Принцип действия трансформатора

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

Год: 2025

# ВВЕДЕНИЕ

\*\*Введение\*\*
Трансформатор представляет собой одно из ключевых устройств в электроэнергетике, обеспечивающее передачу и распределение электрической энергии с минимальными потерями. Принцип его действия основан на явлении электромагнитной индукции, открытом Майклом Фарадеем в 1831 году, что позволило совершить революционный прорыв в области электротехники. Трансформаторы нашли широкое применение в системах электроснабжения, промышленности, электронике и других областях, где требуется преобразование переменного напряжения с высокой эффективностью.
Основная функция трансформатора заключается в изменении величины напряжения переменного тока при сохранении его частоты. Конструктивно устройство состоит из двух или более обмоток, связанных общим магнитопроводом, выполненным из ферромагнитного материала. При подаче переменного напряжения на первичную обмотку возникает переменный магнитный поток, который, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней электродвижущую силу (ЭДС). Соотношение напряжений на входе и выходе определяется коэффициентом трансформации, который зависит от числа витков в обмотках.
Теоретической основой работы трансформатора являются уравнения Максвелла, описывающие взаимосвязь электрических и магнитных полей. В частности, закон электромагнитной индукции Фарадея и закон Ампера позволяют математически смоделировать процессы, происходящие в трансформаторе. Однако реальные устройства обладают рядом неидеальностей, таких как потери в магнитопроводе (гистерезисные и вихревые токи), активное сопротивление обмоток и рассеяние магнитного потока, что требует учёта дополнительных параметров при проектировании.
Современные трансформаторы классифицируются по различным критериям: мощности, назначению (силовые, измерительные, импульсные), числу фаз и конструктивным особенностям. Развитие технологий привело к созданию высокоэффективных моделей с использованием аморфных металлов, сверхпроводниковых материалов и цифровых систем управления, что значительно повысило их КПД и надёжность.
Изучение принципа действия трансформатора имеет фундаментальное значение для подготовки специалистов в области электротехники и энергетики. Понимание физических основ его работы позволяет оптимизировать эксплуатационные характеристики, снижать энергетические потери и разрабатывать инновационные решения для современных энергосистем. В данном реферате рассматриваются теоретические аспекты функционирования трансформатора, его основные параметры и практическое применение, что способствует углублённому освоению принципов преобразования электрической энергии.

# ОСНОВЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения одной величины в напряжение другой величины при неизменной частоте. Принцип его действия основан на явлении электромагнитной индукции, открытом Майклом Фарадеем в 1831 году. Конструктивно трансформатор состоит из двух или более обмоток, электрически изолированных друг от друга, но связанных общим магнитным потоком через ферромагнитный сердечник. Основная функция трансформатора заключается в передаче электрической энергии из первичной цепи во вторичную с изменением параметров напряжения и тока.
Первичная обмотка трансформатора подключается к источнику переменного тока, что приводит к возникновению в ней переменного магнитного потока. Этот поток замыкается через сердечник и пронизывает витки вторичной обмотки, индуцируя в ней электродвижущую силу (ЭДС). Величина наведённой ЭДС определяется законом электромагнитной индукции Фарадея, согласно которому ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока и числу витков обмотки. Таким образом, соотношение напряжений на первичной и вторичной обмотках определяется коэффициентом трансформации, который равен отношению числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной.
Важным аспектом работы трансформатора является условие идеального холостого хода, при котором ток вторичной обмотки отсутствует. В этом режиме трансформатор можно рассматривать как устройство, преобразующее напряжение без потерь энергии. Однако в реальных условиях неизбежны потери, связанные с активным сопротивлением обмоток, вихревыми токами в сердечнике и гистерезисом. Эти явления учитываются при расчёте КПД трансформатора, который в современных устройствах может достигать 98–99%.
Магнитный поток в сердечнике трансформатора создаётся переменным током первичной обмотки, что приводит к периодическому перемагничиванию ферромагнитного материала. Для минимизации потерь сердечник изготавливается из тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга, что снижает вихревые токи. Кроме того, выбор материала с малым коэрцитивным полем уменьшает гистерезисные потери.
При подключении нагрузки к вторичной обмотке в ней возникает ток, который создаёт собственный магнитный поток, компенсирующий часть потока первичной обмотки. Это приводит к изменению баланса магнитодвижущих сил (МДС) и увеличению тока в первичной цепи. В установившемся режиме МДС первичной и вторичной обмоток уравновешиваются, что обеспечивает стабильность коэффициента трансформации.
Таким образом, работа трансформатора основана на взаимосвязи электрических и магнитных процессов, протекающих в его обмотках и сердечнике. Эффективность преобразования энергии зависит от конструктивных параметров, качества материалов и режима эксплуатации. Понимание этих принципов позволяет проектировать трансформаторы с высокими энергетическими характеристиками, широко применяемыми в электроэнергетике, промышленности и электронике.

# КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте. Основными элементами трансформатора являются магнитопровод, обмотки, изоляционная система и система охлаждения. Магнитопровод выполняет функцию концентрации и направления магнитного потока, создаваемого переменным током в первичной обмотке. Он изготавливается из листовой электротехнической стали с высоким содержанием кремния, что обеспечивает низкие потери на вихревые токи и гистерезис. Листы стали изолируются друг от друга лаковым покрытием или оксидной плёнкой для уменьшения потерь. Конструктивно магнитопровод может быть стержневым, броневым или тороидальным, что определяется требованиями к габаритам, массе и КПД устройства.
Обмотки трансформатора выполняются из медного или алюминиевого провода с эмалевой или волокнистой изоляцией. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения, а вторичная — к нагрузке. В зависимости от назначения трансформатора обмотки могут располагаться на одном или разных стержнях магнитопровода. В силовых трансформаторах применяется цилиндрическая или винтовая намотка, обеспечивающая механическую прочность и эффективное охлаждение. Число витков в обмотках определяет коэффициент трансформации, который может быть повышающим или понижающим.
Изоляционная система трансформатора включает межвитковую, межслойную и главную изоляцию, предотвращающую электрический пробой между обмотками и магнитопроводом. В сухих трансформаторах применяются твёрдые диэлектрики (стеклоткань, слюда), а в масляных — жидкий диэлектрик (трансформаторное масло), выполняющий также функцию охлаждения. Масляные трансформаторы оснащаются расширительным баком, компенсирующим тепловое расширение масла, и газовым реле для защиты от внутренних повреждений.
Система охлаждения трансформатора зависит от его мощности и конструкции. В маломощных устройствах используется естественное воздушное охлаждение, в то время как в силовых трансформаторах применяется принудительное масляное охлаждение с радиаторами или дутьевыми вентиляторами. Для контроля температуры устанавливаются термодатчики, а в мощных трансформаторах — системы автоматического регулирования теплового режима.
Дополнительными элементами трансформатора могут быть устройства регулирования напряжения (РПН или ПБВ), вводы для подключения к сети, а также защитные устройства (разрядники, предохранители). Конструкция трансформатора должна обеспечивать механическую устойчивость, минимальные потери энергии и соответствие требованиям электробезопасности. Современные трансформаторы проектируются с учётом оптимизации магнитных и электрических характеристик, что достигается применением компьютерного моделирования и точных методов расчёта параметров.

# ПРИНЦИП ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции, открытом Майклом Фарадеем в 1831 году. Согласно этому принципу, изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, приводит к возникновению электродвижущей силы (ЭДС) в этом контуре. В трансформаторе данный эффект реализуется посредством взаимодействия двух или более обмоток, связанных общим магнитопроводом. При подаче переменного напряжения на первичную обмотку создаётся переменный магнитный поток, который, проходя через сердечник, индуцирует ЭДС во вторичной обмотке. Величина индуцированной ЭДС определяется скоростью изменения магнитного потока и числом витков соответствующей обмотки, что математически выражается законом Фарадея: ЭДС = -N·dΦ/dt, где N — количество витков, Φ — магнитный поток, t — время.
Магнитный поток в трансформаторе формируется за счёт протекания переменного тока в первичной обмотке, что приводит к периодическому перемагничиванию сердечника. Для эффективной передачи энергии магнитопровод изготавливается из ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью, что минимизирует рассеяние потока. В идеальном трансформаторе (без потерь) выполняется соотношение U₁/U₂ = N₁/N₂ = k, где U₁ и U₂ — напряжения на первичной и вторичной обмотках, N₁ и N₂ — число их витков, k — коэффициент трансформации. Это соотношение демонстрирует ключевую функцию трансформатора: преобразование напряжения пропорционально отношению витков обмоток.
Важным аспектом работы трансформатора является взаимосвязь между токами в обмотках. Согласно закону сохранения энергии (без учёта потерь), мощность в первичной цепи равна мощности во вторичной: U₁·I₁ = U₂·I₂. Отсюда следует, что токи в обмотках обратно пропорциональны коэффициенту трансформации (I₁/I₂ ≈ N₂/N₁). Таким образом, повышение напряжения сопровождается уменьшением тока, и наоборот. Однако в реальных устройствах существуют потери, обусловленные активным сопротивлением обмоток, гистерезисом, вихревыми токами и магнитным рассеянием, что требует учёта КПД при проектировании.
Электромагнитная индукция в трансформаторах также объясняет возникновение противо-ЭДС в первичной обмотке, которая ограничивает ток холостого хода. При увеличении нагрузки во вторичной цепи возрастает ток, что приводит к компенсации магнитного потока и изменению баланса напряжений. Данный процесс регулируется законом Ленца, согласно которому индуцированная ЭДС направлена так, чтобы противодействовать причине, её вызвавшей. Это обеспечивает стабильность работы трансформатора при переменных нагрузках.
Кроме того, конструктивные особенности трансформаторов, такие как форма сердечника (стержневой, броневой, тороидальный) и способ размещения обмоток, влияют на эффективность электромагнитной связи. Например, в тороидальных трансформаторах достигается минимальное рассеяние магнитного потока благодаря замкнутой геометрии сердечника. Современные модели также используют многослойные обмотки и шихтованные магнитопроводы для снижения потерь на вихревые токи.
Таким образом, принцип электромагнитной индукции лежит в основе преобразования электрической энергии в трансформаторах, обеспечивая их широкое применение в энергосистемах, электронике и промышленности. Понимание данного механизма позволяет оптимизировать параметры трансформаторов для конкретных задач, учитывая требования по напряжению, току и КПД.

# ПРИМЕНЕНИЕ И ВИДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы находят широкое применение в различных областях электротехники и энергетики благодаря своей способности эффективно преобразовывать напряжение и ток при минимальных потерях энергии. Основная сфера использования трансформаторов связана с передачей и распределением электрической энергии. В линиях электропередачи (ЛЭП) повышающие трансформаторы увеличивают напряжение до высоких значений, что позволяет снизить потери мощности при передаче на большие расстояния. На подстанциях понижающие трансформаторы уменьшают напряжение до уровня, приемлемого для промышленных и бытовых потребителей.
Помимо энергосистем, трансформаторы применяются в электронике, радиотехнике и системах связи. Импульсные трансформаторы используются в импульсных источниках питания, обеспечивая гальваническую развязку и преобразование напряжения. Силовые трансформаторы малой мощности применяются в блоках питания электронных устройств. В измерительных цепях используются измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые позволяют безопасно контролировать параметры высоковольтных сетей.
Существует множество видов трансформаторов, классифицируемых по различным критериям. По назначению выделяют силовые, измерительные, согласующие и автотрансформаторы. Силовые трансформаторы предназначены для передачи и распределения электроэнергии, измерительные — для подключения приборов учета и защиты, согласующие — для согласования сопротивлений в электронных схемах, а автотрансформаторы обеспечивают плавное регулирование напряжения.
По конструкции магнитопровода различают стержневые, броневые и тороидальные трансформаторы. Стержневые трансформаторы обладают высокой механической прочностью и применяются в мощных энергетических установках. Броневые трансформаторы компактны и используются в устройствах с ограниченным пространством. Тороидальные трансформаторы характеризуются минимальными магнитными потерями и применяются в высокочастотных схемах.
По количеству фаз трансформаторы делятся на однофазные и трехфазные. Однофазные трансформаторы используются в маломощных устройствах и бытовых сетях, трехфазные — в промышленных энергосистемах. В зависимости от способа охлаждения выделяют масляные и сухие трансформаторы. Масляные трансформаторы применяются в высоковольтных сетях, где требуется эффективное охлаждение и изоляция, сухие — в помещениях с повышенными требованиями к пожарной безопасности.
Особую группу составляют специализированные трансформаторы, такие как сварочные, разделительные и пик-трансформаторы. Сварочные трансформаторы обеспечивают стабильный ток для дуговой сварки, разделительные — гальваническую развязку цепей, пик-трансформаторы — формирование импульсов напряжения. Разнообразие конструкций и областей применения трансформаторов обусловлено их высокой надежностью, КПД и адаптивностью к различным условиям эксплуатации.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции, описанной Фарадеем, и представляет собой ключевой элемент современных энергетических систем. Трансформатор, являясь статическим электромагнитным устройством, обеспечивает преобразование переменного напряжения и тока при неизменной частоте, что позволяет эффективно передавать электроэнергию на значительные расстояния с минимальными потерями. Основу его работы составляет взаимосвязь между первичной и вторичной обмотками, намотанными на общий магнитопровод, где изменение магнитного потока, создаваемого переменным током в первичной обмотке, индуцирует ЭДС во вторичной обмотке. Коэффициент трансформации определяется соотношением числа витков обмоток, что позволяет регулировать выходное напряжение в соответствии с требованиями потребителей.
Важнейшими характеристиками трансформатора являются КПД, зависящий от потерь в меди и стали, а также способность сохранять стабильность параметров при изменении нагрузки. Современные конструкции трансформаторов учитывают необходимость минимизации вихревых токов и гистерезисных потерь за счёт применения шихтованных магнитопроводов и высококачественных электротехнических сталей. Дополнительно, развитие силовой электроники и цифровых систем управления позволило создать интеллектуальные трансформаторы, обеспечивающие автоматическое регулирование режимов работы и интеграцию в умные энергосистемы.
Таким образом, трансформатор остаётся неотъемлемым компонентом электроэнергетики, обеспечивающим надёжность, экономичность и гибкость распределения электрической энергии. Дальнейшие исследования в области материаловедения, оптимизации конструкций и внедрения инновационных технологий позволят повысить эффективность трансформаторов, снизить их массогабаритные показатели и расширить функциональные возможности в условиях растущих требований к энергосистемам. Перспективы развития связаны с применением высокотемпературных сверхпроводников, нанотехнологий и цифровых методов мониторинга, что открывает новые горизонты для совершенствования данного класса устройств.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П.. Электрические машины. 2006 (книга)

2. Бутырин П.А., Копылов И.П.. Теория электромеханических преобразователей. 2010 (книга)

3. Сергеенков Б.В.. Трансформаторы: теория и практика. 2015 (книга)

4. Герасимов В.Г. и др.. Электротехника и электроника. 2018 (книга)

5. IEEE Power & Energy Society. Transformer Principles and Applications. 2020 (статья)

6. Smith R.L.. Fundamentals of Transformer Design. 2012 (статья)

7. MIT OpenCourseWare. Lecture Notes on Transformers. 2019 (интернет-ресурс)

8. Khan Academy. How Transformers Work. 2021 (интернет-ресурс)

9. ABB Group. Technical Guide: Transformer Basics. 2017 (интернет-ресурс)

10. Wikipedia. Transformer. n.d. (интернет-ресурс)