

Audio Transformers

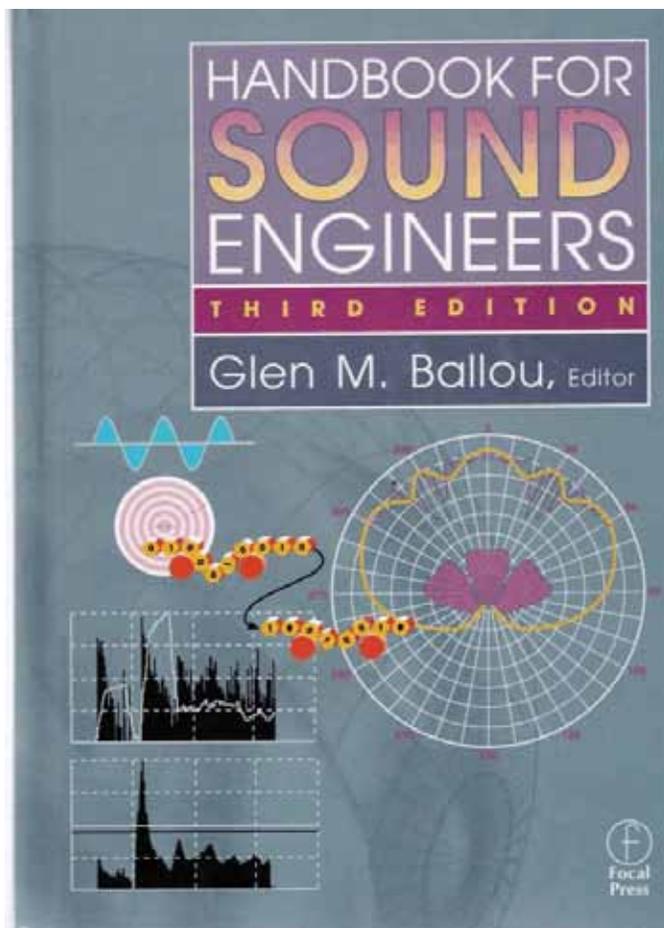
by

Bill Whitlock

Jensen Transformers, Inc.

9304 Deering Avenue

Chatsworth, CA 91311



This work first published by Focal Press in 2001 as

Chapter 11

Handbook for Sound Engineers, Third Edition

Glen Ballou, Editor

Copyright © 2001, 2006 Bill Whitlock

All rights reserved

(Перевод на русский - GoogleПереводчик)

1 Основы аудиотрансформатора.	2
1.1 Основные принципы и терминология.	2
1.1.1 Магнитные поля и индукция.	2
1.1.2 Соотношение обмоток и витков.	2
1.1.3 Ток возбуждения.	3
1.2 Реалии практических трансформаторов.	4
1.2.1 Основные материалы и конструкция.	4
1.2.2 Сопротивления обмоток и автотрансформаторы.	6
1.2.3 Индуктивность утечки и методы намотки.	7
1.2.4 Емкости обмоток и экраны Фарадея.	8
1.2.5 Магнитное экранирование.	8
1.3 Общие рекомендации по применению.	9
1.3.1 Максимальный уровень сигнала, искажения и сопротивление источника.	9
1.3.2 Частотная характеристика.	10
1.3.3 Вносимая потеря.	11
1.3.4 Источники с нулевым импедансом.	12
1.3.5 Двухнаправленное отражение импедансов.	12
1.3.6 Коэффициент шума трансформатора.	13
1.3.7 Базовая классификация по применению.	14
2 аудиотрансформаторы для специальных приложений.	14
2.1 Приложения на уровне оборудования.	15
2.1.1 Микрофонный вход.	15
2.1.2 Линейный вход.	15
2.1.3 Вход фоновкорректора с подвижной катушкой.	16
2.1.4 Линейный выход.	16
2.1.5 Межкаскадная мощность и выходная мощность.	17
2.1.6 Выход микрофона.	18
2.2 Приложения системного уровня.	18
2.2.1 Изоляция микрофона или «разветвитель».	18
2.2.2 Преобразование импеданса микрофона.	18
2.2.3 Линейный микрофонный вход или «Direct Vox».	18
2.2.4 Изоляция линии или «Устранители шума».	19
2.2.5 Распределение динамиков или «постоянное напряжение».	21 год
2.2.6 Телефонная изоляция или «Повторная катушка».	22
2.2.7 Телефонная Направленная Связь или «Гибрид».	23
2.2.8 Повышающий звукосниматель с подвижной катушкой.	23
3 Измерения и таблицы данных.	24
3.1 Тестирование и измерения.	24
3.1.1 Характеристики передачи.	24
3.1.2 Баланс Ch характеристики.	24
3.1.3 Сопротивления, емкости и другие данные.	25
3.2 Таблицы данных.	25
3.2.1 Данные для впечатления или для информирования?	25
3.2.2 Пример подробного описания данных.	25
4 Установка и обслуживание.	28
4.1 Несколько советов по установке.	28
4.2 Размагничивание.	28
Референсы.	29

1 Основы аудиотрансформатора

С момента зарождения аудиоэлектроники звуковой трансформатор играет важную роль. По сравнению с современной миниатюрной электроникой трансформатор кажется большим, тяжелым и дорогим, но он продолжает оставаться наиболее эффективным решением во многих аудиоприложениях. Полезность трансформатора заключается в том, что электрическая энергия может передаваться от одной цепи к другой.

без прямого подключения, и в процессе энергия может быть легко изменена с одного уровня напряжения на другой.

Хотя трансформатор не является сложным устройством, требуется подробное объяснение, чтобы правильно понять, как он работает. Эта глава предназначена для помощи инженеру аудиосистемы в правильном выборе и применении трансформаторов. В интересах простоты будут рассмотрены только основные концепции их конструкции и изготовления.

1.1 Основные принципы и терминология

1.1.1 Магнитные поля и индукция

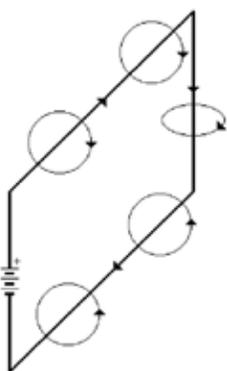


Figure 1 - Magnetic Field Surrounding Conductor

Как показано на рисунке 1, вокруг любого проводника (провода), по которому течет ток, создается магнитное поле. Сила поля прямо пропорциональна току. Эти невидимые магнитные силовые линии, вместе называемые потоком, расположены под прямым углом к проводу и имеют направление или магнитную полярность, которая зависит от направления потока тока. Обратите внимание, что хотя поток вокруг верхнего и нижнего проводов имеет разные направления, линии внутри петли помогают, потому что они указывают в одном направлении. Если в контуре протекает переменный ток, мгновенная интенсивность и полярность потока будут изменяться с той же частотой и прямо пропорционально мгновенному значению.

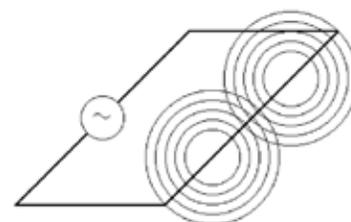


Figure 2 - AC Magnetic Field

текущий. Мы можем визуализировать этот поток, представленный концентрическими кругами на рисунке 2, как расширяющийся, сжимающийся и изменяющий полярность с каждым циклом переменного тока. Закон индукции гласит, что напряжение будет индуцироваться в проводнике, подверженном изменению магнитного потока, и что индуцированное напряжение будет пропорционально

скорости изменения потока. Это напряжение имеет мгновенную полярность, которая противодействует исходному току, протекающему в проводе, создавая кажущееся сопротивление, называемое индуктивным реактивным сопротивлением. Индуктивное реактивное сопротивление рассчитывается по формуле $X_L = 2\pi fL$, где X_L - индуктивное реактивное сопротивление в омах, f - частота в Гц, а L - индуктивность в единицах Генри. Индуктор обычно состоит из множества витков или петель провода, называемых катушкой, как показано на рисунке 3, которая связывает и концентрирует линии магнитного потока, увеличивая плотность потока. Индуктивность любой данной катушки определяется такими факторами, как количество витков, физические размеры и природа обмотки, а также свойства материалов на пути магнитного потока.

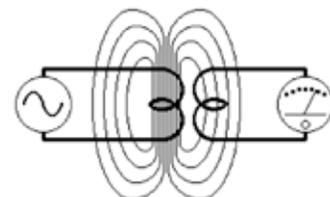


Figure 4 - Inductive Coupling

По закону индукции в любом проводнике (проводе), который перерезает силовые линии, возникает напряжение. Следовательно, если мы разместим две катушки рядом друг с другом, как показано на рисунке 4, переменный ток в одной катушке вызовет переменное напряжение во второй катушке. Это основной принцип передачи энергии в трансформаторе. Трансформаторы не работают при постоянном токе, поскольку для их работы требуется изменяющееся магнитное поле. В идеальном трансформаторе магнитная связь между двумя катушками является полной и полной, то есть все силовые линии от одной проходят через все витки другой. Коэффициент связи равен единице или 1,00.

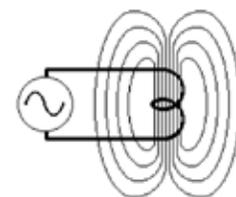


Figure 3 - Coil Concentrates Flux

1.1.2 Обмотки и соотношение витков

Катушка или обмотка, приводимая в действие источником электричества, называется первичной, а вторая - вторичной. Отношение числа витков на первичной обмотке к числу витков на вторичной обмотке называется отношением витков. Поскольку в каждом витке каждой обмотки индуцируется по существу одинаковое напряжение, соотношение первичного и вторичного напряжений такое же, как и соотношение витков. Например, при 100 витках первичной обмотки и 50 витках вторичной обмотки соотношение витков составляет 2: 1. Следовательно, если бы к первичной обмотке было приложено 20 вольт, то на вторичной обмотке появилось бы 10 вольт. Поскольку он снижает напряжение, этот трансформатор можно назвать понижающим трансформатором. И наоборот, трансформатор с соотношением витков 1: 2 будет называться повышающим трансформатором, поскольку его вторичное напряжение будет вдвое больше, чем первичное. Поскольку трансформатор не создает мощность, выходная мощность вторичной обмотки идеального трансформатора может быть только равной (а в реальном трансформаторе только меньше) мощности, потребляемой первичной обмоткой. Рассмотрим идеальный повышающий трансформатор 1: 2. Когда на первичную обмотку подается 10 вольт, на вторичной обмотке появляется 20 вольт. Поскольку первичная обмотка не потребляет ток, ее сопротивление кажется бесконечным или разомкнутым. Когда нагрузка 20 мкА подключена к вторичной обмотке, течет ток в 1 ампер, делая выходную мощность равной 20 Вт. В то же время ток в 2 ампера потребляется первичной обмоткой, что делает входную мощность равной 20 Вт. Поскольку первичная обмотка теперь потребляет 2 ампера при поданном напряжении 10 вольт, ее импеданс составляет 5 Ом. Другими словами, сопротивление нагрузки 20 Ом на вторичной обмотке отражается на первичной обмотке как 5 Ом. В этом примере трансформатор с отношением витков 1: 2 показал отношение импеданса 1: 4. Трансформаторы всегда отражают импедансы от одной обмотки к другой квадратом их отношения витков или выражаются формулой: $Z_p/Z_s = (N_p/N_s)^2$, где Z_p - полное сопротивление первичной обмотки, Z_s - вторичное сопротивление, а N_p / N_s - коэффициент трансформации (который совпадает с коэффициентом напряжения).

Направление, в котором намотаны катушки, то есть по часовой стрелке или против часовой стрелки, и / или соединения с началом или концом каждой обмотки определяют мгновенную полярность переменного напряжения. Все обмотки, намотанные в одном направлении, будут иметь одинаковую полярность между началом и концом. Следовательно, относительно первичной полярности можно инвертировать либо (1) намотав первичную и вторичную обмотки в противоположных направлениях, либо (2) поменяв местами начальное и конечное подключения к любой обмотке. В условных обозначениях трансформаторов точки иногда используются, чтобы указать, какие концы обмоток имеют одинаковую полярность. При последовательном или параллельном подключении к трансформаторам с несколькими обмотками необходимо соблюдать полярность. Ответители - это соединения, выполняемые в любой промежуточной точке обмотки. Если намотано 50 витков, электрическое соединение отключено, а еще 50 витков завершают обмотку, например, обмотка на 100 витков называется центральной.

1.1.3 Ток возбуждения

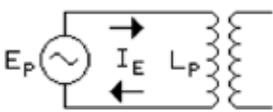


Figure 5 - Excitation Current

Как показано на **рисунке 5**, когда на вторичной обмотке трансформатора нет нагрузки и к первичной обмотке приложено переменное напряжение, ток возбуждения будет течь в первичной обмотке, создавая магнитный поток возбуждения вокруг обмотки. Теоретически ток возникает только из-за индуктивного сопротивления первичной обмотки. В соответствии с законом Ома и формулой для индуктивного сопротивления,

$$I_E = E_p \div 2\pi f L_p, \text{ где } I_E - \text{ток возбуждения в амперах, } E_p - \text{первичное напряжение}$$

в вольтах, f - частота в Гц, а L_p - первичная

индуктивность по Генри. В идеальном трансформаторе индуктивность первичной обмотки была бы бесконечной, что делало бы ток возбуждения равным нулю. Как показано на **рисунке 6**, когда нагрузка подключена, ток будет течь во вторичной обмотке.

Поскольку вторичный ток протекает в противоположном направлении, он создает магнитный поток, который противодействует потоку возбуждения. Это приводит к падению импеданса первичной обмотки, что приводит к дополнительному току, потребляемому от источника возбуждения, что создает дополнительный поток, достаточный для полного подавления потока, создаваемого вторичной обмоткой. Результат, который может удивить некоторых, заключается в том, что плотность потока в трансформаторе не увеличивается током нагрузки. Это также показывает, как ток нагрузки вторичной обмотки отражается на первичной обмотке.

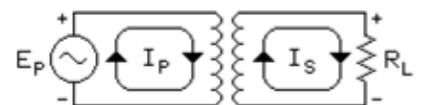


Figure 6 - Cancellation of Flux Generated by Load Current

На **рисунке 7** показана взаимосвязь между напряжением, током возбуждения и магнитным потоком в трансформаторе при изменении частоты. Горизонтальная шкала - время. Первичное напряжение **E_p** поддерживается на постоянном уровне, поскольку частота увеличивается втрое, а затем снова втрое. Например, левый сигнал может представлять один цикл на 100 Гц, средний 300 Гц и правый 900 Гц.

Из-за первичной индуктивности ток возбуждения **I_p** будет уменьшаться линейно с частотой, т. е. уменьшение вдвое при каждом удвоении частоты или уменьшение на 6 дБ на октаву. Величина магнитного потока также будет уменьшаться точно так же. Обратите внимание, что индуктивность также вызывает фазовую задержку на 90 градусов. Поскольку скорость нарастания синусоидальной волны с постоянной амплитудой линейно увеличивается с частотой, то есть удваивается при каждом удвоении частоты или увеличивается на 6 дБ на октаву, результирующая скорость изменения потока остается постоянной. Обратите внимание, что наклон кривых **I_p** и потока остается постоянным при изменении частоты. Поскольку, согласно закону индукции, напряжение, индуцированное во вторичной обмотке, пропорционально этой крутизне или скорости изменения, частотная характеристика будет равномерной или «плоской».

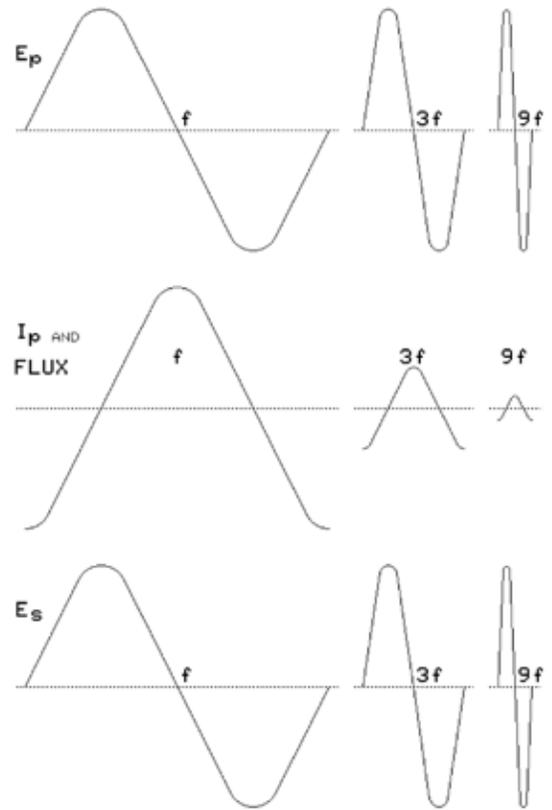


Figure 7 - Excitation Current and Flux Vary Inversely with Frequency

1.2 Реалии практических трансформаторов

До сих пор мы не рассматривали неизбежные паразитные элементы, которые существуют в любом практическом трансформаторе. Даже конструкция относительно простого силового трансформатора 60 Гц должна учитывать их. Спроектировать аудиотрансформатор, работающий в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц, гораздо сложнее, поскольку эти элементы часто взаимодействуют сложным образом. Например, материалы и методы, которые улучшают низкочастотные характеристики, часто вредны для высокочастотных характеристик и наоборот. Хорошая конструкция трансформатора должна учитывать как окружающие электронные схемы, так и компромиссные решения внутренней конструкции.

Схематическое изображение основных низкочастотных паразитных элементов в обобщенном трансформаторе показано на **рисунке 8**. «IDEAL XFM R» представляет собой идеальный трансформатор с соотношением витков 1: N и без каких-либо паразитных элементов. Фактический трансформатор подключен на выводах «PRI» к источнику управляющего напряжения через его полное сопротивление **RG**, а на выводах «SEC» к нагрузке **RL**.

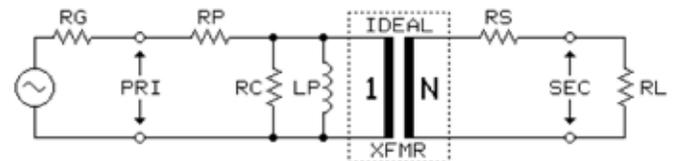


Figure 8 - Transformer Low-Frequency Parasitic Elements

Одна из основных целей при проектировании любого трансформатора - уменьшить ток возбуждения в первичной обмотке до незначительного уровня, чтобы не стать значительной нагрузкой на источник возбуждения. При заданном напряжении и частоте источника первичный ток возбуждения можно уменьшить только за счет увеличения индуктивности **LP**. В контексте нормальных импедансов электронных цепей для удовлетворительной работы на самых низких звуковых частотах требуются очень большие значения индуктивности. Конечно, индуктивность можно увеличить, используя очень большое количество витков катушки, но, по причинам, обсуждаемым ниже, существуют практические ограничения из-за других соображений. Еще один способ увеличить индуктивность в 10 000 раз и более - намотать катушку на определенные высокомагнитные материалы.

1.2.1 Основные материалы и конструкция

Магнитные цепи очень похожи на электрические цепи. Как показано на **рисунке 11**, магнитный поток всегда проходит по замкнутому пути от одного магнитного полюса к другому и, как электрический ток, всегда способствует путям с наибольшей проводимостью или наименьшим сопротивлением. Эквивалентом приложенного напряжения в магнитных цепях является сила намагничивания, обозначаемая символом **H**. Она прямо пропорциональна «ампер-виткам» (ток катушки **I**, умноженный на количество витков **N**) и обратно пропорциональна длине пути потока ℓ в магнитной цепи. Эквивалентом электрического тока является плотность потока, обозначаемая буквой **B**. Она измеряется как количество линий магнитного потока на квадратную единицу площади. Графический график зависимости между напряженностью поля и плотностью потока показан на **рисунке 9** и относится к «петле В-Н» или «петле гистерезиса» для данного материала. В Соединенных Штатах наиболее часто используемыми единицами измерения силы намагничивания и плотности потока являются Эрстед и Гаусс, соответственно, которые представляют собой CGS (сантиметр, грамм, секунда). В Европе более распространены единицы СИ (Systeme International) - амперы на метр и тесла соответственно. Наклон петли В-Н показывает, как постепенное увеличение приложенной силы намагничивания изменяет результирующую плотность потока. Этот наклон фактически является мерой проводимости в магнитной цепи и называется проницаемостью, обозначаемой символом μ . Любой материал внутри катушки, который также может служить формой для ее поддержки, называется сердечником. По определению проницаемость воздуха составляет 1,00, и обычные «немагнитные» материалы, такие как алюминий, латунь, медь, бумага, стекло и пластик, также имеют проницаемость 1 для практических целей. Проницаемость некоторых распространенных «ферромагнитных» материалов составляет около 300 для обычной стали, около 5000 для трансформаторной стали с 4% кремния и до около 100000 для некоторых никель-железо-молибденовых сплавов. Поскольку такие материалы концентрируют магнитный поток, они значительно увеличивают индуктивность катушки. Звуковые трансформаторы должны использовать как сердечники с высокой магнитной проницаемостью, так и наибольшее практическое количество витков катушки для создания высокой первичной индуктивности. Индуктивность катушки увеличивается пропорционально квадрату числа витков и прямо пропорциональна проницаемости сердечника и может быть аппроксимирована по формуле: $L = 3.2 N^2 \mu A / 10^8 \ell$, где L = индуктивность в единицах Генри, N = количество витков витки катушки, μ = проницаемость сердечника, A = площадь поперечного сечения сердечника в квадратных дюймах и ℓ = средняя длина пути потока в дюймах.

Проницаемость магнитных материалов зависит от плотности потока. Как показано на **рисунке 9**, когда напряженность магнитного поля становится высокой, материал может насыщаться, по существу теряя способность проводить любой дополнительный поток. По мере насыщения материала его проницаемость уменьшается до тех пор, пока при полном насыщении его проницаемость не станет равной проницаемости воздуха или 1. В аудиотрансформаторах магнитное насыщение приводит к постоянному увеличению низкочастотных гармонических искажений для низкочастотных сигналов по мере их увеличения уровня выше порог. Как правило, материалы с более высокой проницаемостью имеют тенденцию к насыщению при более низкой плотности потока. В общем, проницаемость также обратно пропорциональна частоте.

Магнитный гистерезис можно рассматривать как эффект магнитной памяти. Когда сила намагничивания насыщает материал с высоким гистерезисом, он остается сильно намагниченным даже после снятия силы. Материалы с высоким гистерезисом имеют широкие или «квадратные» **петли В-Н** и используются для изготовления устройств магнитной памяти и постоянных магнитов. Однако, если мы магнитно насыщаем материал с нулевым гистерезисом, он не будет иметь остаточного магнетизма (плотности потока), когда сила намагничивания будет удалена. Однако практически все материалы сердечника с высокой проницаемостью имеют некоторый гистерезис, сохраняя небольшую память о своем предыдущем магнитном состоянии. Гистерезис можно значительно уменьшить, используя определенные металлические сплавы, которые были отожжены или подвергнуты термообработке с использованием специальных процессов. В аудиотрансформаторах нелинейность из-за магнитного гистерезиса вызывает повышенные гармонические искажения для низкочастотных сигналов при относительно низких уровнях сигнала.

Резистор **РС** на **рисунке 8** представляет собой нелинейное сопротивление, которое представляет собой комбинированное влияние магнитного насыщения, магнитного гистерезиса и потерь на вихревые токи.

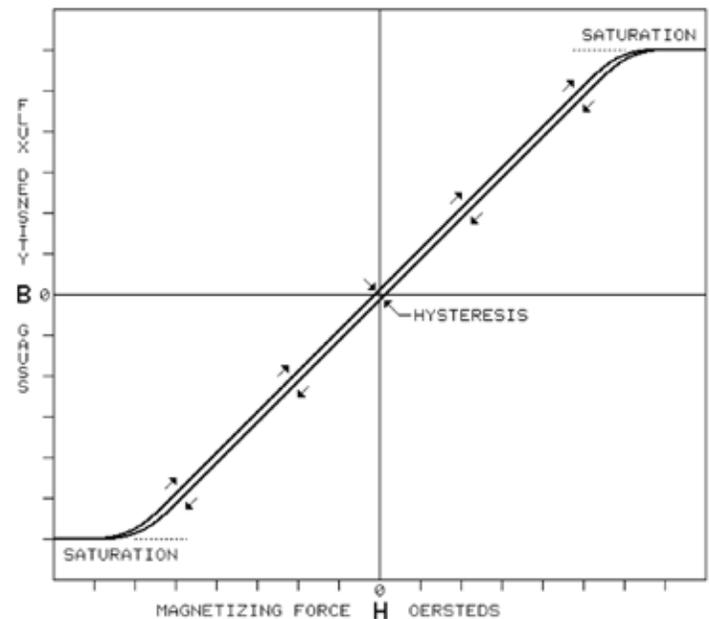


Figure 9 - B-H Loop for Magnetic Core Material

Магнитная рабочая точка (или точка нулевого сигнала) для большинства трансформаторов является центром контура В-Н, показанного на **рисунке 9**, где результирующая сила намагничивания равна нулю. Слабые сигналы переменного тока заставляют проходить небольшую часть контура в направлении стрелок.

Сильные сигналы переменного тока проходят части дальше от рабочей точки и могут приближаться к конечным точкам насыщения. Для этой нормальной рабочей точки в центре искажения сигнала (подробно обсуждаемые ниже), вызванные кривизной контура, являются симметричными, то есть они одинаково влияют на положительный и отрицательный ход. Симметричные искажения создают гармоники нечетного порядка, такие как третья и пятая. Если в обмотке протекает постоянный ток, рабочая точка сместится в точку петли, расположенную дальше от центра. Это приводит к тому, что искажение наложенного переменного сигнала становится несимметричным. Несимметричные искажения создают гармоники четного порядка, такие как вторую и четвертую. Когда в обмотке протекает небольшой постоянный ток, скажем, ниже 1% от значения насыщения, эффект заключается в добавлении гармоник четного порядка к нормальному содержанию нечетного порядка гистерезисных искажений, которое влияет в основном на сигналы низкого уровня.

Те же эффекты возникают, когда сердечник становится слабо намагниченным, что может произойти, например, при кратковременном случайном приложении постоянного тока к обмотке. Однако узкая петля В-Н указывает на то, что останется только слабое остаточное поле, даже если намагничивающая сила, достаточно сильная для насыщения сердечника, была приложена и затем удалена.

Когда в обмотке протекает большой постоянный ток, симметрия искажения насыщения также изменяется аналогичным образом. Например, в обмотке может протекать достаточно постоянного тока, чтобы сместить рабочую точку до 50% от значения насыщения сердечника. Тогда может быть обработана только половина сигнала переменного тока, прежде чем сердечник перейдет в насыщение, и, когда это произойдет, это произойдет только для одного направления размаха сигнала. Это привело бы к сильному искажению второй гармоники. Чтобы избежать таких эффектов насыщения, в магнитную цепь иногда намеренно встраивают воздушные зазоры. Это можно сделать, например, поместив тонкую бумажную прокладку между центральным стержнем сердечников **Е** и **И** на **Рисунке 10**. Магнитная проницаемость такого зазора настолько мала - даже если она может составлять всего несколько тысячных долей дюйма - по сравнению с материалом сердечника, он эффективно контролирует плотность магнитного потока во всей магнитной цепи.

Несмотря на то, что это значительно снижает индуктивность катушки, зазоры используются для предотвращения достижения плотности магнитного потока уровней, которые в противном случае могли бы привести к насыщению сердечника, особенно когда в обмотке присутствует значительный постоянный ток.

Поскольку материалы с высокой проницаемостью обычно также являются электрическими проводниками, небольшие напряжения также индуцируются в поперечном сечении самого материала сердечника, что приводит к возникновению вихревых токов. Вихревые токи значительно уменьшаются, если сердечник состоит из «стопки» тонких листов, называемых пластинами, как показано на **рисунке 10**. Поскольку пластинки эффективно изолированы друг от друга, вихревые токи обычно незначительны. Показанные пластинки **Е** и **И** образуют широко используемую конструкцию сердцевин «оболочка» или «двойное окно». Его параллельные магнитные пути показаны на **Рисунке 11**. Когда сердечники сделаны из пластин, необходимо следить за тем, чтобы они были плоскими и прямыми, чтобы избежать крошечных воздушных зазоров между ними, которые могут значительно снизить индуктивность.

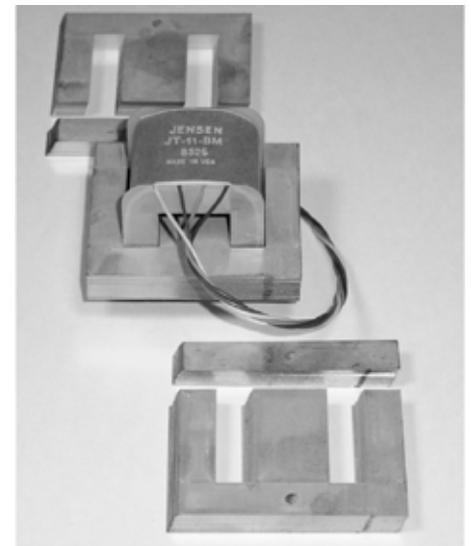


Figure 10 - Core Laminations are Stacked and Interleaved around Bobbin which Holds Windings

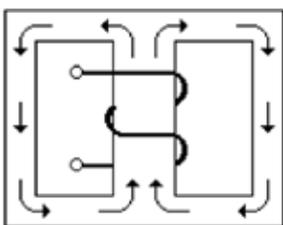


Figure 11 - Magnetic Circuits in Shell Core

Тороидальный сердечник изготавливается путем скатывания длинной тонкой полосы материала сердечника в форму свернутого кольца, которая выглядит как пончик. Он изолирован конформным покрытием или лентой, а обмотки наматываются вокруг сердечника через центральное отверстие с помощью специальных машин. В тороидальном сердечнике отсутствуют непреднамеренные воздушные зазоры, которые могут ухудшить магнитные свойства. В аудиотрансформаторах не часто используются тороидальные сердечники, потому что, особенно в конструкциях с высокой пропускной способностью, где необходимы множественные секции или экраны Фарадея, физическая конструкция становится очень сложной. Другие конфигурации сердечника включают кольцевое ядро, иногда называемое «полутороидальным». Он похож на сердечник на **Рисунке 11**, но без центральной секции и обмоток, размещенных по бокам. Иногда цельнометаллический (не слоистый) вариант кольцевого сердечника разрезают на две части с полированными сопрягаемыми поверхностями. Эти два С-образных сердечника затем удерживаются вместе зажимами после установки обмоток.