

ГЛАВА I

ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 5. МАГНИТОПРОВОДЫ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для изготовления магнитопроводов трансформаторов используют высоколегированные горячекатаные стали Э-41, Э-42 и Э-43 и повышенолегированные холоднокатаные стали Э-310, Э-320, Э-330 и др. Магнитопроводы собирают из отдельных пластин, изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи лаком, окалиной или химическим способом. Иногда магнитопроводы малых трансформаторов наматывают из стальной ленты на специальных приспособлениях в виде плоских спиралей.

При частоте тока сети 50 гц для сердечников используют стали марок Э-42, Э-43, Э-43А, Э-330, Э-330А с толщиной листов или ленты 0,5 и 0,35 мм. При повышенных частотах используют стали марок Э-44, Э-45, Э-46, Э-47, Э-48, Э-340 и Э-370 с толщиной пластин или ленты 0,2; 0,15; 0,1; и 0,08 мм.

В обозначении марок электротехнических сталей (ГОСТ 802—58) буквы и цифры означают следующее: буква Э указывает на то, что сталь электротехническая. Первые цифры после буквы (1, 2, 3 и 4) обозначают степень легированности стали (1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — повышенолегированная, 4 — высоколегированная). Вторые цифры указывают гарантированные электромагнитные свойства стали — цифры 1, 2, 3 показывают нормальные (1), пониженные (2) и низкие (3) удельные потери в стали при частоте 50 гц; цифра 4 — нормальные удельные потери при частоте 400 гц; цифры 5 и 6 — нормальную (5) и повышенную (6) магнитную проницаемость в полях менее 0,01 а/см, цифры 7 и 8 — нормальную (7) и повышенную (8) магнитную проницаемость в полях от 0,1 до 1 а/см. Цифра 0 — указывает на то, что сталь холоднокатаная. Буква А после цифры обозначает особенно низкие удельные потери.

Потери в стали магнитопровода складываются из потерь на гистерезис (перемагничивание стали) и потерь на вихревые токи. В ферромагнитных материалах, из которых выполняют магнитопроводы трансформаторов и других электрических аппаратов и машин, магнитная индукция отстает (запаздывает) в своих изменениях от напряженности поля. Перемагничивание магнитного материала связано с затратой энергии, которая проявляется в нагревании перемагничиваемого материала. Чем труднее намагнитить материал, тем обычно труднее его размагнитить и, следовательно, тем большую работу необходимо затратить на перемагничивание.

Таким образом, потери на гистерезис зависят от свойств перемагничиваемого материала магнитопровода. Кроме того, потери на гистерезис зависят от частоты перемагничивания и величины наибольшей магнитной индукции, причем они пропорциональны частоте в первой степени и магнитной индукции примерно во второй степени.

В массе магнитопровода, пронизываемой переменным магнитным полем, возникают вихревые токи. Эти токи, подобные токам от э. д. с. индукции в проводниках, поглощают электрическую энергию, превращая ее в тепло и нагревая массы металла, в котором они возникают.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов и других электромагнитных устройств изготавливают не из сплошных масс, а из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Изоляционные прослойки, оказывая вихревым токам чрезвычайно большое сопротивление, ограничивают сферу их действия небольшими участками и тем самым значительно уменьшают потери электрической энергии. Кроме того, для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы составляют из листов высоколегированной стали, удельное электрическое сопротивление которой значительно больше, чем обычной стали.

Таким образом, потери на вихревые токи зависят от материала магнитопровода, толщины стальных пластин и изоляции между ними. Кроме того, потери на вихревые токи пропорциональны квадратам частоты и магнитной индукции.

Обычно потери на гистерезис и вихревые токи оценивают совместно, называют *потерями в стали* и обозначают $P_{ст}$. Они определяются выражением:

$$P_{ст} = pG_{ст},$$

где p — коэффициент удельных потерь, зависящий от марки стали, толщины стальных листов, частоты и максимальной магнитной индукции, $вт/кг$; $G_{ст}$ — масса магнитопровода, $кг$.

Холоднокатаная сталь отличается от горячекатаной не только меньшими потерями, но и более высокой магнитной проницаемостью. При этом величина магнитной проницаемости зависит от направления магнитных линий. Вдоль направления проката магнитная проницаемость холоднокатаной стали значительно больше магнитной проницаемости горячекатаной стали.

Поперек направления проката магнитная проницаемость холоднокатаной стали низкая. Поэтому магнитопроводы трансформаторов стремятся выполнять так, чтобы магнитный поток замыкался вдоль проката стальных листов или ленты, т. е. магнитные линии замыкались всегда по направлению, совпадающему с направлением проката. Наиболее целесообразно магнитопроводы трансформаторов из холоднокатаной стали изготавливать из ленты, наматываемой на соответствующем шаблоне.

Повышение магнитной проницаемости дает возможность использовать большие значения магнитной индукции. Это приводит к уменьшению поперечного сечения магнитопровода трансформатора и числа витков его обмоток, т. е. уменьшает расход стали и меди. В современных трансформаторах для изготовления магнитопроводов применяют холоднокатаную электрохимическую рулонную сталь марок Э-330 и Э-330А толщиной 0,35 мм с жаростойким изоляционным покрытием.

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем однофазные трансформаторы подразделяют на стержневые и броневые.

Стержневой магнитопровод (рис. 3, а) имеет два стержня, охватываемых обмотками. На каждом стержне магнитопровода помещена катушка, состоящая из половин первичной и вторичной обмоток.

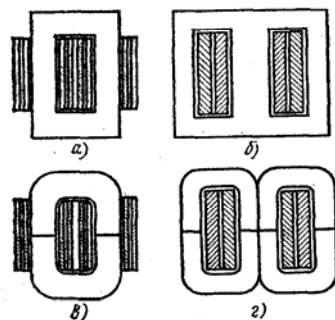


Рис. 3. Схемы устройства трансформаторов:

а — стержневого, б — броневого, в — ленточного стержневого, г — ленточного броневого

Такое расположение обмоток на магнитопроводе обеспечивает лучшую магнитную связь между ними, чем при размещении первичной и вторичной обмоток на различных стержнях, как это условно изображается на схемах. Более хорошая магнитная связь уменьшает изменение вторичного напряжения трансформатора, которые возникают при изменениях его нагрузки.

Половины каждой обмотки, помещенные на правом и левом стержнях магнитопровода, соединяют между собой последовательно, чтобы их намагничивающие силы совпали по направлению.

В трансформаторе броневых типа (рис. 3, б) первичная и вторичная обмотки помещены на среднем стержне магнитопровода. Таким образом, в этом трансформаторе обмотки частично охватываются (бронированы) ярмом.

Магнитный поток, пронизывающий стержень магнитопровода, разветвляется на две части. Поэтому сечение ярма вдвое меньше сечения стержня.

Ленточные сердечники из холоднокатаной стали могут быть также стержневыми (рис. 3, в) и броневыми (рис. 3, г). При сборке трансформатора с ленточным сердечником магнитопровод разрезают, чтобы поместить обмотки на сердечнике; затем верхнюю и нижнюю половины магнитопровода соединяют вместе.

Трансформаторы больших и средних мощностей выполняют стержневыми, так как в броневых трансформаторах обмотки ВН сложно изолировать от магнитопровода. Трансформаторы малой мощности часто выполняют броневыми.

Броневой магнитопровод обладает рядом конструктивных достоинств — один комплект обмоток вместо двух при стержневом магнитопроводе, более высокий коэффициент заполнения окна магнитопровода обмоточным проводом, частичная защита обмотки ярмом от механических повреждений.

Стержневой трансформатор имеет следующие основные достоинства: большая поверхность охлаждения обмотки; малая индуктивность рассеяния вследствие половинного числа витков на каждом стержне и меньшей толщины намотки; меньший расход обмоточного провода, чем у броневых трансформаторов, так как уменьшение толщины намотки вызывает уменьшение средней длины витка обмотки; значительно меньшая, чем в броневом трансформаторе, чувствительность к внешним магнитным полям, так как э. д. с. помех, наводимых в обеих катушках трансформатора, имеют противоположные знаки и взаимно уничтожаются.

Для уменьшения намагничивающего тока магнитопроводы трансформаторов и некоторых случаях делают с расширенным ярмом. В этом случае сечение ярма стержневого трансформатора делают больше сечения стержня, а броневых — больше половины сечения стержня.

Магнитопроводы трансформаторов выполняют стыковыми и шихтованными. На рис. 4, а схематично показана схема сборки стыкового магнитопровода, на рис. 4, б — шихтованного из П-образных стальных пластин. Пластины могут иметь и иную форму (Г-образные, Ш-образные, прямоугольные и т. д.).

При сборке встык сердечник состоит из двух частей, собранных из стальных пластин; после размещения обмоток на магнитопроводе обе части его скрепляют. При шихтовке пластины чередуют так, чтобы у лежащих друг на друге пластин разрезы были с разных сторон сердечника. При этом один слой стальных пластин (например, нечетный) укладывают, как показано сплошной линией, а другой слой (четный) — как показано прерывистой линией.

При стыковых магнитопроводах размещать обмотки на магнитопроводе проще, чем при шихтованных, так как нет необходимости в расшивке верхнего ярма и последующей его повторной шихтовке при сборке трансформатора на заводе, а также при демонтаже его в процессе ремонта.

Однако при установке ярма встык со стержнями практически невозможно осуществить совпадение пластин стержня и ярма. Вследствие этого пластины стержня и ярма окажутся замкнутыми, резко увеличатся вихревые токи, в результате чего значительно увеличатся потери в стали магнитопровода. Это может вызвать недопустимый нагрев стали в местах стыков, при котором пластины

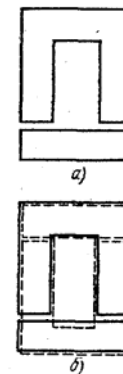


Рис. 4. Схемы сборки магнитопроводов: а — стыкового, б — шихтованного

в месте замыкания сплавятся в сплошную массу («пожар» в стали) и трансформатор выйдет из строя. Поэтому при сборке стыкового магнитопровода между ярмом и стержнем устанавливают прокладку из изоляционного материала. Но установка изоляционных прокладок в местах стыков увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода и, следовательно, увеличивает реактивный намагничивающий ток, потребляемый трансформатором из сети.

При тщательной сборке шихтованного магнитопровода зазоры между пластинами стержня и ярма можно сделать очень малыми, так что магнитное сопротивление магнитопровода будет относительно небольшим.

После сборки магнитопровод стягивают болтами, шпильками или ленточными бандажми. Стяжные планки, болты и т. д. изолируют от тела магнитопровода электрокартоном или бумагой, чтобы предотвратить возможность образования короткозамкнутых витков вокруг магнитопровода или его части. Образование короткозамкнутых витков приводит к аварии.

§ 6. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обмотки трансформаторов изготовляют из меди или алюминия. Так как удельное сопротивление алюминия примерно на 70% больше удельного сопротивления меди, при изготовлении обмоток из алюминиевых проводов поперечное сечение проводов увеличивают по сравнению с сечением медных проводов. Поэтому поверхности охлаждения обмоток из алюминиевых проводов больше, чем из медных, и, следовательно, условия охлаждения трансформатора с алюминиевыми обмотками лучше.

Удельный вес алюминия примерно в три раза меньше удельного веса меди, поэтому, несмотря на увеличение поперечного сечения алюминиевых проводов, обмотки из них будут легче, чем из медных. Алюминий мягок и легко поддается любой деформации, что позволяет легко изгибать алюминиевый провод. Пайка алюминиевые провода менее удобно, чем медные, однако холодная сварка алюминия дешевле пайки медных проводов с припоем.

Для трансформаторов небольшой мощности, т. е. при небольших токах (примерно до 25 а для воздушных и до 45 а для масляных трансформаторов), обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения. Параллельное соединение витков дает возможность применить провод круглого сечения при больших токах в обмотках и облегчает процесс их изготовления. При сравнительно больших мощностях и токах обмотки изготовляют из проводов прямоугольного сечения.

Для изоляции обмоток и других токоведущих частей трансформатора применяют различные изоляционные материалы. Изоляция должна обеспечивать надежную работу трансформатора в условиях его эксплуатации при значительных колебаниях температуры нагрева. В зависимости от нагревостойкости изоляционные материалы согласно ГОСТ 8865—70 разделяются на семь классов со

следующими предельно допускаемыми температурами: класс *У* — 90° С, класс *А* — 105° С, класс *Е* — 120° С, класс *В* — 130° С, класс *Ф* — 155° С, класс *Н* — 180° С, класс *С* — более 180° С.

К классу *У* относят не пропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, а также полимерные органические диэлектрики (полиэтилен, полистирол и др.) с температурой размягчения не ниже 90° — 100° С.

К классу *А* относят волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, пропитанные или погруженные в жид-

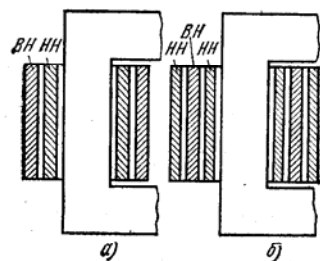


Рис. 5. Схемы концентрических обмоток трансформатора:
а — простая, б — двойная

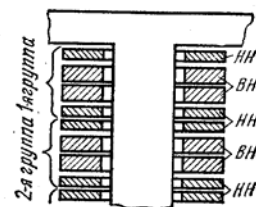


Рис. 6. Схема дисковых чередующихся обмоток

кий диэлектрик; изоляцию эмальпроводов на основе масляных или полиамидных лаков; дерево и древесные слоистые пластики. Пропитывающими веществами для материалов класса *А* являются трансформаторное масло, масляные лаки, битумные составы.

К классу *Е* относят литьевые составы и изоляцию эмальпроводов на основе поливинилацеталевых, полиэфирных, эпоксидных и полиуретановых смол; синтетические материалы.

К классу *В* относят электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков (сланца, асбест, волокнистое стекло), пропитанных лаками или смолами повышенной нагревостойкости. К этому же классу относят пластмассы с неорганическим наполнителем.

К классу *В* относят электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков и пропитанные лаками или смолами, модифицированными кремнийорганическими соединениями.

К классу *Н* относят неорганические электроизоляционные материалы, пропитанные кремнийорганическими лаками или смолами. Такие материалы не содержат связывающих органических материалов с нагревостойкостью ниже 180° С.

К классу С относят неорганические электроизоляционные материалы, изготовленные без применения органических связывающих веществ.

Конструкция обмоток должна обеспечивать хорошее их охлаждение, чтобы температура их нагрева не превышала пределов, установленных для соответствующих классов изоляции. Изоляция обмоток должна выдерживать без повреждений длительное воздействие на нее переменного электрического поля, имеющегося в трансформаторе при нормальной его работе, и кратковременные перенапряжения, возникающие в условиях его эксплуатации. Обмотки трансформаторов должны выдерживать механические воздействия, которым они подвергаются в процессе сборки трансформатора и в условиях эксплуатации при коротких замыканиях.

По способу размещения на магнитопроводе обмотки трансформаторов могут быть концентрическими и чередующимися.

Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на магнитопроводе концентрически. Внутри (ближе к сердечнику) обычно размещают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно стержня магнитопровода, снаружи — обмотку ВН (рис. 5, а). В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления обмоток, т. е. для уменьшения магнитного рассеяния, применяют двойные концентрические обмотки (рис. 5, б), в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Между половинами обмотки НН помещают обмотку ВН. Подобным образом может быть выполнена тройная концентрическая обмотка, в которой обмотка НН состоит из трех частей, а обмотка ВН — из двух. В СССР применяют главным образом концентрические обмотки.

В чередующихся обмотках катушки НН и ВН, изготовленные в виде отдельных секций, размещают на магнитопроводе поочередно (рис. 6). Вся обмотка подразделена на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух (или нескольких) катушек НН. Чередующиеся обмотки на практике встречаются редко и применяются в основном для специальных трансформаторов. При высоких напряжениях эти обмотки не используют из-за сложности изоляции и большого количества промежутков между катушками НН и ВН.

§ 7. МАГНИТНЫЕ ПОТОКИ ТРАНСФОРМАТОРА

При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока по этой обмотке протекает ток, создающий магнитное поле. Большая часть магнитных линий замыкается по стальному магнитопроводу. Эта часть магнитных линий образует основной магнитный поток Φ_0 , который пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток (рис. 7). Некоторая часть магнитных линий замыкается по немагнитной среде, образуя поток рассеяния первичной обмотки Φ_{s1} . Магнитные линии потока рассеяния про-

низируют витки только первичной обмотки и в процессе трансформирования энергии участия не принимают.

При нагрузке трансформатора в его вторичной обмотке протекает ток I_2 , возбуждающий свое магнитное поле. Основной магнитный поток в магнитопроводе трансформатора сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток, поэтому он создается взаимодействием намагничивающих сил или токов этих обмоток.

Часть магнитных линий поля, возбуждаемого током вторичной обмотки, замыкается через немагнитную среду, образуя поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2} . Этот магнитный поток не взаимодействует с потоком первичной обмотки и сцеплен только с витками вторичной обмотки.

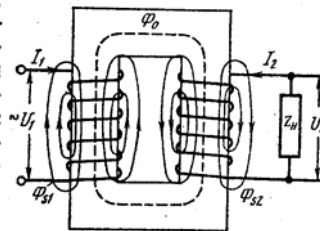


Рис. 7. Схема работы трансформатора

Потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} первичной и вторичной обмоток обычно очень малы по сравнению с основным магнитным потоком, так как магнитные линии потоков рассеяния замыкаются через воздух (или другой изоляционный материал) и встречают на своем пути очень большое магнитное сопротивление, тогда как основной магнитный поток замыкается по стали магнитопровода и встречает на своем пути относительно малое магнитное сопротивление.

Потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток примерно одинаковы и сдвинуты по фазе на угол, близкий к 180° . Основной магнитный поток не совпадает по фазе с потоком рассеяния любой обмотки. Так, при чисто активной нагрузке (рис. 8, а) потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток представляются синусоидами, имеющими одинаковые амплитуды и находящимися в противофазе. Основной магнитный поток изображен синусоидой, сдвинутой относительно синусоид потоков рассеяния на четверть периода. При этом амплитуда основного магнитного потока много больше амплитуд потоков рассеяния.

На рис. 8, б изображена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при чисто активной нагрузке. По вертикальной оси вверх направлен вектор приложенного напряжения U_1 . Амплитуда основного магнитного потока изображена вектором Φ_m , повернутым относительно вектора приложенного напряжения на 90° в сторону отставания. При чисто активной нагрузке трансформатора ток вторичной обмотки I_2 окажется отстающим относительно основного магнитного потока примерно на четверть периода, а ток первичной обмотки I_1 будет близок к совпадению с приложенным напряжением по фазе.

На диаграмме вектор тока вторичной обмотки I_2 изображен повернутым на 90° относительно вектора Φ_m в сторону отставания, а вектор тока первичной обмотки I_1 — совпадающим с вектором U_1 .

Потоки рассеяния совпадают по фазе с токами, их создающими, т. е. вектор Φ_{s1} совпадает с вектором I_1 , а вектор Φ_{s2} с вектором I_2 .

Основной магнитный поток возбуждается намагничивающим током I_μ , протекающим по первичной обмотке трансформатора и совпадающим по фазе с магнитным потоком. Следовательно, намагничивающий ток отстает от приложенного напряжения на 90° по фазе и является чисто реактивным.

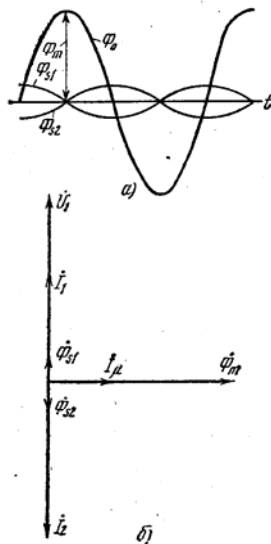


Рис. 8. Волновая (а) и векторная (б) диаграммы магнитных потоков трансформатора

Для возбуждения магнитного потока в магнитопроводе трансформатор потребляет из сети источника энергии реактивный намагничивающий ток I_μ т. е. реактивную намагничивающую мощность $P_\mu = I_\mu U_1$. Эта мощность, не участвуя в процессе трансформирования энергии, снижает коэффициент мощности $\cos \varphi$ и увеличивает габариты трансформатора.

Величина намагничивающего тока зависит от магнитных свойств материала магнитопровода. На рис. 9 показаны магнитные характеристики стали. Чем больше магнитная проницаемость стали, тем выше пройдет магнитная характеристика. Если магнитопровод выполнен из стали с большей магнитной проницаемостью (кривая 1), то для создания в магнитопроводе магнитной индукции B'_m потребуется меньший намагничивающий ток, чем при магнитопроводе из стали с меньшей магнитной проницаемостью.

Из сопоставления этих кривых видно, что при одном и том же намагничивающем токе I_μ'' в магнитопроводе из стали с большей магнитной проницаемостью магнитная индукция будет больше, чем в магнитопроводе с меньшей магнитной проницаемостью ($B_m'' > B_m'$). Следовательно, применение для магнитопроводов трансформаторов сталей с более высокой магнитной проницаемостью дает возможность увеличить магнитную индукцию и уменьшить сечение магнитопровода, что в свою очередь уменьшает массу магнитопровода и обмоток трансформатора.

Из-за насыщения стали магнитную индукцию в магнитопроводе нельзя беспредельно увеличивать, так как сравнительно небольшое повышение магнитной индукции (рис. 10) выше определенного предела приводит к резкому увеличению намагничивающего тока и повышает потребление реактивной мощности из сети.

Величина намагничивающего тока в сильной степени зависит от качества сборки магнитопровода. Если при сборке отдельные части магнитопровода неплотно прилегают друг к другу, так что между стержнем и ярмом имеется некоторый немагнитный промежуток, это вызывает резкое увеличение магнитного сопротивления и зна-

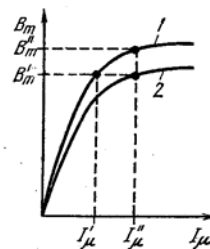


Рис. 9. Магнитные характеристики различных марок стали:
1 — сталь с большей магнитной проницаемостью, 2 — сталь с меньшей магнитной проницаемостью

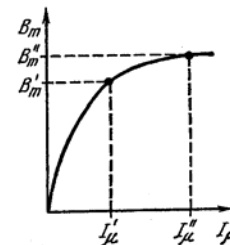


Рис. 10. Намагничивающие токи при различных значениях магнитной индукции

чительное повышение намагничивающего тока, необходимого для возбуждения магнитного потока в магнитопроводе.

§ 8. Э. Д. С. ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

При любом изменении магнитного потока, сцепленного с каким-либо витком, в этом витке индуцируется э. д. с., равная по величине и обратная по знаку изменению магнитного потока во времени. Обмотки трансформатора имеют обычно большое число витков. В каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется одинаковая э. д. с., так как все витки этих обмоток сцеплены с одним и тем же магнитным потоком. Таким образом, э. д. с. каждой обмотки равна сумме э. д. с. всех ее витков, т. е. произведению числа витков на э. д. с., индуцированную в одном витке.

Если ω_1 — число витков первичной, а ω_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора, то действующие значения э. д. с. этих обмоток равны:

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ в} \text{ и } E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ в.}$$

В этих формулах магнитный поток выражен в максвеллах* (мкс).

Пример 1. Определить числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора ω_1 и ω_2 , если э. д. с. этих обмоток равны $E_1 = 220 \text{ в}$, $E_2 = 20 \text{ в}$, а магнитный поток в сердечнике $\Phi_m = 2,5 \cdot 10^5 \text{ мкс}$ при частоте тока в сети $f = 50 \text{ гц}$.

* В системе СИ магнитный поток выражают в веберах (вб). $1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$ или $1 \text{ мкс} = 10^{-8} \text{ вб}$.

Решение. Число витков первичной обмотки трансформатора

$$w_1 = \frac{E_1}{4,44f\Phi_m} = \frac{220 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^8} = 400 \text{ витков,}$$

а число витков вторичной обмотки трансформатора

$$w_2 = \frac{E_2}{4,44f\Phi_m} = \frac{20 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^8} = 36 \text{ витков.}$$

Пример 2. В сердечнике трансформатора, включенного в сеть переменного тока с частотой $f=50$ гц, создан магнитный поток $\Phi_m=1,5 \cdot 10^8$ макс. Определить э. д. с. первичной и вторичной обмоток трансформатора, если $w_1=670$ и $w_2=90$.

Решение. Действующее значение э. д. с. первичной обмотки

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot 670 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 220 \text{ в,}$$

действующее значение э. д. с. вторичной обмотки

$$E_2 = 4,44w_2f\Phi_m \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot 90 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 24 \text{ в.}$$

При работе трансформаторов падения напряжения в сопротивлениях их обмоток обычно очень малы, и можно считать, что напряжение первичной обмотки U_1 равно ее э. д. с. E_1 , а напряжение вторичной обмотки U_2 равно ее э. д. с. E_2 , т. е.

$$U_1 = E_1 \text{ и } U_2 = E_2.$$

Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора называется *коэффициентом трансформации* и обозначается буквой k , т. е.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44w_1f\Phi_m \cdot 10^{-8}}{4,44w_2f\Phi_m \cdot 10^{-8}} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Таким образом, если изготовить трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением U_1 на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение U_2 , не равное напряжению U_1 .

Когда число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то в той же мере напряжение на зажимах вторичной обмотки меньше напряжения на зажимах первичной обмотки и трансформатор является понижающим. Если же число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной, то и напряжение вторичной обмотки больше напряжения первичной и трансформатор является повышающим.

Итак:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 = \frac{1}{k} U_1.$$

Если, например, первичная обмотка трансформатора с числом витков $w_1=660$ включена в сеть с напряжением $U_1=220$ в, то напряжение на зажимах вторичной обмотки с числом витков $w_2=36$ будет

$$U_2 = \frac{36}{660} \cdot 220 = 12 \text{ в.}$$

Напряжение и э. д. с. вторичной обмотки трансформатора зависят от числа витков. Поэтому наиболее простым способом регулирования напряжения трансформатора является изменение числа витков одной из его обмоток, чаще обмотки высшего напряжения. Число витков изменяют обычно в пределах $\pm 5\%$ от номинального. Для этой цели от одного из концов обмотки делают отводы.

Контрольные вопросы

1. От чего зависят потери в стали магнитопровода трансформатора?
2. Как размещают обмотки на магнитопроводе трансформатора стержневого типа?
3. Как производят сборку магнитопровода трансформатора?
4. От чего зависит величина реактивного намагничивающего тока трансформатора?
5. Чему равно действующее значение э. д. с. обмотки трансформатора?
6. Что называется коэффициентом трансформации?