаление экранов от катушек обеспечивает нужные величины емкостей.

Защитные кольца и экраны предупреждают колебательные процессы в трансформаторах при действиях волн перенапряжения. Трансформаторы с искусственным перераспределением емкостей называют *грозоупорными*, или *нерезонирующими*. Выполняют такие трансформаторы для напряжений 35 кВ и выше.

Таким образом, переходные процессы в трансформаторах являются наиболее тяжелыми режимами работы. Существующие защитные устройства способны отключить трансформатор большой мощности от сети за время не менее 0,05–0,1 с. В то же время ток короткого замыкания в трансформаторе достигает максимального (ударного) значения за 0,01 с. Еще меньше время нарастания перенапряжения в трансформаторе при грозовом разряде. Следовательно, трансформатор следует рассчитать таким образом, чтобы он был в состоянии выдерживать тяжелые переходные процессы без отрицательных последствий. Необходимо установить защитную аппаратуру, способную за короткое время отключить трансформатор от сети с целью уменьшения времени протекания токов установившегося короткого замыкания и воздействия перенапряжений на изоляцию обмоток. Грамотно выбранная величина максимальной токовой отсечки автоматического выключателя исключит ложное срабатывание защиты при повышенных токах включения трансформатора в сеть.

9. РАЗНОВИДНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

9.1. Автотрансформаторы

В рассмотренных выше двухобмоточных трансформаторах первичные и вторичные обмотки имеют между собой только магнитную связь. В ряде случаев вместо таких трансформаторов экономически целесообразно применять трансформаторы, в которых первичные и вторичные обмотки имеют еще и электрическую связь. Такие трансформаторы называют автотрансформаторами. Переход от двухобмоточного трансформатора к автотрансформатору показан на рис. 9.1. Поставленная в двухобмоточном трансформаторе (рис. 9.1, *а*) между концами обмоток перемычка $x - X$ не изменит его работу (рис. 9.1, *б*). Не вызовет изменения линейных токов и напряжений также перемычка $A1 - a$, если числа витков на участках ax (рис. 9.1, *в*) и $A1 - X$ одинаковы и точки $A1$ и a равнопотенциальны.

Можно исключить из работы обмотку ax и осуществить переход от двухобмоточного трансформатора к однообмоточному, или *автотрансформатору* (рис. 9.1, *г*).

Автотрансформатор может служить как для понижения, так и для повышения напряжения. В первом случае сеть с напряжением U_1 (рис. 8.1, *г*) является первичной и энергия поступает из этой сети в сеть с напряжением U_2 (понижающий автотрансформатор), во втором случае первичной является сеть с напряжением U_2 и направление передачи энергии меняется на противоположное.

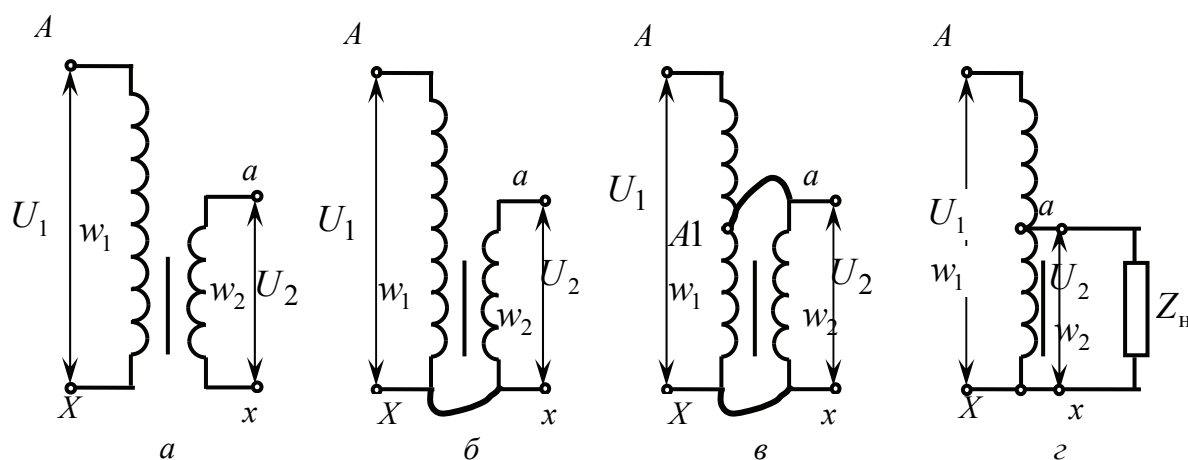


Рис. 9.1. Схема двухобмоточного (*а*) трансформатора и автотрансформатора (*г*)

Вторичный ток автотрансформатора, как всякий индуцированный ток, направлен против первичного, и на участке ax (рис. 9.2) действует геометрическая сумма токов:

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (9.1)$$

В понижающем автотрансформаторе $I_2 > I_1$. С некоторым приближением можно записать:

$$I_{ax} = I_2 - I_1 \quad \text{или} \quad I_2 = I_1 + I_{ax}, \quad (9.2)$$

и сделать вывод, что вторичный ток автотрансформатора формируется из двух токов:

- 1) I_1 , поступающего из одной сети в другую непосредственно (электрическим путем);
- 2) I_{ax} , передающегося электромагнитным путем.

Мощность вторичной цепи автотрансформатора по аналогии с (9.2):

$$P_2 = P_3 + P_{эм}, \quad (9.3)$$

где мощность, непосредственно поступающая в сеть вторичной обмотки (электрическая),

$$P_3 = U_2 I_1 = U_2 \frac{1}{k_T} I_2 = \frac{1}{k_T} P_2 \quad (9.4)$$

и мощность, передающаяся электромагнитным путем,

$$P_{эм} = P_2 - P_3 = P_2 - \frac{1}{k_T} P_2 = P_2 \left(1 - \frac{1}{k_T}\right). \quad (9.5)$$

Уравнение (9.5) показывает, что электромагнитная (внутренняя, расчетная) мощность, определяющая сечение магнитопровода, а значит, габариты и массу всего трансформатора, в автотрансформаторе в $\frac{1}{1 - 1/k_T}$ раз меньше такой вторичной мощности двухобмоточного трансформатора.

Вследствие этого автотрансформатор меньше, легче и дешевле двухобмоточного трансформатора. Разница в массе и стоимости тем больше,

чем ближе коэффициент трансформации к единице. При $k_T > 3$ автотрансформаторы свое преимущество теряют.

Активное и индуктивное сопротивления обмоток автотрансформатора, падения напряжения на них (следовательно, и напряжения короткого замыкания) и потери мощности в $\frac{1}{1-1/k_T}$ раз меньше, чем у двухобмоточного трансформатора такой же мощности. Токи короткого замыкания – соответственно, больше. При коротком замыкании наблюдается значительное перенасыщение магнитопровода автотрансформатора и увеличение его тока холостого хода, так как с замыканием накоротко обмотки $a-x$ или $A-X$ (рис. 9.2) напряжение на обмотке $A-a$ возрастает со значения $U_1 - U_2$ до U_1 .

Существенным недостатком автотрансформатора является возможность появления высокого напряжения на стороне низкого из-за электрической связи между обмотками (из-за отсутствия гальванической развязки между обмотками, характерной для двухобмоточного трансформатора), что опасно для оборудования и обслуживающего персонала. Из-за электрической связи обмоток изоляция сети низшего напряжения автотрансформатора должна быть такой же, как на обмотке высшего напряжения.

Автотрансформаторы изготавливаются однофазными и трехфазными. Схемы трехфазных автотрансформаторов показаны на рис. 9.3.

Конструктивно автотрансформаторы не отличаются от двухобмоточных: на магнитопроводы автотрансформаторов устанавливаются две обмотки (рис. 9.4, а), электрически соединенные одна с другой.

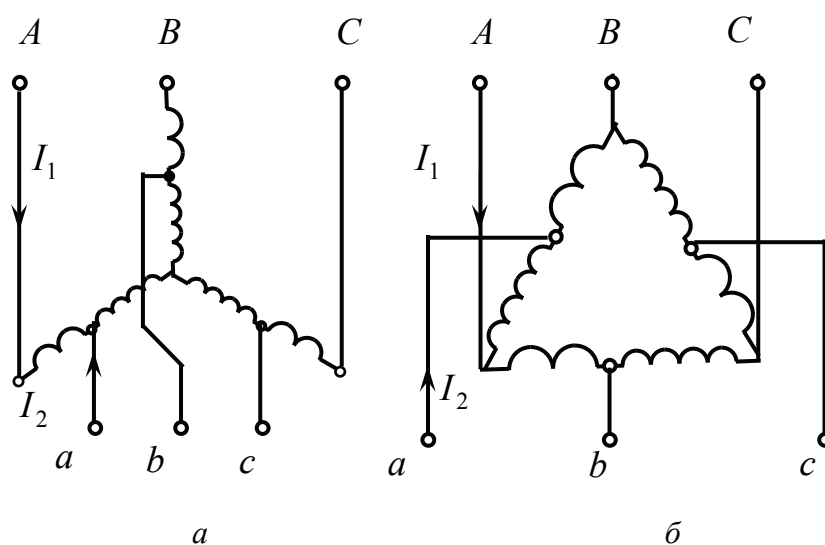


Рис. 9.3. Трехфазный автотрансформатор с соединением обмоток по схеме Y (а) и треугольник (б)

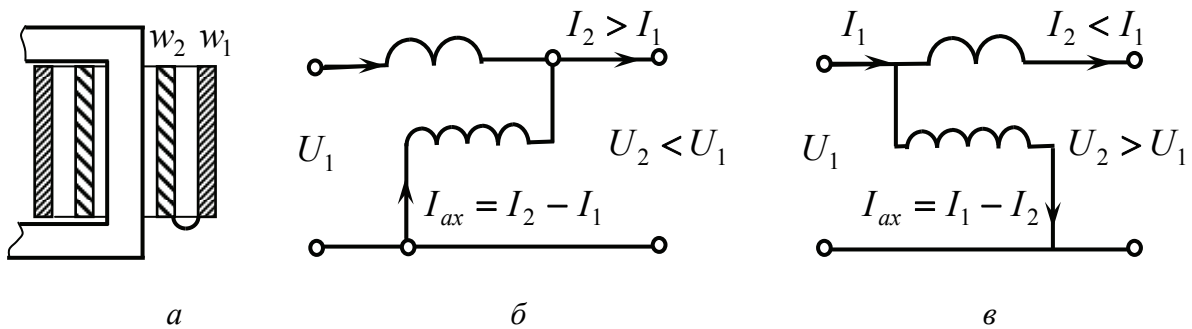


Рис. 9.4. Размещение обмоток (а) и общепринятые схемы понижающего (б) и повышающего (в) автотрансформаторов

В схемах электросетей и подстанций автотрансформаторы изображают так, как показано на рис. 9.4, б (для понижающих) и на рис. 9.5, в (для повышающих).

Повышающие автотрансформаторы называют вольтодобавочными.

9.2. Трехобмоточный трансформатор

Трехобмоточные трансформаторы являются простейшими из многообмоточных. Независимо от числа обмоток, установленных на магнитопроводе, на виток каждой обмотки приходится одно и то же напряжение и каждая пара обмоток способна передавать энергию из одной сети в другую (рис. 9.5 а, б).

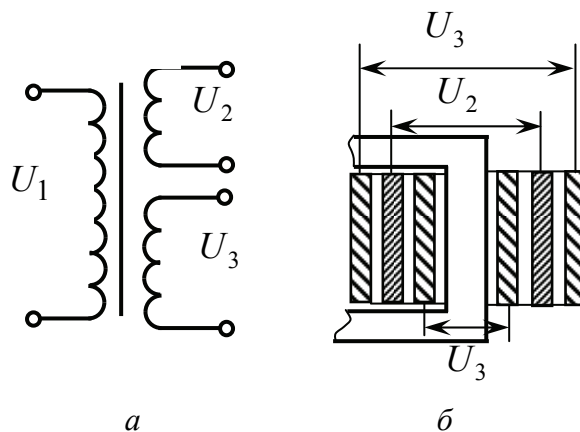


Рис. 9.5. Расположение обмоток в трехобмоточном трансформаторе

Отличительной чертой работы трехобмоточного трансформатора является зависимость напряжения одной из его вторичных обмоток от нагрузки другой. При увеличении нагрузки одной вторичной обмотки увеличивается ток в первичной обмотке и падение напряжения $\Delta u = I_1 Z_1$.

Намагничивающий ток I_0 и поток Φ_m несколько уменьшается, а следовательно, уменьшается и напряжение на обеих (или всех) вторичных обмотках, включая даже ту, которая работает вхолостую.

По этой причине возможно самопроизвольное перераспределение мощности между параллельно работающими трех- и многообмоточными трансформаторами.

Тем не менее трехобмоточные трансформаторы получили достаточно широкое распространение: один такой трансформатор легче и дешевле двух обычных двухобмоточных трансформаторов. Их используют на электрических станциях и подстанциях для питания распределительных сетей с различными номинальными напряжениями, что позволяет достичь экономии и капитальных затрат за счет установки меньшего числа трансформаторов.

При разном числе витков в обмотках трансформатор имеет три коэффициента трансформации:

$$\text{между обмотками 1 и 2} - k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}; \quad (9.6a)$$

$$\text{между обмотками 1 и 3} - k_{13} = \frac{w_1}{w_3} = \frac{U_1}{U_3}; \quad (9.6б)$$

$$\text{между обмотками 2 и 3} - k_{23} = \frac{w_2}{w_3} = \frac{U_2}{U_3}. \quad (9.6в)$$

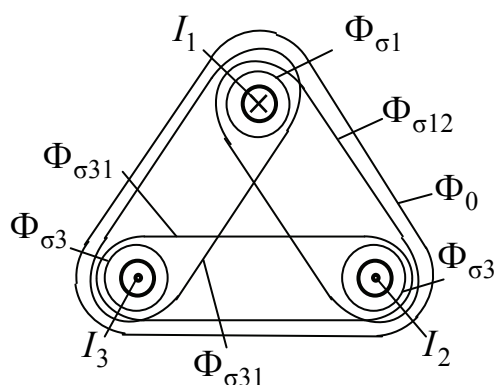


Рис. 9.6. Распределение магнитных потоков

Следует отметить, что вследствие наличия дополнительных потоков рассеяния (рис. 9.6) индуктивное сопротивление рассеяния обмотки, расположенной между двумя другими, близко к нулю или имеет небольшое отрицательное значение, что эквивалентно емкостному. Мощности обмоток трехобмоточного трансформатора:

$$S_1 = m U_1 I_1; S_2 = m U_2 I_2; S_3 = m U_3 I_3 \quad (9.7)$$

в случае, если обмотка 1 является первичной, находятся в соотношении

$$S_1 \leq S_2 + S_3,$$

так как коэффициенты мощности $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi_3$ обычно различны, токи I_2 и I_3 сдвинуты по фазе и поэтому $I_1 < I_2 + I_3$.

Практикуется изготовление трансформаторов со следующими вариантами соотношений номинальных мощностей трех обмоток:

- 1) 100 %, 100 %, 100 %;
- 2) 100 %, 100 %, 67 %;
- 3) 100 %, 67 %, 100 %;
- 4) 100 %, 67 %, 67 %.

Трехфазные трансформаторы выполняют с группами соединений $Y_0 / Y_0 / D-0-11$ или $Y_0 / D / D-11-11$.

Трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками и одной вторичной изготавливаются для установки на мощных электростанциях. Их первичные обмотки выполнены на номинальное напряжение, и к ним присоединяются по одному мощному генератору, а вторичная обмотка, имеющая две параллельные ветви, соединяется через подстанцию с линиями передачи. Трансформаторы выполняют однофазными и соединяют в трехфазную группу.

9.3. Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Для измерения тока в установках высокого напряжения и изоляции измерительных приборов и устройств релейной защиты от высокого напряжения служат трансформаторы тока (ТТ). Через первичную обмотку пропускают первичный ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам. Первичная обмотка изолирована от вторичной в соответствии с классом изоляции прибора (на полное напряжение). В многопредельных измерительных приборах трансформаторы тока служат для расширения пределов измерения. Схема включения ТТ и расположение его обмоток на магнитопроводе при положительном направлении токов в обмотках приведены на рис. 9.7, а, б соответственно.

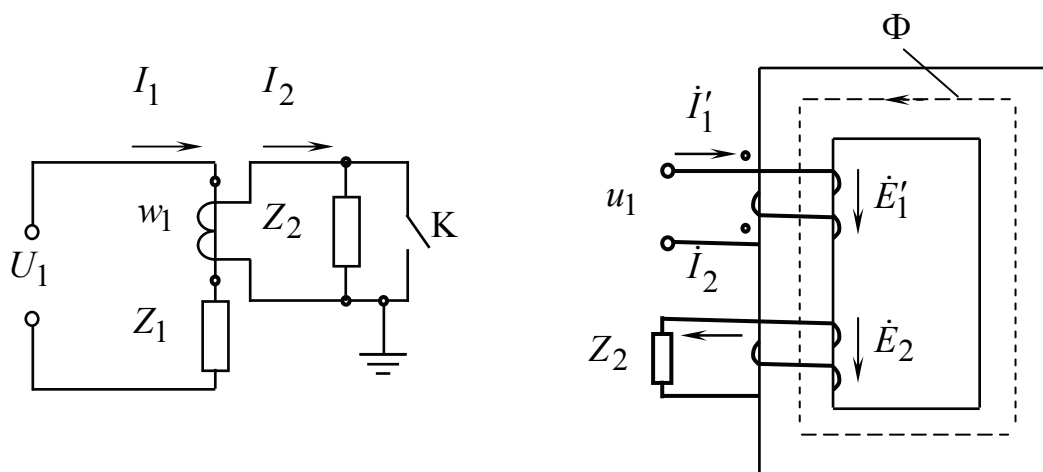


Рис. 9.7. Схема включения ТТ (а) и его электромагнитная схема (б)

Первичная обмотка w_1 включается в цепь последовательно с нагрузкой Z_1 . Начало вторичной обмотки присоединяется к нагрузке Z_2 , в качестве которой может служить амперметр. При замене нагрузки Z_2 или размыкании цепи нагрузки включается контакт K для избежания режима разомкнутой обмотки, который для ТТ является аварийным.

Последнее объясняется большим различием числа витков обмоток: первичной w_1 , в качестве которой может быть часть шинпровода ($w_1 = 0,5$), и вторичной w_2 , составляющей несколько десятков витков. Вследствие этого, наводимая в разомкнутой вторичной обмотке ЭДС опасна для целостности ее изоляции. В трансформаторе тока неизбежны токовые (ΔI , %) и угловые погрешности (δ , мин), так как наличие намагничивающих токов исключают равенство первичных I_1 и вторичных I_2 (фактических и измеренных) токов и приводит к некоторому углу сдвига между токами (рис. 9.8).

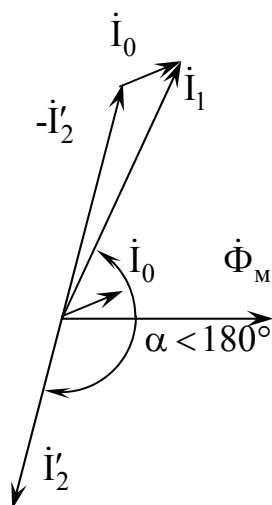


Рис. 9.8. Диаграмма токов ТТ

В зависимости от величины погрешностей, согласно ГОСТ 7746-78, установлены шесть классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10. Для уменьшения погрешности ТТ измерительные трансформаторы проектируют с весьма малой магнитной индукцией в магнитопроводе (0,08 – 0,1 Тл, против 1,2–1,7 Тл в силовых трансформаторах).

В зависимости от назначения и места размещения ТТ выпускают для внутренней установки (в том числе встроенные), работающие в закрытых распределительных устройствах, и наружной, подвергающиеся воздействию дождя, снега, пыли. Их номинальные напряжения достигают 330 кВ и выше, а токи до 4000 А.

Трансформатор напряжения (ТН) служит для преобразования высокого напряжения в низкое стандартное значение (100 или $10\sqrt{3}$, В), удобное для измерения. ТН позволяет изолировать измерительные цепи и цепи релейной защиты от цепей высокого напряжения. Первичная обмотка ТН изолируется от вторичной соответственно классу напряжения. Для безопасности обслуживания приборов один конец вторичной обмотки заземляется. На рис. 9.9, а представлена схема включения однофазного ТН, а на рис. 9.9, б – расположение его обмоток на магнитопроводе с условным положительным направлением электрических величин.

Основным параметром ТН является коэффициент трансформации – отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному:

$$k_{\text{н}} = \frac{U_{1\text{н}}}{U_{2\text{н}}}. \quad (9.8)$$

Как и трансформаторы тока, ТН при работе имеют погрешности: угловую погрешность (векторы напряжений U_1 и U'_2 не совпадают по фазе) и погрешность по напряжению, определяемую как

$$\Delta U = \frac{U_2 k_{\text{н}} - U_1}{U_1}. \quad (9.9)$$

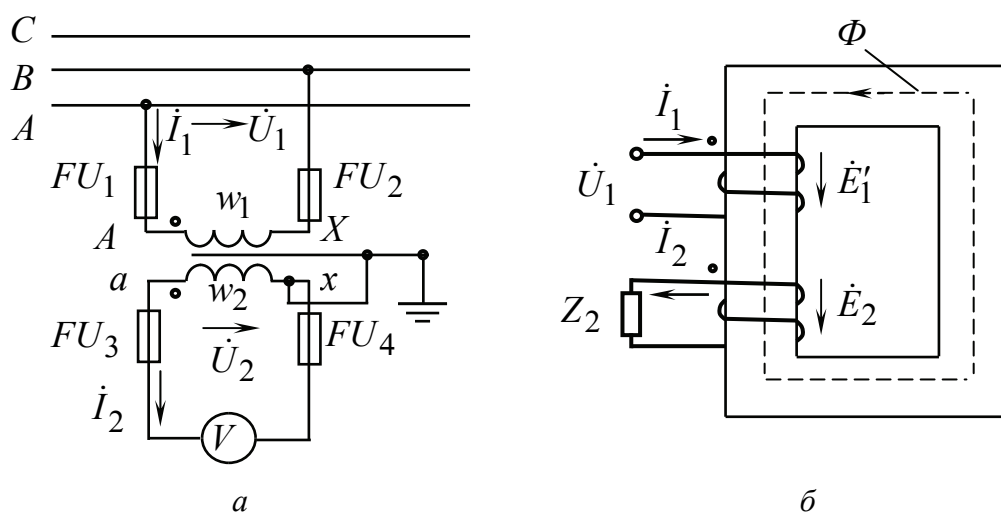


Рис. 9.9. Схема включения ТН (а) и его электромагнитная схема (б)

В зависимости от величины погрешностей ТН, согласно ГОСТ 1983-77, выпускают на определенные классы точности: 0,5; 1; 3, соответствующие максимальной погрешности в процентах от номинального напряжения. Трансформаторы напряжения выпускают в однофазном и трехфазном исполнении.

Измерительные трансформаторы допускают значительную перегрузку, но точность их работы при этом ухудшается.

9.4. Сварочные трансформаторы

Для электрической дуговой сварки применяют трансформаторы с вторичным напряжением, обеспечивающим надежное зажигание и устойчивое горение дуги. Для этого внешняя характеристика $U_2 = f(I_2)$ сварочного трансформатора должна быть крутопадающей. Это благоприятно влияет на ограничение токов короткого замыкания, неизбежных при работе трансформатора (в момент образования дуги) и обеспечивает поддержание постоянной величины тока при различных режимах горения дуги. Для ручной сварки используют трансформаторы с напряжением холостого хода 60–75 В и при номинальной нагрузке – 30 В.

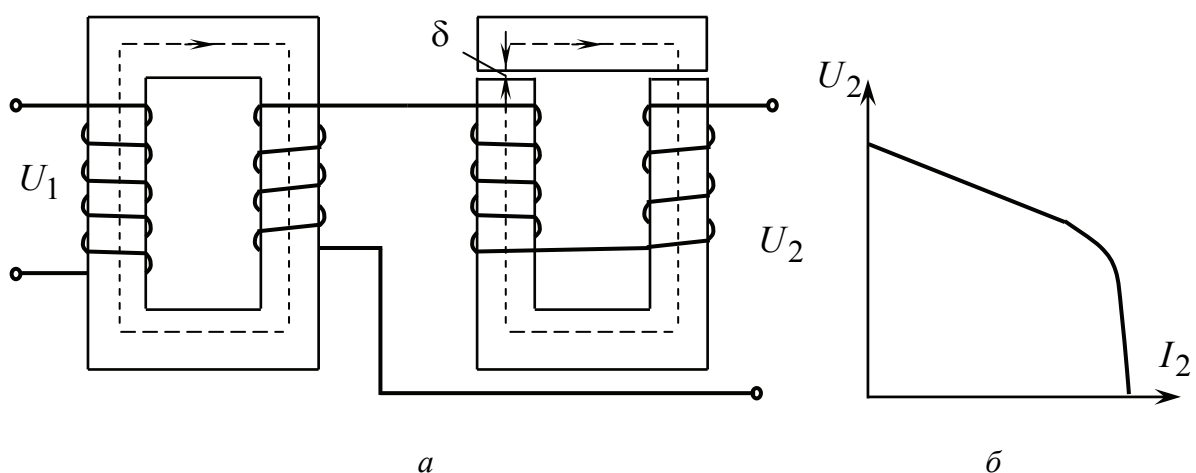


Рис. 9.10. Сварочный трансформатор с дросселем (а) и его внешняя характеристика (б)

Крутизна характеристики обеспечивается искусственным увеличением реактивного сопротивления обмоток, чаще всего путем последовательного включения с нагрузкой дросселя с регулируемым воздушным зазором (рис. 9.10, *а*). При уменьшении зазора δ в магнитной цепи катушки ее индуктивность возрастает, а крутизна внешней характеристики увеличивается (рис. 9.10, *б*).

В последние годы в связи с бурным развитием электроники, в особенности новых типов транзисторов, появился ряд новых сварочных устройств, не применяющих трансформаторы. Тем не менее сварочные трансформаторы широко используют в мощных сварочных установках и для различных сборочных технологических линий.

Несмотря на различие в назначении и потребительских свойствах, рассмотренные в данной главе трансформаторы по принципу своего действия не отличаются от рассмотренных выше трансформаторов общего назначения, подчиняются тем же основным законам электродинамики.

10. ТРАНСФОРМАТОРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

10.1. Классификация трансформаторов преобразовательных установок

Трансформаторы преобразовательных установок, осуществляющих преобразования переменного тока в постоянный в выпрямительных установках и постоянного тока в переменный в инверторных установках, практически полностью заменили применявшиеся ранее электромашинные преобразователи. Преобразовательные трансформаторы работают, как правило, при несинусоидальных токах обмоток. Расчет и проектирование таких трансформаторов значительно изменяется в зависимости от применяемой преобразовательной схемы. При относительно небольших напряжениях обмоток в некоторых из них циркулируют значительные токи, достигающие сотен килоампер.

Силовые трансформаторы, входящие в состав преобразовательных установок, в значительной степени определяют энергетические показатели этих установок, поскольку потери в них составляют до 50 % потерь мощности всей установки. (Общие потери мощности всей установки не превышают 5 % потребляемой установкой мощности). Примерная структурная схема преобразовательной установки приведена на рис. 10.1.

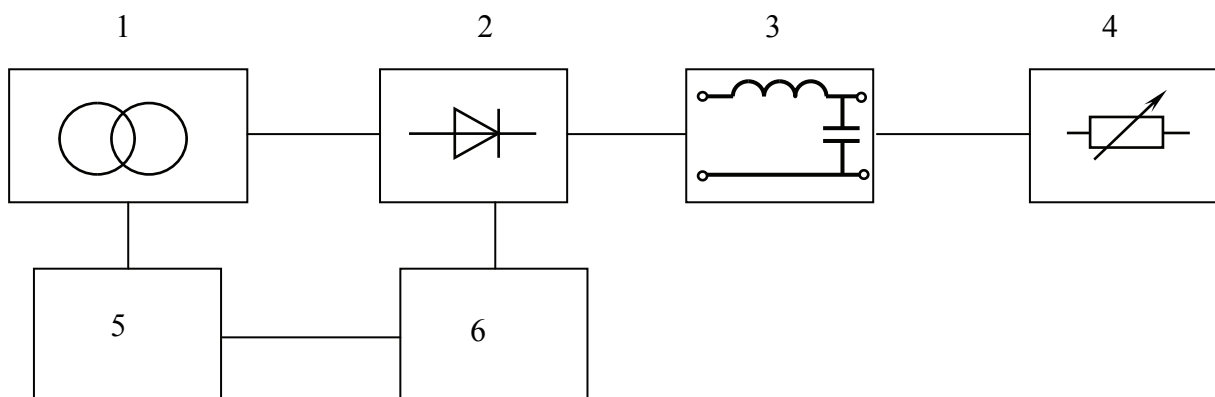


Рис. 10.1. Структурная схема преобразовательной установки:
1 – трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – сглаживающий фильтр;
4 – нагрузка; 5, 6 – блоки фазового регулирования

В нее помимо трансформатора входит большое количество дополнительного оборудования: уравнительные реакторы, анодные делители, дроссели насыщения, стабилизирующие устройства.

Область применения трансформаторов преобразовательных установок весьма многогранна:

- электролизные установки в цветной и химической промышленности;
- электропривод постоянного тока;
- электрифицированный железнодорожный, городской и промышленный транспорт;
- вакуумные, дуговые и плазмотронные электрические печи;
- линии электропередач постоянного тока;
- статическое возбуждение крупных синхронных машин.

В преобразовательных трансформаторах обмотки, к которым подводится сетевое питающее напряжение, называют сетевыми, а вторичные обмотки, соединяемые с вентильными схемами, – вентильными или схемными обмотками.

В трехфазных преобразовательных трансформаторах сетевые обмотки соединяют в звезду или треугольник. Для вентильных обмоток различные схемы: разомкнутые или лучевые – простая и двойная звезда, простой или двойной зигзаг и замкнутые – треугольник и шестиугольник.

10.2. Особенности процессов и схем преобразовательных установок

Чаще всего преобразовательные установки питаются от сети трехфазного тока, что позволяет получить трех-, шести- или двенадцатифазное выпрямление и уменьшить пульсации выпрямленного напряжения. Подключенные к вторичным обмоткам преобразовательного трансформатора неуправляемые вентили – диоды (B_1, B_2, B_3) – проводят ток поочередно, соединяя с нагрузкой обмотки тех фаз, мгновенные значения напряжений которых выше мгновенных значений остальных фаз (рис. 10.2). Эти вентили находятся в открытом состоянии, а остальные вентили – закрыты, т. е. находятся под обратным напряжением. При использовании управляемых вентилей (например, тиристоров), открывающихся при подаче управляющих импульсов на соответствующие электроды, возможна задержка включения того прибора, через который к нагрузке подводится напряжение обмотки с наибольшим потенциалом.

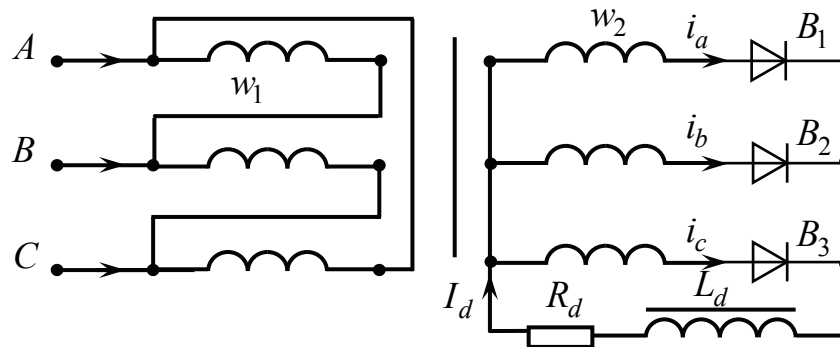


Рис. 10.2. Трехфазная схема выпрямления со средней точкой

Перевод тока выпрямителя из одного вентиля в другой в процессе очередной работы вентилей называется процессом коммутации. Длительность процесса коммутации тока между включаемым и вступающим в работу вентилем определяется значением индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, не допускающим мгновенного перехода тока нагрузки преобразователя с одного вентиля на другой. Выпрямленный ток становится равным сумме токов двух фаз или вентилей, а ЭДС вентильных обмоток прикладывается через вентили к индуктивностям рассеяния вторичных обмоток.

Под действием ЭДС контура коммутации ток первого вентиля уменьшается, а ток второго вентиля возрастает. По окончании коммутации весь ток проходит по второму вентилю, а первый находится под обратным напряжением. В зависимости от индуктивностей обмоток трансформатора возможно увеличение длительности интервала коммутации, когда к началу коммутации следующих вентилей не заканчивается коммутация предыдущих вентилей (рис. 10.3).

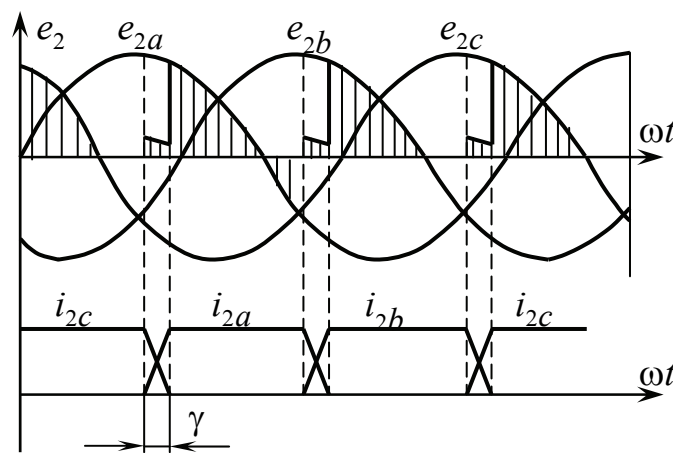


Рис. 10.3. Временные диаграммы процесса коммутации

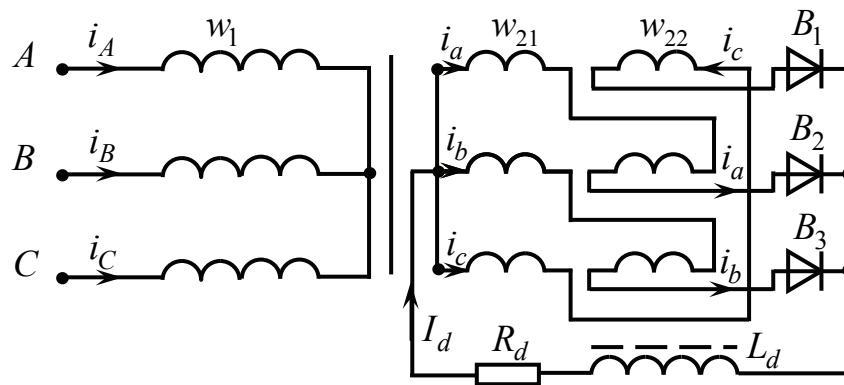


Рис. 10.4 Трехфазная схема выпрямления со средней точкой при схеме Y/Z

Это явление называют простым перекрытием, время и угол (γ) которого зависят от индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора и тока нагрузки преобразователя. При коммутационном перекрытии возникает междуфазное короткое замыкание. Коммутационный ток ограничивается активным и индуктивным сопротивлениями вентильных обмоток трансформатора. Для эффективного ограничения этих токов и тока короткого замыкания трансформаторы вентильных преобразователей выпускают с большим напряжением короткого замыкания (до 20 %, против 4–6 % у силовых трансформаторов общего назначения).

Трехфазную схему с нулевой точкой (рис. 10.2) применяют в установках средней мощности. Для ослабления воздействия на трансформатор постоянных составляющих токов вентильных обмоток, его сетевые обмотки соединяют в треугольник, хотя и в этом случае остается постоянная составляющая токов вентильных обмоток, создающих в магнитопроводе трансформатора постоянный по направлению избыточный поток вынужденного намагничивания. Этот поток проходит по всем стержням, замыкаясь между ярами по воздуху и баку трансформатора, и вызывает рост добавочных потерь.

Появление потока вынужденного намагничивания исключают, соединяя вентильные обмотки в схему зигзаг (рис. 10.4). При проходе тока вентиля через две части вентильной обмотки, расположенные на стержнях различных фаз, не создается однонаправленной МДС и потока вынужденного намагничивания. Эта схема позволяет увеличить типовую мощность трансформатора.

При большой мощности преобразовательных установок трехфазные схемы не обеспечивают требуемого качества преобразования. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения в этом случае приходится значительно увеличивать сглаживающий реактор.

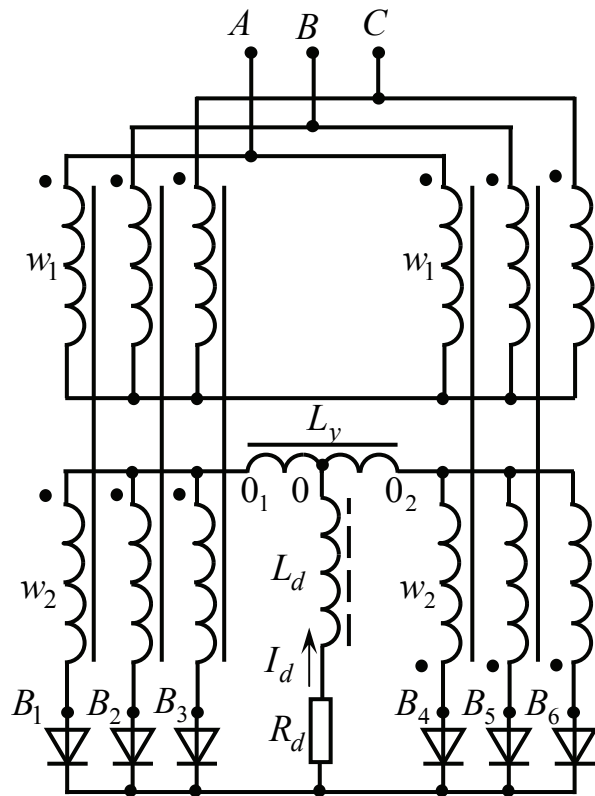


Рис. 10.5. Шестифазная схема
«звезда – две взаимно обратные звезды
с уравнильным реактором»

Целесообразнее установки мощностью свыше 250 кВА выполнять по эквивалентным шестифазным и даже двенадцатифазным схемам.

Схема преобразовательной установки с шестифазной схемой выпрямления показана на рис. 10.5. Сетевая обмотка соединена в шестифазную звезду, а вентильная – в две обратных звезды с уравнильным реактором, нулевые точки звезд связаны между собой через однофазный уравнильный реактор с ферромагнитным сердечником. Большое индуктивное сопротивление реактора для контурного тока двух вентильных групп обусловлено согласным включением двух частей обмоток. Уравнильный реактор выравнивает мгновенные значения анодных напряжений, подводимых к первой и второй группам вентилей, и, благодаря большому индуктивному сопротивлению, обеспечивает деление тока нагрузки выпрямителя.

Шестифазную схему с уравнильным реактором применяют в преобразовательных установках с относительно низким выпрямленным напряжением и большим током, поскольку ток нагрузки разветвляется по двум параллельным ветвям, состоящим из вентильных обмоток, вентилей и секций уравнильного реактора.

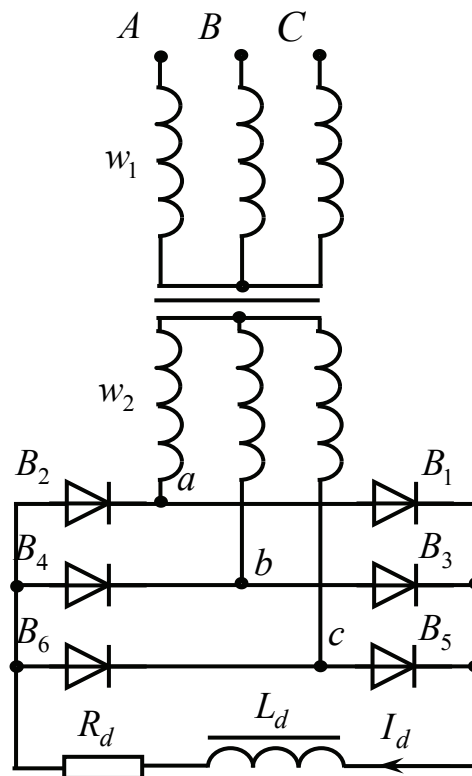


Рис. 10.6. Трехфазная мостовая схема выпрямления

Уменьшить расчетную мощность преобразовательного трансформатора позволяют мостовые схемы выпрямления (рис. 10.6). Мостовые схемы, питающиеся от сложных схем вентильных обмоток, суммирующих простые схемы, сохраняют достоинства простых схем и позволяют значительно улучшить форму тока, потребляемого из сети первичной обмоткой, а также уменьшить пульсации выпрямленного напряжения. В мостовой схеме падение напряжения на вентильных обмотках выше из-за наличия в контуре неразветвляющегося тока нагрузки двух последовательно включенных вентилей моста. Поэтому мостовую схему применяют при относительно больших выпрямленных напряжениях (от 100 В) и малых токах.

Стремительное развитие электронной техники, микропроцессорных систем управления позволяет шире применять трансформаторы в выпрямительных схемах, находить новые прогрессивные решения, повышающие надежность и снижающие стоимость установок. В главе даны принципы процессов и схем преобразовательных установок. В последующих курсах (электропривод, электрическая тяга, электротехнологические устройства) сведения о совместной работе трансформатора и управляемого выпрямителя будут дополнены подробными схемными решениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие производительных сил современного общества немислимо без все возрастающего производства и потребления электрической энергии. Передача электрической энергии на большие расстояния невозможна без применения трансформаторов. Поскольку в энергосистемах происходит многократное от 3 до 5 раз преобразование величины напряжения (см. 1-ю главу), осуществляемое трансформаторами, то с целью снижения потерь электроэнергии трансформаторам необходим высокий КПД (в современных сверхмощных трансформаторах он доведен до 99,7 %, и это еще не предел). Это достигается, с одной стороны, совершенствованием методов расчета, оптимизации параметров, с другой, – повышением качества активных материалов: стали магнитопроводов, проводниковых материалов, изоляции. Чем выше мощность любого преобразователя, тем выше может быть достигнут его КПД. Поэтому мощность современных трансформаторов достигает 2000 МВт при напряжениях 500 кВ, 750 кВ и даже 1150 кВ.

Производство таких трансформаторов стало возможным благодаря развитию теории электромагнитных процессов в трансформаторе, применению современных компьютерных технологий как на стадии проектирования, так и на стадии производства. С применением этих технологий повышается надежность изделия, так необходимая для такого ответственного устройства передачи электроэнергии, как трансформатор.

При эксплуатации трансформаторов необходимо соблюдать рекомендуемые режимы их работы, не допускать перегрузки, несимметричных режимов, являющихся зачастую аварийными, своевременно проводить регламентные работы, с целью продления службы дорогого электрооборудования.

Успехи инженеров-электриков в разработках новых и модификации уже выпускаемых трансформаторов, успешная многолетняя их эксплуатация могут быть обеспечены только при глубоком знании теории электромагнитного и электромеханического преобразования энергии, особенностей работы трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., Логос, 2006. – 680 с.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 320 с.
4. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины : учеб. для электротехн. спец. вузов / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высш. шк., 1990. – 528 с.
5. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы : учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселёв, Н. А. Акимова. – М. : Высш. шк., 1989. – 352 с.
6. Встовский, А. Л. Проектирование трансформаторов : учеб. пособие / А. Л. Встовский, Л. Ф. Силин, С. А. Встовский. – Красноярск: КГТУ, 2000. – 113 с.
7. Силин, Л. Ф. Электрические машины. Конструирование магнитопроводов силовых трансформаторов : учеб. пособие / Л. Ф. Силин, С. И. Мурашкин – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 82 с.
8. Силин, Л. Ф. Электрические машины. Вспомогательное оборудование масляных трансформаторов : учеб. пособие / Л. Ф. Силин, С. И. Мурашкин – Красноярск : Сиб.федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – 111 с.
9. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учеб. для вузов / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 1999. – 638 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Введение в электромеханику	5
1.1. Общие сведения о электромеханических преобразователях энергии	5
1.2. Классификация электрических машин	7
1.3. Основопологающие законы электромеханического преобразования энергии в индуктивных электрических машинах	10
1.4. Материалы, применяемые в электромашиностроении	17
1.5. Назначение и область применения трансформаторов.....	22
2. Основные сведения о трансформаторах	24
2.1. Принцип действия трансформатора.....	24
2.2. Устройство трансформаторов.....	34
2.3. Виды трансформаторов и магнитопроводов	39
2.4. Типы и конструкция обмоток	45
2.5. Схемы и группы соединения трансформаторов	47
3. Намагничивание магнитопроводов трансформаторов	53
3.1. Расчет магнитной цепи, намагничивающий ток и ток холостого хода	53
3.2. Форма намагничивающего тока и магнитного потока однофазного трансформатора	58
3.3. Особенности намагничивания трехфазных трансформаторов.....	61
4. Схемы замещения трансформатора.....	66
4.1. Уравнения напряжения и векторные диаграммы трансформатора ...	66
4.2. Приведение вторичной обмотки трансформатора к первичной. Схема замещения трансформатора	70
4.3. Опыт холостого хода	74
4.4. Опыт короткого замыкания.....	78
5. Работа трансформатора под нагрузкой.....	84
5.1. Энергетические диаграммы активной и реактивной мощностей трансформатора	84
5.2. Коэффициент полезного действия трансформатора. Зависимость КПД от нагрузки.....	87
5.3. Изменение вторичного напряжения при нагрузке. Внешняя характеристика трансформатора	90
5.4. Регулирование напряжения трансформатора.....	96
6. Параллельная работа трансформаторов.....	101
6.1. Условия параллельной работы трансформаторов	101

6.2. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации	104
6.3. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми группами соединения обмоток	107
6.4. Параллельная работа трансформаторов с различными напряжениями короткого замыкания	109
7. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов	114
7.1. Основные допущения и применение метода симметричных составляющих.....	114
7.2. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y_0	118
7.3. Однофазное короткое замыкание в схеме D/Y_0	126
7.4. Двухфазное короткое замыкание в схемах Y/Y	127
7.5. Работа трансформатора в схеме открытого треугольника.....	129
8. Переходные режимы трансформаторов.....	132
8.1. Включение ненагруженного трансформатора в сеть	132
8.2. Внезапное короткое замыкание	137
8.3. Влияние токов короткого замыкания на работу трансформатора....	142
8.4. Перенапряжения в трансформаторах	143
9. Разновидности трансформаторов	148
9.1. Автотрансформаторы	148
9.2. Трехобмоточный трансформатор	152
9.3. Измерительные трансформаторы тока и напряжения.....	154
9.4. Сварочные трансформаторы	157
10. Трансформаторы преобразовательных установок.....	159
10.1. Классификация трансформаторов преобразовательных установок...	159
10.2. Особенности процессов и схем преобразовательных установок.....	160
Заключение	165
Библиографический список.....	166