

Лекция по теме: «Электротехнические устройства переменного тока»

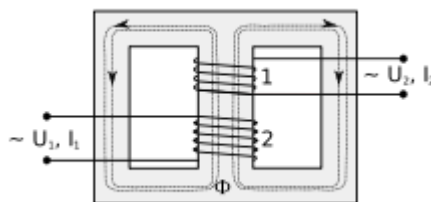
Цель: изучить устройство, принцип действия и назначение трансформатора, рассмотреть вопрос о производстве, распределении и эффективном использовании электрической энергии.

Трансформатор (от лат. *transformo* — преобразовывать) — электрическая машина, состоящая из набора индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе или без него и предназначенная для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока без изменения частоты систем (системы) переменного тока.

Трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока и/или гальваническую 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 магнито-мягкого материала.

Базовые принципы действия трансформатора



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

Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

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

2. 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 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 сдвинутой на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

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

Режимы работы трансформатора

1. **Режим холостого хода.** Данный режим характеризуется разомкнутой вторичной цепью трансформатора, вследствие чего ток в ней не течёт. С помощью опыта холостого хода можно определить КПД трансформатора, коэффициент трансформации, а также потери в стали.
2. **Нагрузочный режим.** Этот режим характеризуется замкнутой на нагрузку вторичной цепи трансформатора. Данный режим является основным рабочим для трансформатора.
3. **Режим короткого замыкания.** Этот режим получается в результате замыкания вторичной цепи накоротко. С его помощью можно определить потери полезной мощности на нагрев проводов в цепи трансформатора. Это учитывается в схеме замещения реального трансформатора при помощи активного сопротивления.

Силовой трансформатор

Силовой трансформатор — трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в

установках, предназначенных для приёма и использования электрической энергии. Слово "силовой" отражает работу данного вида трансформаторов с большими мощностями. Необходимость применения силовых трансформаторов обусловлена различной величиной рабочих напряжений ЛЭП (100-750 кВ), городских электросетей (как правило 6 кВ), напряжения, подаваемого конечным потребителям (0,4 кВ, они же 380/220 В) и напряжения, требуемого для работы электромашин и электроприборов (самые различные от единиц вольт до сотен киловольт).

Автотрансформатор

Автотрансформатор — вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены напрямую, и имеют за счёт этого не только электромагнитную связь, но и электрическую. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения. Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, поскольку лишь часть мощности подвергается преобразованию — это особенно существенно, когда входное и выходное напряжения отличаются незначительно. Недостатком является отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепью. Применение автотрансформаторов экономически оправдано вместо обычных трансформаторов для соединения эффективно заземленных сетей с напряжением 110 кВ и выше при коэффициентах трансформации не более 3-4. Существенным является меньший расход стали для сердечника, меди для обмоток, меньший вес и габариты, и в итоге — меньшая стоимость.

Трансформатор тока

Трансформатор тока — трансформатор, питающийся от источника тока. Типичное применение — для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации. Номинальное значение тока вторичной обмотки 1 А, 5 А. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь с измеряемым переменным током, а

во вторичную включаются измерительные приборы. Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока, равен току первичной обмотки, деленному на коэффициент трансформации.

ВНИМАНИЕ! Вторичная обмотка токового трансформатора должна быть надёжно замкнута на низкоомную нагрузку измерительного прибора или накоротко. При случайном или умышленном разрыве цепи возникает скачок напряжения, опасный для изоляции, окружающих электроприборов и жизни персонала!

Трансформатор напряжения

Трансформатор напряжения — трансформатор, питающийся от источника напряжения. Типичное применение — преобразование высокого напряжения в низкое в цепях, в измерительных цепях. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

Импульсный трансформатор

Импульсный трансформатор — это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к импульсным трансформаторам заключается в неискажённой передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход импульсные трансформаторы напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Разделительный трансформатор

Разделительный трансформатор — трансформатор, первичная обмотка которого электрически не связана со вторичными обмотками.

Силовые разделительные трансформаторы предназначены для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикосновениях к земле и токоведущим частям или нетокковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции. Сигнальные разделительные трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку электрических цепей.

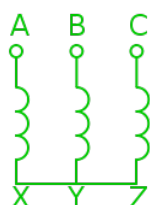
Схемы и группы соединения обмоток трёхфазных двухобмоточных трансформаторов

Существуют три основных способа соединения фазовых обмоток каждой стороны трёхфазного трансформатора:

- Y-соединение, так называемое соединение бегменом, где все три обмотки соединены вместе одним концом каждой из обмоток в одной точке, называемой нейтральной точкой или звездой
- Δ-соединение, так называемое дельта-соединение, или соединение треугольником, где три фазных обмотки соединены последовательно и образуют кольцо (или треугольник)
- Z-соединение, так называемое соединение зигзагом

Первичная и вторичная стороны трансформатора могут быть соединены любым из трёх способов, показанным выше. Данные способы предлагают несколько различных комбинаций соединений в трансформаторах с различными характеристиками, выбор которых также может быть обусловлен типом сердечника.

Y-соединение обычно является естественным выбором для самых высоких напряжений, когда нейтральная точка предназначена для заземления.



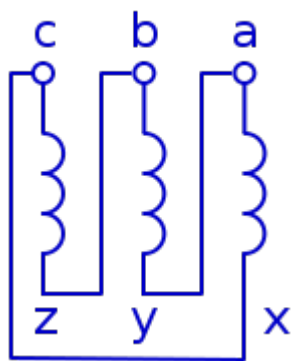
В любом случае в целях защиты от перенапряжения или для прямого заземления предусмотрено наличие нейтрального проходного изолятора. В последнем случае в целях экономии уровень изоляции нейтрали может быть ниже, чем уровень изоляции фазного конца обмотки. Соединённая звездой обмотка также имеет то преимущество, что переключение регулирования коэффициента трансформации может быть предусмотрено на нейтральном конце, где также может быть размещён переключатель числа витков. Поэтому переключатель числа витков сможет функционировать при напряжении низкого логического уровня, а разница напряжений между фазами также будет незначительная. По сравнению с расходами, затраченными на установку переключателя числа витков, при более высоком уровне напряжения экономические затраты будут ниже.

Соединение звездой используется на одной стороне трансформатора, другая сторона должна быть соединена треугольником, особенно в случаях, если нейтраль соединения звездой планируется для зарядки. Соединение обмотки треугольником обеспечивает баланс ампер-виток для тока нулевой последовательности, следующего по нейтрали, и каждой фазы соединения звездой, что даёт приемлемый уровень полного сопротивления нулевой последовательности. Без соединения треугольником обмотки ток нулевой последовательности привёл бы к образованию поля токов нулевой последовательности в сердечнике. Если сердечник имеет три стержня, данное поле от ярма к ярму проникнет сквозь стенки бака и приведёт к выделению тепла. В случае с броневым сердечником, или при наличии пяти стержней сердечника, данное поле проникнет между раскрученными боковыми стержнями и полное сопротивление нулевой последовательности существенно повысится. Вследствие этого ток, в случае пробоя на землю может стать настолько слабым, что защитное реле не сработает.

В соединенной треугольником обмотке ток, протекающий по каждой фазовой обмотке равен фазному току, разделённому на $\sqrt{3}$, в то время как в соединении звездой, линейный ток каждой фазной обмотки идентичен

линейному току сети. С другой стороны, для одинакового напряжения соединение треугольником требует наличия трёхкратного количества витков по сравнению с соединением звездой. Соединение обмотки треугольником выгодно использовать в высоковольтных трансформаторах, когда сила тока высока, а напряжение относительно низкое, как например, в обмотке низшего напряжения в повышающих трансформаторах.

Соединение обмотки треугольником позволяет циркулировать третьей (и кратным ей) гармонике тока внутри треугольника, образованного тремя последовательно соединёнными фазными обмотками. Токи третьей гармоники необходимы во избежание искажения синусоидальности потока магнитных, и, следовательно, наведённой ЭДС во вторичной обмотке. Третья гармоника тока во всех трёх фазах имеет одинаковое направление, данные токи не могут циркулировать в обмотке, соединённой звездой, с изолированной нейтралью.



Недостаток троичных синусоидальных токов в намагничивающем токе может привести к значительным искажениям наведённого напряжения, в случаях, если у сердечника 5 стержней, или он выполнен в броневого варианте.

Соединённая треугольником обмотка трансформатора устранит данное нарушение, так как обмотка с соединением треугольником обеспечит затухание гармонических токов. Иногда в трансформаторах предусмотрено наличие третичной Δ -соединённой обмотки, предусмотренной не для зарядки, а для предотвращения искажения напряжения и понижения полного

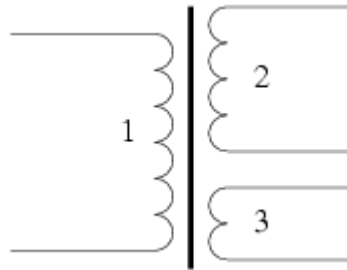
сопротивления нулевой последовательности. Такие обмотки называются компенсационными. Распределительные трансформаторы, предназначенные для зарядки, между фазой и нейтралью на стороне первого контура, снабжены обычно соединённой треугольником обмоткой. Однако ток в соединённой треугольником обмотке может быть очень слабым для достижения минимума номинальной мощности, а требуемый размер проводника обмотки чрезвычайно неудобен для заводского изготовления. В подобных случаях высоковольтная обмотка может быть соединена звездой, а вторичная обмотка — зигзагообразно. Токи нулевой последовательности, циркулирующие в двух отводах зигзагообразно соединённой обмотки будут балансировать друг друга, полное сопротивление нулевой последовательности вторичной стороны главным образом определяется полем рассеяния магнитного поля между двумя разветвлениями обмоток, и выражается весьма незначительной цифрой.

При использовании соединения пары обмоток различными способами возможно достигнуть различных степеней напряжения смещения между сторонами трансформатора.

Сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток принято выражать **группой соединений**. Для описания напряжения смещения между первичной и вторичной, или первичной и третичной обмотками, традиционно используется пример с циферблатом часов. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0° до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединений выбирается ряд чисел от 1 до 12, в котором каждая единица соответствует углу сдвига в 30° . Одна фаза первичной указывает на 12, а соответствующая фаза другой стороны указывает на другую цифру циферблата.

Обозначение на схемах

На схемах трансформатор обозначается следующим образом:



Центральная толстая линия соответствует сердечнику, 1 — первичная обмотка (обычно слева), 2,3 — вторичные обмотки. Число полуокружностей в очень грубом приближении символизирует число витков обмотки (больше витков — больше полуокружностей, но без строгой пропорциональности).

При обозначении трансформатора жирной точкой около вывода могут быть указаны начала катушек (не менее чем на двух катушках, знаки мгновенно действующей ЭДС на этих выводах одинаковы). Применяется при обозначении промежуточных трансформаторов в усилительных (преобразовательных) каскадах для подчёркивание син- или противофазности, а также в случае нескольких (первичных или вторичных) обмоток, если соблюдение «полярности» их подключения необходимо для работы остальной части схемы. Если начала обмоток не указаны явно, то предполагается, что все они направлены в одну сторону (после конца одной обмотки — начало следующей).

Классификация по назначению.

Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды:

- **электромашинные генераторы**, преобразующие механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др. На электростанциях они приводятся во вращение с помощью мощных паровых и гидравлических турбин, а на

транспортных установках - от двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники и пр.;

- **электрические двигатели**, преобразующие электрическую энергию в механическую; они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, связи, на транспорте, в военном деле и быту. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов;
- **электромашинные преобразователи**, преобразующие переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяющие величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др. Их широко используют в промышленности, на транспорте и в военном деле, хотя в последнее десятилетие роль электромашинных преобразователей существенно уменьшилась вследствие применения статических полупроводниковых преобразователей;
- **электромашинные компенсаторы**, осуществляющие генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии;
- **электромашинные усилители**, используемые для управления объектами относительно большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки возбуждения (управления). Роль электромашинных усилителей в последнее время также уменьшилась из-за широкого применения усилителей, выполненных на полупроводниковых элементах (транзисторах, тиристорах);

- **электромеханические преобразователи сигналов**, генерирующие, преобразующие и усиливающие различные сигналы. Их выполняют обычно в виде электрических микромашин и широко используют в системах автоматического регулирования, измерительных и счетно-решающих устройствах в качестве различных датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов и др.

Классификация по роду тока и принципу действия.

Электрические машины по роду тока делят на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяют на трансформаторы, асинхронные, синхронные и коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования напряжения: в системах передачи и распределения электрической энергии, в выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов и пр. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, а также сельсины.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т. п.). В электрических приводах большой мощности применяют

также синхронные электродвигатели. В устройствах автоматики широко используют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, шаговые, индукторные и пр.).

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. В устройствах автоматики, а также в различного рода электробытовых приборах применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах: железнодорожный и морской транспорт, прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр., а также в тех случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т. п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах). Однако в последнее время генераторы постоянного тока заменяются генераторами переменного тока, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями. В системах автоматического регулирования машины постоянного тока широко используют в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

В зависимости от назначения электрические микромашины автоматических устройств подразделяются на следующие группы:

- **силовые микродвигатели**, приводящие во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и пр.;
- **управляемые (исполнительные) двигатели**, преобразующие подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отрабатывающие определенные команды;
- **тахогенераторы**, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал - напряжение, пропорциональное частоте вращения вала;
- **вращающиеся трансформаторы**, дающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла или самому углу;
- **машины синхронной связи** (сельсины, магнесины), осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей;
- **микромашины гироскопических приборов** (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента), осуществляющие вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их положения;
- **электромашинные преобразователи и усилители.**

Электрические микромашины первых двух групп часто называют *силовыми*, а третьей - пятой групп - *информационными*.

Классификация по мощности.

Электрические машины по мощности условно подразделяют на микромашины, машины малой, средней и большой мощности.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Эти машины работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной и повышенной (400 - 2000 Гц) частоты.

Машины малой мощности - от 0,5 до 10 кВт. Они работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Машины средней мощности - от 10 кВт до нескольких сотен киловатт.

Машины большой мощности - свыше нескольких сотен киловатт. Машины большой и средней мощности обычно предназначают для работы на постоянном или переменном токе нормальной частоты

Общие технические требования. Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, не сложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации.