

Лекция 5

Трансформаторы

Трансформатор (от лат. transformare — «превращать, преобразовывать») — статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких напряжений переменного тока в одну или несколько других напряжений, без изменения частоты.

Трансформатор осуществляет преобразование переменного напряжения и/или гальваническую (омическую) развязку в самых различных областях применения — электроэнергетике, электронике и радиотехнике.

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнитомягкого материала.



Трансформатор силовой ОСМ 0,16 — Однофазный Сухой Многоцелевого назначения мощностью 0,16 кВА

История

Для создания трансформаторов необходимо было изучение свойств материалов: неметаллических, металлических и магнитных, создания их теории.

В 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора, при проведении им основополагающих

исследований в области электричества. 29 августа 1831 года Фарадей описал в своём дневнике опыт, в ходе которого он намотал на железное кольцо диаметром 15 см и толщиной 2 см два медных провода длиной 15 и 18 см. При подключении к зажимам одной обмотки батареи гальванических элементов начинал отклоняться гальванометр на зажимах другой обмотки. Так как Фарадей работал с постоянным током, при достижении в первичной обмотке его максимального значения, ток во вторичной обмотке исчезал, и для возобновления эффекта трансформации требовалось отключить и снова подключить батарею к первичной обмотке.

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах М. Фарадея и Д. Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своём приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока[4].

В 1848 году французский механик Г. Румкорф изобрёл индукционную катушку особой конструкции. Она явилась прообразом трансформатора.

Александр Григорьевич Столетов (профессор Московского университета) сделал первые шаги в этом направлении. Он обнаружил петлю гистерезиса и доменную структуру ферромагнетика (1872 год).

30 ноября 1876 года, дата получения патента Павлом Николаевичем Яблочковым, считается датой рождения первого трансформатора переменного тока. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон.

В 1885 г. венгерские инженеры фирмы «Ганц и К°» Отто Блати, Карой Циперновский и Микша Дери изобрели трансформатор с замкнутым магнитопроводом, который сыграл важную роль в дальнейшем развитии конструкций трансформаторов.

Братья Гопкинсон разработали теорию электромагнитных цепей. В 1886 году они научились рассчитывать магнитные цепи.

Эптон, сотрудник Эдисона, предложил делать сердечники наборными, из отдельных листов, чтобы ограничить вихревые токи.

Большую роль для повышения надёжности трансформаторов сыграло введение масляного охлаждения (конец 1880-х годов, Д. Свинберн). Свинберн помещал трансформаторы в керамические сосуды, наполненные маслом, что значительно повышало надёжность изоляции обмоток.

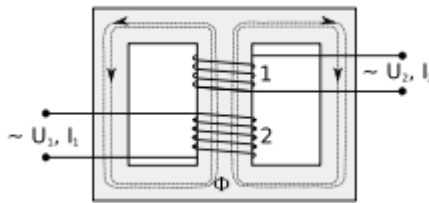
С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Российский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил трёхфазную систему переменного тока с тремя проводами (трёхфазная система переменного тока с шестью проводами изобретена Николой Теслой, патент США № 381968 от 01.05.1888, заявка на изобретение № 252132 от 12.10.1887), построил первый трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка» и трёхфазной обмоткой на роторе (трёхфазный асинхронный двигатель изобретён Николой Теслой, патент США № 381968 от 01.05.1888, заявка на изобретение № 252132 от 12.10.1887), первый трёхфазный трансформатор с тремя стержнями магнитопровода, расположенными в одной плоскости. На электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. Доливо-Добровольский демонстрировал опытную высоковольтную электропередачу трёхфазного тока протяжённостью 175 км. Трёхфазный генератор имел мощность 230 кВт при напряжении 95 кВ.

1928 год можно считать началом производства силовых трансформаторов в СССР, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии — Московский электрозавод).

В начале 1900-х английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провёл серию экспериментов для установления влияния добавок на свойства железа. Лишь через несколько лет ему удалось поставить заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.

Следующий крупный скачок в технологии производства сердечников был сделан в начале 30-х годов XX в, когда американский металлург Норман П. Гросс установил, что при комбинированном воздействии прокатки и нагревания у кремнистой стали появляются незаурядные магнитные свойства в направлении прокатки: магнитное насыщение увеличивалось на 50 %, потери на гистерезис сокращались в 4 раза, а магнитная проницаемость возрастала в 5 раз.

Базовые принципы действия



Схематическое устройство трансформатора. 1 — первичная обмотка,
2 — вторичная

Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

Изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм).

Изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС в этой обмотке (электромагнитная индукция).

На одну из обмоток, называемую первичной обмоткой, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток намагничивания создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе, сдвинутом на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

В некоторых трансформаторах, работающих на высоких или сверхвысоких частотах, магнитопровод может отсутствовать.

Форма напряжения во вторичной обмотке связана с формой напряжения в первичной обмотке довольно сложным образом. Благодаря этой сложности удалось создать целый ряд специальных трансформаторов, которые могут выполнять роль усилителей тока, умножителей частоты, генераторов сигналов и т. д.

Исключение — силовой трансформатор 🟢. В случае классического трансформатора переменного тока, предложенного П. Яблочковым, он преобразует синусоиду входного напряжения в такое же синусоидальное напряжение на выходе вторичной обмотки.

Закон Фарадея

ЭДС, создаваемая во вторичной обмотке, может быть вычислена по закону Фарадея, который гласит:

$$U_2 = - N_2 d \Phi / d t ,$$

Где;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке,

N_2 — число витков во вторичной обмотке,

Φ — суммарный магнитный поток, через один виток обмотки. Если витки обмотки расположены перпендикулярно линиям магнитного поля, то поток будет пропорционален магнитному полю B и площади S , через которую он проходит.

ЭДС, создаваемая в первичной обмотке, соответственно:

$$U_1 = - N_1 d \Phi / d t ,$$

Где:

U_1 — мгновенное значение напряжения на концах первичной обмотки,

N_1 — число витков в первичной обмотке.

Поделив уравнение U_2 на U_1 , получим отношение:

$$U_2 / U_1 = N_2 / N_1 .$$

Уравнения идеального трансформатора

Идеальный трансформатор — трансформатор, у которого отсутствуют потери энергии на гистерезис, вихревые токи и потоки рассеяния обмоток[10]. В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и, поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же ЭДС в каждом витке, суммарная ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу её витков. Такой трансформатор всю поступающую энергию из первичной цепи трансформирует в магнитное поле и затем в энергию вторичной цепи. В этом случае поступающая энергия равна преобразованной энергии:

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = P_2 = I_2 \cdot U_2 ,$$

где

P_1 — мгновенное значение поступающей на трансформатор мощности, которая возникает в первичной цепи,

P_2 — мгновенное значение преобразованной трансформатором мощности, поступающей во вторичную цепь.

Соединив это уравнение с отношением напряжений на концах обмоток, получим уравнение идеального трансформатора:

$$U_2 / U_1 = N_2 / N_1 = I_1 / I_2 = n ,$$

где n — коэффициент трансформации.

Таким образом, при увеличении напряжения на концах вторичной обмотки, уменьшается ток вторичной цепи.

Для преобразования сопротивления одной цепи к сопротивлению другой нужно умножить величину на квадрат отношения. Например, если сопротивление Z_2 подключено к концам вторичной обмотки, его приведённое значение к первичной цепи будет

$$Z_2' = Z_2 (N_1 / N_2)^2 .$$

Данное правило справедливо также и для первичной цепи:

$$Z_1' = Z_1 (N_2 / N_1)^2 .$$

Формально идеальный трансформатор описывается с помощью модели четырёхполюсника.

Модель реального трансформатора

В модели идеального трансформатора для упрощения не учитываются некоторые явления, наблюдаемые на практике и которыми не всегда можно пренебречь:

Наличие ненулевого тока холостого хода

В общем случае для магнитоэлектрической системы, которой является и реальный трансформатор, циркуляция вектора напряжённости магнитного

поля по контуру L равна полному току, находящемуся внутри контура. В ряде случаев учёт тока холостого хода обязателен.

Включение трансформатора под напряжение. При этом на первичной обмотке трансформатора будут наблюдаться кратковременные всплески тока, достигая величины (в пике) в несколько раз больше номинального первичного тока. Высота пиков зависит от нагрузки, момента включения (наибольшая величина при включении ненагруженного трансформатора, в момент, когда мгновенное значение сетевого напряжения равно нулю), мощности, конструктивных параметров трансформатора. Явление всплесков первичного тока учитывается при расчёте токовых защит трансформатора, выборе коммутационной аппаратуры, питающих линий и пр.

Наличие тока холостого хода приводит к тому, что токи в первичной и вторичной обмотках не сдвинуты друг относительно друга на 180° . Разница между действительным и идеальным углами взаимного сдвига называется «углом погрешности» δ . Кроме того, соотношение токов по модулю не будет составлять W_2 / W_1 . Разница между действительным соотношением токов и идеальным называется «погрешностью по величине». Погрешности по углу и величине учитываются в виде нормирования по классам точности при изготовлении трансформаторов тока (особенно в цепях учёта электроэнергии). Для трансформаторов тока, предназначенных для защит, вводится величина общей погрешности (получающаяся как разница между векторами первичного и вторичного тока), учитывающая погрешности как по величине, так и по углу — для правильного действия защиты должна быть не более 10 % (при максимально возможном токе короткого замыкания).

Наличие межобмоточной, межслоевой и межвитковой ёмкостей

Наличие проводников, разделённых диэлектриком, приводит к возникновению паразитных ёмкостей между обмотками, слоями и витками. Моделирование этого явления производится введением т. н. продольных и поперечных ёмкостей. К поперечным относят межслоевую и межобмоточные ёмкости. К продольным — межвитковые и межкатушечные. Через ёмкости могут из первичной во вторичную обмотку проникать высокочастотные помехи, что нежелательно для некоторых применений трансформатора (устраняется межобмоточным заземляемым экраном). Данные эквивалентные ёмкости только в первом приближении можно считать сосредоточенными; в действительности эти величины являются распределёнными. Распределёнными являются и индуктивности рассеяния. В нормальном

режиме эксплуатации напряжение равномерно распределяется по обмоткам, линейно изменяясь по виткам и слоям (для заземлённых обмоток — от фазного значения до нуля). При различных переходных процессах, связанных с резким изменением напряжения на обмотке, начинаются волновые процессы, обусловленные распределёнными ёмкостями. Особенно ярко это проявляется при грозовых и коммутационных перенапряжениях с очень крутым (порядка нескольких микросекунд для грозовых импульсов и несколько десятков микросекунд для коммутационных импульсов) передним фронтом, такие помехи имеют спектр с высокочастотными гармониками большой амплитуды. При этом распределение напряжения в начальный момент времени по обмоткам становится крайне неравномерным и большая часть напряжения падает на витках и слоях, расположенных ближе к фазным выводам, эти части обмотки подвергаются наибольшей опасности пробоя, что должно учитываться в конструкции трансформаторов (в основном силовых высоковольтных). Кроме того, наличие распределённых (продольных и поперечных) ёмкостей и индуктивностей приводит к созданию в трансформаторе паразитных колебательных контуров и при импульсах напряжения, проникающих в обмотку трансформатора, происходит высокочастотный затухающий колебательный процесс (в начальный период напряжение будет прикладываться к начальным виткам обмотки, затем распределение на обмотке меняется на противоположное и большая часть уже прикладывается к конечным виткам и т. д.). Данный эффект должен также учитываться для некоторых конструкций трансформаторов[13].

Кроме того, реактивные параметры обмоток, а также частотные свойства сердечника реального трансформатора определяют диапазон его рабочих частот, в котором коэффициент трансформации, фазовый сдвиг и форма выходного напряжения мало зависят от частоты (важно для разделительных и согласующих трансформаторов в сигнальных цепях).

Наличие нелинейной кривой намагничивания

В большинстве трансформаторов применяются ферромагнитные сердечники для большего значения ЭДС, индуцируемого во вторичных обмотках. Ферромагнетики имеют крайне нелинейную характеристику намагничивания с насыщением и неоднозначностью (гистерезисом), которой обуславливается характер напряжений и токов в трансформаторе: при глубоком насыщении трансформатора первичный ток резко возрастает, его форма становится несинусоидальной: в нём появляются составляющие третьей гармоники. Нелинейная индуктивность (связанная с наличием

нелинейной кривой намагничивания) в сочетании с внешней ёмкостной нагрузкой (трансформатор и ёмкость сети) могут создать феррорезонансный режим с опасностью выхода из строя трансформатора (особенно к этому чувствительны трансформаторы напряжения). Гистерезис обуславливает дополнительные потери в сердечнике и остаточную намагниченность. Потери на нагрев в сердечнике обуславливаются эффектом вихревых токов, для уменьшения которых приходится производить магнитопроводы, состоящие из пластин (шихтование) и использовать ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением (кремнистая трансформаторная сталь, ферриты).

Режимы работы трансформатора

Режим холостого хода. Данный режим характеризуется разомкнутой вторичной цепью трансформатора, вследствие чего ток в ней не течёт. По первичной обмотке протекает ток холостого хода, главной составляющей которого является реактивный ток намагничивания. С помощью опыта холостого хода можно определить КПД трансформатора, коэффициент трансформации, а также потери в сердечнике (т. н. «потери в стали»).

Режим нагрузки. Этот режим характеризуется работой трансформатора с подключенным источником в первичной, и нагрузкой во вторичной цепи трансформатора. Во вторичной обмотке протекает ток нагрузки, а в первичной — ток, который можно представить как сумму тока нагрузки (пересчитанного из соотношения числа витков обмоток и вторичного тока) и ток холостого хода. Данный режим является основным рабочим для трансформатора.

Режим короткого замыкания. Этот режим получается в результате замыкания вторичной цепи накоротко. Это разновидность режима нагрузки, при котором сопротивление вторичной обмотки является единственной нагрузкой. С помощью опыта короткого замыкания можно определить потери на нагрев обмоток в цепи трансформатора («потери в меди»). Это явление учитывается в схеме замещения реального трансформатора при помощи активного сопротивления.

Режим холостого хода. При равенстве вторичного тока нулю (режим холостого хода), ЭДС индукции в первичной обмотке практически полностью компенсирует напряжение источника питания, поэтому ток, протекающий через первичную обмотку, равен переменному току намагничивания, нагрузочные токи отсутствуют. Для трансформатора с сердечником из

магнитомягкого материала (ферромагнитного материала, трансформаторной стали) ток холостого хода характеризует величину потерь в сердечнике (на вихревые токи и на гистерезис) и реактивную мощность перемагничивания магнитопровода. Мощность потерь можно вычислить, умножив активную составляющую тока холостого хода на напряжение, подаваемое на трансформатор.

Для трансформатора без ферромагнитного сердечника потери на перемагничивание отсутствуют, а ток холостого хода определяется сопротивлением индуктивности первичной обмотки, которое пропорционально частоте переменного тока и величине индуктивности.

Напряжение на вторичной обмотке в первом приближении определяется законом Фарадея.

Режим короткого замыкания

В режиме короткого замыкания, на первичную обмотку трансформатора подаётся переменное напряжение небольшой величины, выводы вторичной обмотки соединяют накоротко. Величину напряжения на входе устанавливают такую, чтобы ток короткого замыкания равнялся номинальному (расчётному) току трансформатора. В таких условиях величина напряжения короткого замыкания характеризует потери в обмотках трансформатора, потери на омическом сопротивлении. Напряжение короткого замыкания (определяется в % от номинального напряжения), полученное с помощью опыта короткого замыкания является одним из важных параметров трансформатора. Мощность потерь можно вычислить, умножив напряжение короткого замыкания $U_{кз}$ на ток короткого замыкания $I_{кз}$. Данный режим широко используется в измерительных трансформаторах тока.

Режим нагрузки

При подключении нагрузки ко вторичной обмотке во вторичной цепи возникает ток нагрузки, создающий магнитный поток в магнитопроводе, направленный противоположно магнитному потоку, создаваемому первичной обмоткой. В результате в первичной цепи нарушается равенство ЭДС индукции и ЭДС источника питания, что приводит к увеличению тока в первичной обмотке до тех пор, пока магнитный поток не достигнет практически прежнего значения.

Мгновенный магнитный поток в магнитопроводе трансформатора определяется интегралом по времени от мгновенного значения ЭДС в

первичной обмотке и в случае синусоидального напряжения сдвинут по фазе на 90° по отношению к ЭДС. Наведённая во вторичных обмотках ЭДС пропорциональна первой производной от магнитного потока и для любой формы тока совпадает по фазе и форме с ЭДС в первичной обмотке.

Теория трансформаторов

Уравнения линейного трансформатора

Пусть i_1 и i_2 — мгновенные значения тока в первичной и вторичной обмотке, соответственно, u_1 — мгновенное напряжение на первичной обмотке, R_n — сопротивление нагрузки. Тогда

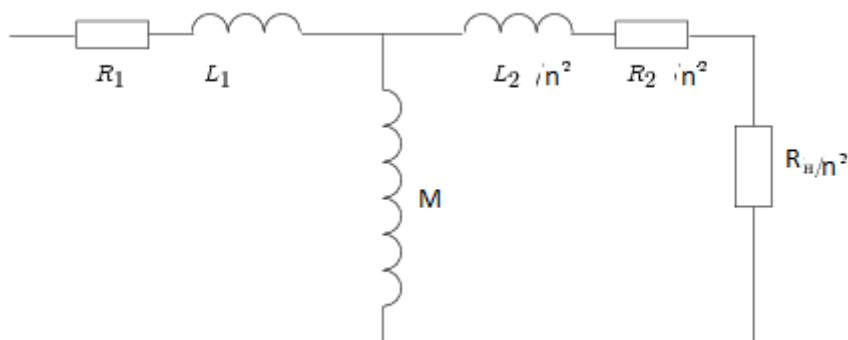
$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 R_1 ,$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 = - i_2 R_n .$$

Здесь L_1, R_1 — индуктивность и активное сопротивление первичной обмотки, соответственно, L_2, R_2 — то же самое для вторичной обмотки, M — взаимная индуктивность обмоток. Если магнитный поток первичной обмотки полностью пронизывает вторичную, то есть если отсутствует поле рассеяния, то $M = \sqrt{L_1 L_2}$. Индуктивности обмоток в первом приближении пропорциональны квадрату количества витков в них.

Мы получили систему линейных дифференциальных уравнений для токов в обмотках. Можно преобразовать эти дифференциальные уравнения в обычные алгебраические, если воспользоваться методом комплексных амплитуд. . Из полученных линейных уравнений можно легко выразить ток через нагрузку, воспользовавшись законом Ома — напряжение на нагрузке, и т. п.

Т-образная эквивалентная схема замещения трансформатора



На рисунке показана эквивалентная схема трансформатора с подключенной нагрузкой, как он видится со стороны первичной обмотки.

Здесь n — коэффициент трансформации, M — коэффициент взаимной индуктивности, L_1 , L_2 — индуктивности первичной и вторичной обмотки, связанные с рассеянием, R_1 , R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмотки, соответственно, R_n — сопротивление нагрузки.

Потери в трансформаторах

Потери в сердечнике

Степень потерь (и снижения КПД) в трансформаторе зависит, главным образом, от качества, конструкции и материала «трансформаторного железа» (электротехническая сталь). Потери в стали состоят в основном из потерь на нагрев сердечника, на гистерезис и вихревые токи. Потери в трансформаторе, где «железо» монолитное, значительно больше, чем в трансформаторе, где оно составлено из многих секций (так как в этом случае уменьшается количество вихревых токов). На практике монолитные стальные сердечники не применяются. Для снижения потерь в магнитопроводе трансформатора магнитопровод может изготавливаться из специальных сортов трансформаторной стали с добавлением кремния, который повышает удельное сопротивление железа электрическому току, а сами пластины лакируются для изоляции друг от друга.

Потери в обмотках

Кроме «потерь в железе», в трансформаторе присутствуют «потери в меди», обусловленные ненулевым активным сопротивлением обмоток (которое зачастую невозможно сделать пренебрежимо малым, потому что требует увеличения сечения провода, что приводит к увеличению необходимых габаритов сердечника). «Потери в меди» приводят к нагреву обмоток при работе под нагрузкой и нарушению соотношения между количеством витков и напряжением обмоток, верного для идеального трансформатора.

Габаритная мощность

Габаритная мощность трансформатора описывается следующей формулой:

$$P_{\text{габ}} = P_1 + P_2 = U_1 I_1 + U_2 I_2$$

Габаритная мощность, как следует из названия, определяется габаритами сердечника и материалом, его магнитными и частотными свойствами.