

Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов и в монтаже схемы

1. Введение

При повышении частоты преобразования потери на вихревые токи и паразитные индуктивности могут значительно ухудшить параметры схемы. Эти высокочастотные эффекты являются следствием возникновения магнитного поля при протекании тока по обмоткам трансформатора и по проводам схемы.

Эта статья предназначена для полного понимания данного феномена, что необходимо для качественной разработки высокочастотных схем. Среди прочих публикаций – это (1), где рассмотрено катастрофическое возрастание потерь на вихревые токи в многослойных обмотках., (2), где указано на невозможность параллельной работы тонких лент, (3), где показана возможность больших потерь в пассивных проводниках (экраны Фарадея и обмотки со средней точкой) и, наконец, (4) рассматривает случай, когда потери и индуктивность рассеяния возрастают из-за того, что провод для обмотки выбран слишком толстый.

2. Основные принципы

Дальнейшее развитие темы подразумевает использование данных принципов, представленных ниже как обзор основ магнетизма.

1. **Закон Ампера:** общая магнитодвижущая сила вдоль любого замкнутого пути равна общему циркулирующему току по этой цепи:

$$F = \oint H dl = I_t = NI \quad (\text{Ампер}) \quad (1),$$

где F – общая магнитодвижущая сила (в амперах) вдоль пути длиной l , H – напряженность поля (А/м) и I_t – общий ток через все витки, охватывающие этот путь.

2. **Сохранение энергии:** в любой момент времени ток в проводнике и магнитное поле распределяются так, что бы минимизировать потребление энергии от источника.

3. **Количество энергии в поле:** магнитное поле – это энергия. Плотность энергии в любой точке поля:

$$w = \int H dB \quad (\text{Джоуль/м}^3),$$

где B – плотность потока (Тесла).

В импульсных источниках питания почти вся магнитная энергия сосредоточена в магнитном зазоре, изоляции между проводами и в самих проводах, где относительная магнитная проницаемость μ_r постоянна и фактически равна 1.

Плотность энергии там:

$$W = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu_o H^2 \quad (\text{Джоуль/м}^3),$$

где μ_o – абсолютная магнитная проницаемость ($4\pi \cdot 10^{-7}$ в СИ). Общая энергия W (Дж) находится путем интегрирования плотности энергии по сплошному объему V поля:

$$W = \frac{1}{2} \mu_o \int H^2 dv \quad (\text{Дж})$$

В обычных трансформаторах и дросселях магнитная энергия почти всегда заключена в областях, где напряженность поля H относительно постоянна и вполне предсказуема. Это, как правило часто наблюдается в проводниках схемы.

В этом случае:

$$W = \frac{1}{2} \mu_o H^2 A l \quad (\text{Дж}) \quad (2)$$

И из (1) и $H l = N I$, замещая H получим:

$$W = \frac{1}{2} \mu_o N^2 I^2 A / l \quad (\text{Дж}) \quad (3)$$

Здесь A – площадь сечения (м^2) области нормального поля, а l – длина области в метрах (и эффективная длина поля).

4. **Индуктивность схемы:** индуктивность есть мера способности электрической схемы хранить магнитную энергию. Количество запасенной энергии в поле из (3) с той же самой энергией в электрических терминах:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \mu_o N^2 I^2 A / l ;$$

$$L = \mu_o N^2 I^2 A / l \quad (4)$$

3. Поверхностный эффект (скин – эффект)

Рисунок 1 показывает магнитное поле (его силовые линии) в и вокруг проводника с постоянным током или с током низкой частоты. Поле радиально симметрично только в том случае, если проводник с возвратным током (и с его магнитным полем) отнесен достаточно далеко.

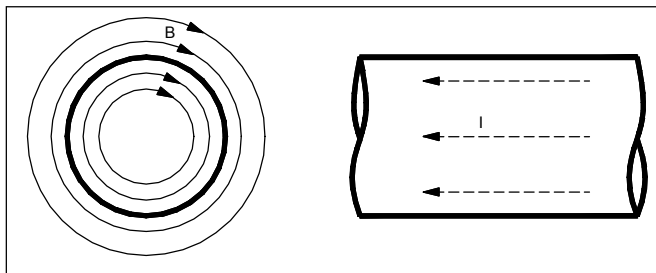


Рис. 1 Изолированный проводник на высокой частоте

При низкой частоте энергия магнитного поля незначительна по сравнению с потерями энергии в проводах. Поэтому ток распределен равномерно по сечению проводника, так как уменьшение общей энергии требует минимизацию потерь в сопротивлении.

По любому замкнутому пути вне провода (но внутри пути возврата тока) магнитодвижущая сила постоянна и равна общему току I . Однако напряженность поля H изменяется обратно пропорционально расстоянию от проводника, поскольку постоянная F приложена через возрастающее $l (= \pi r)$.

Внутри проводника F на любом радиусе должна равняться току, заключенному в этом радиусе, и, следовательно, F пропорционально r^2 .

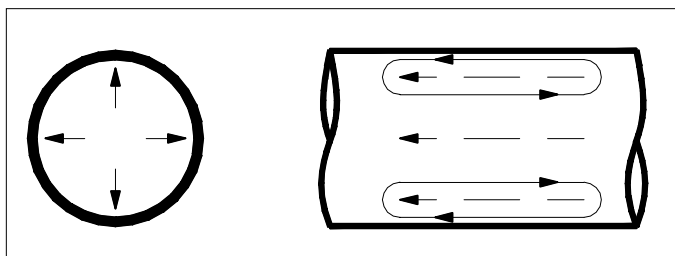


Рис.2 Вихревые токи на высокой частоте

При высокой частоте: рис. 2 дает обобщенную модель, объясняющую, что происходит при возрастании частоты. Силовые линии показывают однородное распределение низкочастотного тока, соответствующее рис.1. При

резком изменении тока (при высокой частоте) поле внутри провода изменяется так же резко. Изменение поля вызывает петли напряжений, или вихри, как показано сплошными линиями вблизи поверхности провода. Поскольку это индуцированное напряжение находится внутри проводника, оно вызывает соответствующий вихревой ток. Заметим теперь, что направление вихревого тока совпадает с направлением основного тока на поверхности, но противоположно ему в центре провода.

В результате, при повышении частоты, плотность тока возрастает на поверхности провода и уменьшается до нуля в центре, как показано на рис.3. Ток экспоненциально убывает внутрь провода. Часть провода, фактически переносящая ток, уменьшается, и сопротивление на высокой частоте (и, соответственно, потери) могут быть значительно выше, чем при низкой частоте.

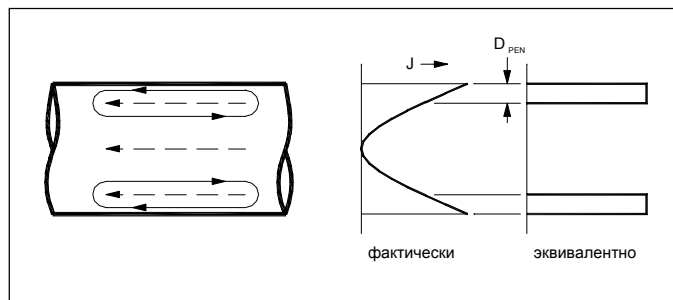


Рис.3 Распределение тока на высокой частоте

Глубина проникновения. Глубина проникновения, или толщина поверхности, D_{PEN} , определяется как расстояние от поверхности, где плотность тока равна $1/e$ от плотности тока на поверхности (e – основание натуральных логарифмов).

$$D_{PEN} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (5),$$

где ρ - удельное сопротивление. Для условий: $t^\circ = 100^\circ C$, $\rho = 2,3 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot cm$, $\mu_o = \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$, и:

$$D_{PEN} = \frac{7,5}{\sqrt{f}} \quad (6)$$

Из (6) при 100 кГц $D_{PEN} = 0,24$ мм и 0,075мм при 1МГц.

Формулы (5) и (6) справедливы для плоской поверхности проводника, или когда радиус кривизны значительно больше глубины проникновения.

Несмотря на то, что ток экспоненциально уменьшается от поверхности, обычно считают, что сопротивление (и потери) при высокой частоте такие же, как и на глубине проникновения, а затем резко увеличиваются до бесконечности (рис.3 справа). Это эквивалентное прямоугольное распределение чрезвычайно легко для анализа.

Метод эквивалентной схемы. Другим способом анализа высокочастотных эффектов в обмотках трансформатора и в проводах схемы является использование эквивалентной электрической схемы. Для разработчика этот подход, вероятно, более приемлем.

Рис. 4 показывает эквивалентную электрическую схему изолированного проводника из рисунков 1, 2 и 3. При токе I , протекающем через проводник, L_x является местом, где сосредоточена энергия $\frac{1}{2}L_x I^2$ внешнего магнитного поля. Соответственно, L_x является индуктивностью проводника на высокой частоте.

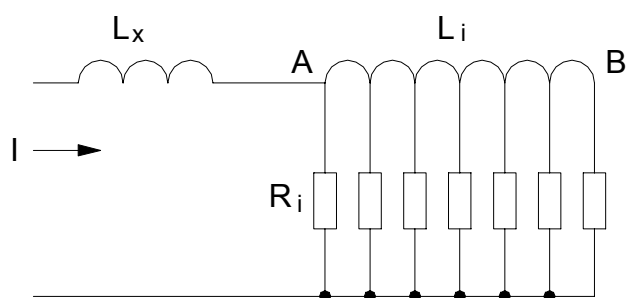


Рис.4 Эквивалентная схема проводника

Точка А расположена на поверхности проводника, а точка В – в его центре. R_i есть сопротивление, распределенное по толщине проводника от его поверхности к центру. Сечение проводника разбивается на множество концентрических цилиндров с эквивалентной площадью, и R_i показано как распределение сопротивлений по каждому из цилиндров. Кроме того, L_i содержит энергию, распределенную по каждой цилиндрической секции. Энергия, хранимая в каждой секции, зависит от плотности тока, протекающего через элемент по порядку расположения секций на эквивалентной схеме.

Заметим, что внешняя индуктивность провода L_x (или индуктивность рассеяния проводника схемы) ограничивает максимальное значение di/dt через проводник в зависимости от внутреннего сопротивления источника напряжения и снимает зависимость ее от скорости срабатывания ключа.

Временная область. Если ток через проводник быстро возрастает, напряжение на нем велико за счет самоиндукции L_x . Внутренняя индуктивность L_i блокирует протекание тока по внутренней части проводника и увеличивает его на поверхности через левые (на рисунке) резистивные элементы даже после того, как ток достигнет своего номинального значения и напряжение на L_x спадет. Несмотря на то, что энергия, требуемая L_x , возмещена, напряжение на проводнике очень быстро стабилизируется, поскольку ток, незначительно проникая во внутренние области проводника, вынужден протекать лишь по внешнему слою. Энергия рассеивается главным образом в это тонком слое.

Напряжение через эти внешние R_i элементы образуется от прохождения тока через смежный L_i элемент по направлению к центру проводника, поскольку ток в L_i повышается по мере приближения к поверхности. Ток не может проникнуть внутрь поля, так как возникает внутри проводника и для этого требуется энергия. С течением времени проводимость распространяется от поверхности проводника к его центру (к точке В на эквивалентной схеме), запасая энергию в L_i . Многие из R_i элементов начинают проводить, уменьшая общее сопротивление и, соответственно, снижая уровень потерь. В конце концов начинает проводить весь проводник, прекращая накопление энергии во внешней и внутренней индуктивности проводника, и снижая до минимума рассеяние энергии в R_i за единицу времени.

Заметим, что концепция поверхностного эффекта не оптимальна для рассмотрения ее во временной области.

Частотная область. Обратимся снова к рис.4. Очевидно, что при низкочастотном синусоидальном токе, текущем через проводник, реактивное сопротивление L_i ничтожно мало по сравнению с активным сопротивлением R_i .

Ток протекает по всему проводнику и сопротивление минимально. Но с повышением частоты ток будет возрастать на поверхности (А), экспоненциально снижаясь к центру.

Поверхностный эффект очевиден в этом случае. При любой частоте, в соответствии с формулами (5) и (6), применимо понятие процентного соотношения площади проводника к площади эффективной проводимости и, соответственно, сопротивления DC к сопротивлению AC на данной частоте.

Хотя в большинстве импульсных источников питания форма тока резко несинусоидальна, в большинстве случаев при разработке обмоток высокочастотных трансформаторов используют синусоидальное приближение, основываясь на работе Дауэлла в 1966г. Многие авторы используют так же преобразование Фурье для распространения синусоидального метода на другие формы сигналов.

4. Эффект близости

В этом разделе рассматривается одиночный изолированный проводник. Он проводит по всему объему и имеет магнитное поле, радиально распространяющееся по всем направлениям.

Когда другой проводник размещается в непосредственной близости от первого, их поля складываются векторно. Напряженность поля вблизи поверхности проводника неоднородно, поэтому и распределение высокочастотного тока так же будет неоднородно.

Например, если цепь из двух проводов замкнута, то другой проводник переносит ток, эквивалентный первому, и поле складывается между проводами и вычитается вне их. В результате высокочастотный ток концентрируется на поверхностях проводников, где поле максимально, и уменьшается (возможно, до нуля) там, где поле слабо. Такое распределение естественно, поскольку в этом случае энергия (а, следовательно, и индуктивность) минимальна. Компенсация тем полнее, чем ближе расположены проводники (ниже индуктивность рассеяния) и, соответственно, ниже концентрация поля.

Проводники схемы. Общий случай распределения тока и поля вокруг проводника сложен для расчета. Простой и часто встречающийся на практике пример приведен на рис. 5. Показаны две параллельно расположенные тонкие полосы (такое расположение

очень хорошо для высокочастотных устройств) с минимальной индуктивностью проводников и с низкими потерями на вихревые токи. Это могут быть две широкие дорожки на разных сторонах печатной платы (не используйте соединение по кратчайшему пути. Расположение проводника с возвратным током как можно ближе к основному важно для минимизации площади витка, даже если общая длина провода возрастает).

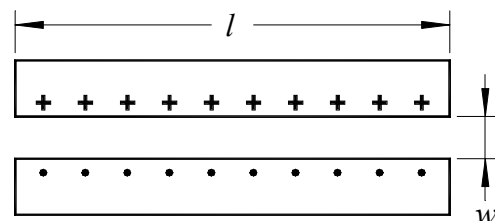


Рис.5 Соединительные проводники. Параллельное расположение полос

Значок «+» показывает направление тока *внутри* верхней полосы, а «•» — *из* нижней. Магнитное поле между полосками сильно и однородно, так как ток распределен однородно по поверхностям. Вне же полос поле чрезвычайно мало, поскольку ток почти нулевой. Эта конфигурация соответствует минимальной запасенной энергии (и минимальной индуктивности проводников). Если ширина полос l значительно больше расстояния между ними w , энергия практически полностью сконцентрирована между полосами. Если l и w принять за длину и ширину поля, то может быть рассчитана индуктивность. Преобразование формулы 4 в сантиметры и при $N = 1$ виток, индуктивность на сантиметр длины двойной полосы будет:

$$L = 12,5 w/l \quad (\text{nH/cm}) \quad (7)$$

Если полосы имеют ширину в 1 см и расстояние между ними 0,1 см, их общая индуктивность всего 1,25 nH, распределенная одинаково между полосами. Если один из проводников значительно шире другого (например, обычный проводник против земляной шины), наибольшая индуктивность рассчитывается по формуле (6) последовательно с узким проводником. Это хорошо для цепи возврата земли с точки зрения снижения шума.

Заметим, что проникновение тока наблюдается только с одной стороны — там, где существует поле. Это справедливо для толстой полосы, когда из-за скин-эффекта сечение

проводника используется не полностью. Эквивалентная схема на рис. 4 вполне применима для точки А, расположенной со стороны поля. Но точка В расположена с противоположной стороны не по центру, поскольку нет проникновения там, где нет поля.

Неудачное решение: Рисунки 6 и 7 показывают, как не надо располагать проводники (если вы не хотите получить большие индуктивности рассеяния и потери на вихревые токи). Хотя эти проводники имеют большое сечение, эффект близости приводит к очень малой используемой площади. Вспомним, что поле полностью концентрируется между двумя проводниками так, что бы минимизировать заключенную в нем энергию.

На рис. 6 этот эффект приводит к тому, что ток протекает только по узкой кромке проводников. Кроме того, поскольку поле сконцентрировано в узкой области, плотность энергии очень высока, и индуктивность проводника значительно выше, чем на рис. 5.

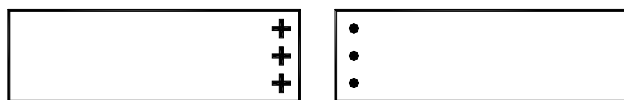


Рис.6 Неудачное решение – проводники торцами друг к другу

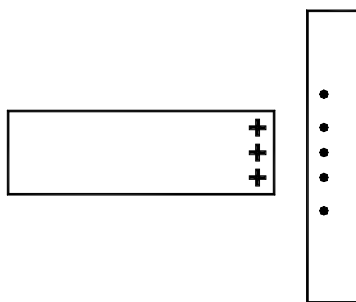


Рис.7 Не так плохо – проводники под прямым углом

Конфигурация, представленная на рис. 7, не так плоха, как предыдущий случай, поскольку ток протекает по кромке только одного из проводников, но все же значительно хуже, чем оптимальный случай на рис. 5. *Итог неутешителен:* большая площадь сечения проводника не работает на высокой частоте, если конфигурация выбрана неудачно.

Обмотка дросселя: На рис. 8 показан простой дроссель. Обмотка содержит 4 витка,

уложенные в один слой. Через обмотку протекает ток в 1 А, магнитодвижущая сила $F = N \cdot I$ по любому пути составит 4 Ампер-витка. Поле линейно в окне, поскольку поля всех витков складываются линейно. С тем же успехом обмотка может содержать 1 виток из ленты с током в 4 А.

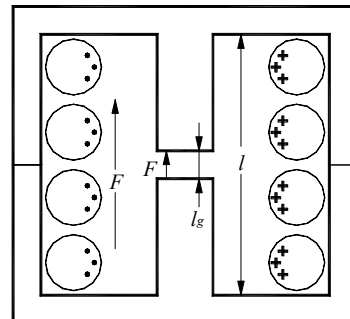


Рис.8 Обмотка дросселя

В окне ферритового сердечника поле может быть очень слабым, но, при высокой магнитной проницаемости сердечника, внешнее поле всегда замкнуто. В этом случае все магнитное поле $F = N \cdot I$ заключено в окне внутри обмотки. Напряженность поля, H , равна $N \cdot I / l$. В дросселе все магнитное поле сконцентрировано в маленьком воздушном зазоре. Напряженность поля там составляет $H_g = N \cdot I / l_g$, что значительно выше, чем энергия в очень большом окне. При высокой частоте ток концентрируется на поверхности витка, соседнего с магнитным полем. Поле вне витка отсутствует, поскольку ток течет только по поверхности проводника.

Обмотки трансформатора: Рис. 9 показывает трансформатор с 4 витками однослойной первичной обмотки и с одним витком вторичной обмотки, выполненной медной полосой. В любом трансформаторе сумма ампер-витков всех обмоток должна быть равной нулю (не учитывается ток намагничивания – им можно пренебречь). Так как вторичный ток (ток нагрузки) в 4 А приложен к одному витку, первичный ток через 4 витка должен быть равен 1 А. Поле исчезает не только вне обеих обмоток, но и в центре, между двух обмоток. Вся энергия поля замкнута в высокой проницаемости сердечника, который в трансформаторе выполнен без зазора. Соответственно поле, генерируемое током в витках, $F = 4 \text{ А}$, существует только между витками.

Частота высока, и ток концентрируется на внешней стороне внутренней обмотки и на внешней стороне внутренней обмотки – там, где поле велико.

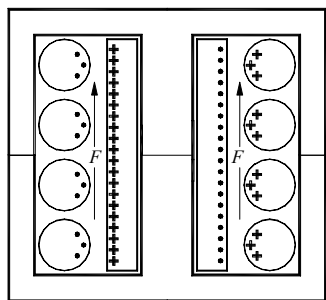


Рис.9 Обмотки трансформатора

5. Многослойные обмотки

На рис. 10 представлен трансформатор с многослойной обмоткой и две его диаграммы: магнитодвижущей силы и плотности энергии на низкой частоте. Показана только половина сердечника и обмотки. При низкой частоте ток (не показан) равномерно распределен по всем проводам, поскольку скин – эффект еще не проявляется.

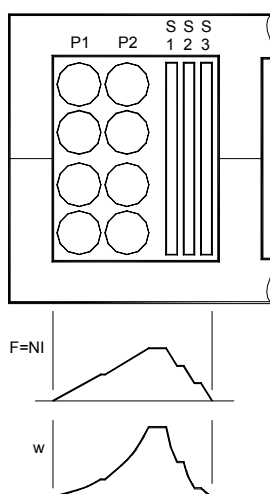


Рис.10 Многослойная обмотка

Первичная обмотка содержит 8 витков, расположенных в 2 слоя, по 4 витка в каждом, а вторичная обмотка содержит 3 витка медной фольги в 3 слоя соответственно. При токе нагрузки в 2А, на вторичной стороне имеем (3 витка · 2 А) = 6 ампер – витков. Первичная сторона с теми же 6 ампер – витками будет иметь ток 0,75А.

Как показано на диаграмме магнитодвижущей силы на рис. 10, поле отсутствует вне

первичной обмотки и внутри вторичной, но начинается на внешней стороне первичной обмотки и перемещается к центру, достигая своего максимального уровня между двумя обмотками. Заметим теперь, что при низкой частоте поле распределено равномерно внутри каждого проводника в соответствии с законом Фарадея, и сохраняется постоянным между проводниками. Плотность энергии возрастает пропорционально квадрату напряженности поля, как показано на нижней диаграмме магнитодвижущей силы. Область кривой плотности энергии соответствует общей энергии, хранимой индуктивностью рассеяния в проводниках и между ними.

Таким образом, в случае многослойной обмотки поле наращивается. Будет показано, что при высокой частоте потери на вихревые токи возрастают экспоненциально от количества слоев. Количество слоев может быть снижено при использовании сердечника с большой шириной окна, чтобы разместить витки в минимальном количестве слоев (так же это приведет к резкому снижению индуктивности рассеяния). Например, форма окна сердечника на рис. 10 далека от совершенства.

Секционированные обмотки: другой путь снижения количества слоев состоит в разбиении обмоток на небольшие секции с чередованием уровней, как показано на рис. 11.

При чередовании слоев каждая обмотка разделена на две или больше секции. Теперь первичная обмотка имеет две секции – а и б, по одному слою в 4 витка. Вторичная обмотка также разделена на две секции по 1,5 слоя, по одному витку в слое (существует проблема включения половины витка в расчет потерь на вихревые токи). Заметим теперь, что ток в 2А через 1,5 витка во вторичной обмотки секции (а) снижается до 0,75А, как и в 4 витках секции (а) первичной обмотки, и напряженность поля проходит через нуль в середине первичной обмотки линейным образом. Напряженность поля только до половины от уровня на рис. 10, и меняет свой знак между вторыми секциями обмоток. Будет показано, что снижение поля приводит к значительному снижению потерь на вихревые токи.

Поскольку напряженность поля снижается, общая энергия (кривая плотности энергии на рис.11) составляет только $\frac{1}{4}$ от общей энергии на рис.10. Таким образом, секционирование обмоток снижает индуктивность рассеяния обмоток в 4 раза!

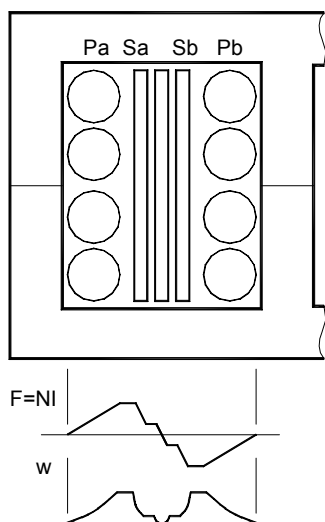


Рис.11 Секционированные обмотки

Многослойные обмотки на высокой частоте: На рис.12 продублирован рис.10 в увеличенном виде, но при высокой частоте, когда глубина проникновения составляет 20% от толщины проводника вторичной обмотки.

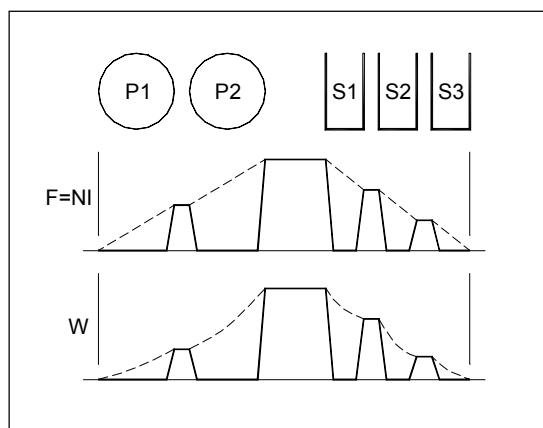


Рис.12 Многослойная обмотка на высокой частоте

В пространстве между витками напряженность поля и плотность тока такие же, как и при низкой частоте. Но внутри проводника плотность тока, магнитное поле и плотность энергии быстро снижаются от поверхности проводника (прерывистая линия показывает распределение на низкой частоте; жирная линия дает распределение на высокой частоте при условии резкого пропадания тока на глубине проникновения – можно считать, что ток пропадает скачком, и внутри проводника тока нет). Интересно, что общая энергия (в соответствии с кривой распределения плотности энергии) больше половины ее на низкой частоте. Индуктивность рассеяния понижается с повышением частоты, но только потому, что

энергия внутри проводника практически исключена. Расплата за низкую индуктивность рассеяния в этом случае – огромные потери на вихревые токи.

При глубине проникновения в 20% от толщины проводника сопротивление переменному току в 5 раз больше, чем постоянному. Но при трех слоях возрастает и поле, поэтому сопротивление переменному току возрастает в 32 раза!

Как многослойные обмотки приводят к большому потерям: Рис.13 показывает еще более увеличенные 3 слоя вторичной обмотки с рис. 12, одновременно с ее диаграммой магнитодвижущей силы. Суммарный ток в 1А протекает по 3 слоям обмотки, в каждом из которых только по одному витку.

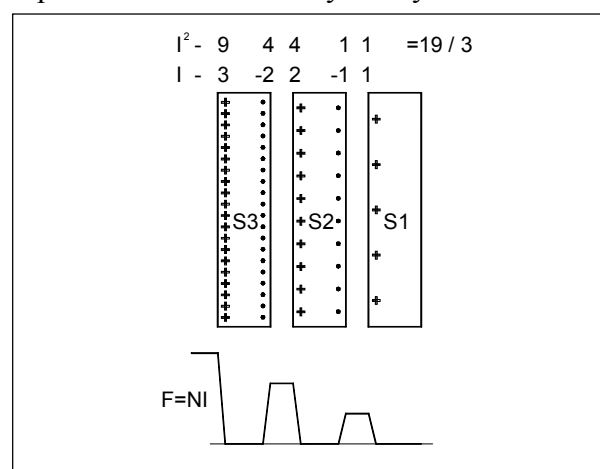


Рис.13 Поверхностные токи

В правой части слоя S1 магнитодвижущая сила равна нулю. В левой части S1 $F = 1$ Ампер-витку. 1 Ампер тока протекает по 20% глубине проникновения со стороны поля. Поле F так же не может проникнуть больше, чем на 20% в глубину S1. Этот 1 Ампер-виток поля располагается между S1 и S2. Соответственно, поле не может в S2. Оно должно кончаться на правой стороне S2, но не может пропасть само собой.

В соответствии с законом Фарадея, при магнитодвижущей силе, равной нулю, в центре S2 замкнутый ток так же должен быть равен нулю. Соблюдение этого условия требует, что бы ток в 1А на правой стороне S2 был направлен встречно нормальному течению тока в 1А на краю S1. Соответственно, поле на левой поверхности S2 достигает величины в 2 Ампер-витка и требует тока в 2А (общий ток через S2 равен тому же самому одному амперу).

Поле в 2 ампер-витка должно прекращаться на правой стороне S3 с 2 Амперами обратного тока. Соответственно, ток в 3 Ампера должен протекать по левой стороне S3 для поддержания поля в 3 Ампер-витка и сохранения общего тока в 1 Ампер по проводнику S3.

Если ток по каждому слою равен 1 Амперу при глубине проникновения в 20%, то соотношение сопротивлений переменному и постоянному току, F_R , должно быть 5:1. Но, как было показано выше, поверхностный ток в последующих слоях значительно выше. Таблица в верхней части рис.13 дает ток в проводнике и квадрат этого тока, показывающий рассеиваемую мощность в каждом слое. Второй слой S2 рассеивает в $(1+4) = 5$ раз больше, чем S1, а рассеяние в слое S3 в $(4+9) = 13$ раз больше, чем в S1!

Сопротивление трех слоев в $(9+4+4+1+1) / 3 = 19 / 3 = 6,333$ раза больше, чем слоя S1. Поскольку сопротивление S1 переменному току в 5 раз больше, чем постоянному (при 20% проникновении), соотношение сопротивлений обмотки переменному и постоянному току, F_R , составит 31,67:1, что очень плохо.

Если уменьшается толщина проводника или снижается частота преобразования, эффект нарастания поверхностных токов будет уменьшаться. Когда D_{PEN} станет значительно больше, чем толщина проводника, он пропадет полностью, F_R станет равен 1 и ток распределится равномерно по всем виткам.

Хотя в данном примере каждый слой из одного витка переносит ток в 1 Ампер, с тем же результатом каждый слой может иметь по 10 витков и переносить ток в 0,1 Ампера,

Пассивный слой: Пассивный слой – это любой слой, не совершающий работы по переносу тока. Экран Фарадея, неработающая сторона в обмотке со средней точкой – все это пассивные слои.

Рис.14 показывает экран Фарадея, добавленный в поле с 3 Ампер-витками между вторичной стороной из рисунка 13 и первичной обмоткой (слева, не видна). Если экран значительно тоньше, чем D_{PEN} , ток в 3 Ампера должен протекать по всей поверхности, поскольку поле не может проникнуть внутрь экрана. На любой его поверхности $I^2 = 9 \text{ A}^2$ и все поверхности вместе рассеивают в 18 раз больше, чем S1, или почти столько же, сколько три вторичных витка вместе. Экран Фарадея всегда располагается там, где поле максимально, поэтому его толщина должна быть меньше, чем $1/3$

D_{PEN} для сохранения потерь на допустимом уровне.

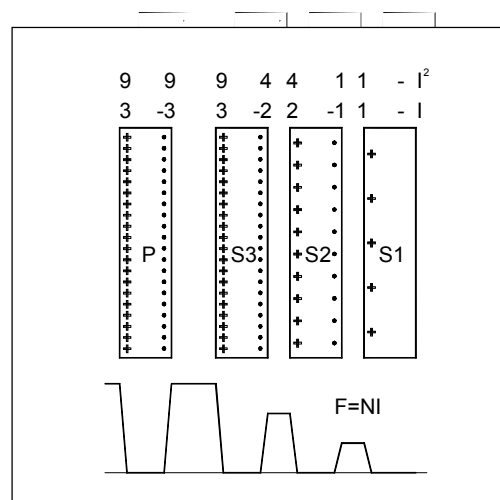


Рис.14 Потери в пассивном слое

Теперь рассмотрим вторичную обмотку со средней точкой между секциями А и В. Если секция А физически расположена между секцией В и первичной обмоткой, то при работающей секции В секция А является пассивным проводником, расположенном в сильном поле. Но, при работающей секции А, секция В расположена *вне* поля. Таким образом, добавляются пассивные потери в секции А, которые могут и превысить активные потери в секции В. Это одна из причин, почему однотактные трансформаторы по своим характеристикам сравниваются, или даже превосходят свои двухтактные полумостовые аналоги на частотах выше нескольких сотен кГц.

Параллельные обмотки. Когда сопротивление ленточной вторичной обмотки все же велико, поскольку требуется слишком толстая полоса, заманчиво разделить ее на несколько более тонких, изолированных друг от друга. К сожалению это не проходит – комбинация будет работать как эквивалентная по толщине целая полоса. Это происходит потому, что каждая из полосок располагается в своей части поля, и вихревые токи циркулируют между слоями по внешним соединениям их концов.

Параллельное соединение обмоток можно осуществлять лишь тогда, когда они располагаются в одинаковом поле, среднем по их длине:

- Можно запаараллелить витки, расположенные в одном слое – все они находятся в одинаковом поле

- Применение лицендрата – плетеного или скрученного провода – очень хороший способ (см. приложение 1)
- Части обмоток в различных секциях, если они расположены в поле примерно одной интенсивности, так же можно включать в параллель. Например, могут быть запараллелены две 4 – витковые секции на рисунке 11, поскольку поле должно оставаться равномерно распределенным между обеими секциями. Вторичная обмотка на том же рисунке тоже может быть разбита на две параллельно включенные секции.

Расчет сопротивления переменному току: Несложно рассчитать, если толщина проводника значительно превышает глубину проникновения. Совсем просто, когда толщина проводника гораздо меньше, чем D_{PEN} – тогда F_R равно 1. Но для разработки трансформатора наибольший интерес представляет случай, когда проводник имеет толщину того же порядка, что и D_{PEN} , но здесь расчет значительно труднее.

сто толщина ленты или фольги. Для круглых проводов, плотно уложенных в слое, эффективная толщина слоя составляет 0,83 от диаметра провода. Если круглые проводники свободно уложены в слое, то эффективная толщина слоя составит: $0,83 \cdot d \cdot (d/s)^{1/2}$, где d – диаметр провода и s – расстояние между центрами проводников.

Рассмотрим расчет на стр.8 для $F_R = 31,67$ и подставим в диаграмму рис. 15 $Q = 5$ и 3 слоя. Результат тот же самый.

В крайне правой части диаграммы рисунка 15, где толщина проводника значительно выше D_{PEN} , F_R очень велико. Кривые параллельны и имеют наклон +1. В крайней левой части диаграммы, где толщина проводника значительно меньше глубины проникновения, F_R близко к 1. В центре диаграммы кривые резко идут вниз, хотя Q изменяется незначительно. При F_R , близкой к 1,5, достигается неплохой компромисс. При значительно большем значении F_R потери слишком велики, а при меньшем возрастает сложность обмотки, поскольку

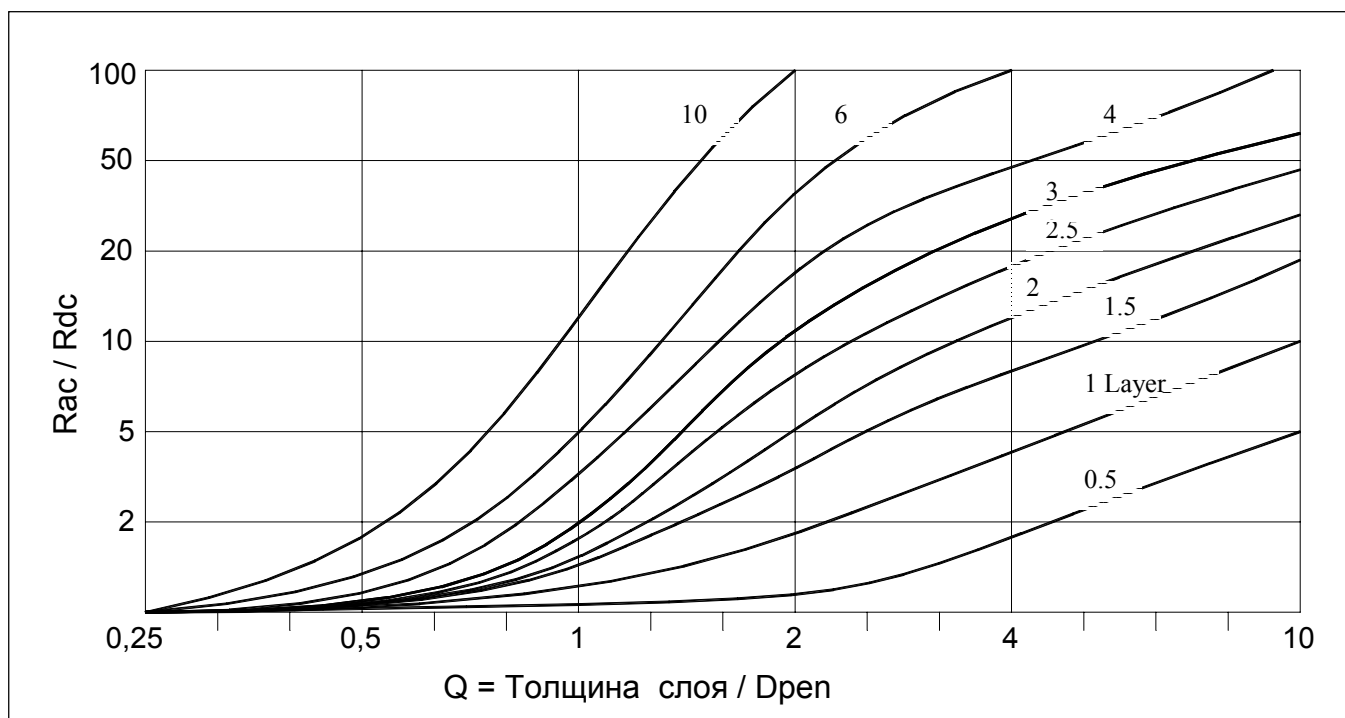


Рис.15 Диаграмма для расчета R_{ac}/R_{dc}

Дауэлл рассмотрел эту проблему для синусоидальной формы тока в 1966г., и получил кривую, приведенную на рис. 15. На вертикальной оси отложено F_R (т.е. R_{ac}/R_{dc}), а на горизонтальной оси отложено Q – отношение эффективной толщины слоя к глубине проникновения D_{PEN} . Для медной ленты или фольги эффективная толщина слоя – это про-

требуется провод слишком малого диаметра. Достижение коэффициентом F_R оптимального значения требует изменения Q в диапазоне от 1,6 при одном слое, до 0,4 при 10 слоях.

Выбор оптимальной конфигурации обмотки начнем с толстого провода и затем будем разбивать его на более тонкие, изменяя F_R от плохого к отличному. Возьмем провод с $Q = 4$

и уложим 10 витков в один слой. F_R из диаграммы будет равно 3,8 – это не очень хорошо. При 4 параллельных проводниках вдвое меньшего диаметра ($Q = 2$), аккуратно размещенных в двух слоях, всего будет 40 проводников, по 20 в слое. Используя диаграмму для двух слоев и $Q = 2$, получим $F_R = 5,2$, что еще хуже. Причина этого заключается в том, что диаметр провода все еще слишком велик по сравнению с глубиной проникновения, а наличие двух слоев приводит к генерации двойных вихревых токов на поверхности проводников.

Разобьем теперь обмотку на 16 проводников в $1/4$ начального диаметра ($Q = 1$), т. е. Теперь у нас будет всего 160 проводов в 4 слоях, по 40 в слое. F_R снизился до 2,2.

Третье разбиение на 64 проводника диаметром в $1/8$ от начального приведет к 640 проводникам – по 80 в 8 слоях. Q теперь равно 0,5 и F_R снизится до 1,5.

Несинусоидальная форма сигнала. Ван-тремен и Карстен применили решение Дауэлла для сигналов различной формы, более применимых для источников питания. Они приме-

нили распределение Фурье с последующим расчетом потерь и суммированием результатов. Так же они проверили свои выкладки на опыте, что резко увеличило ценность их работы.

Полученные ими кривые показывают, что при узком импульсе сопротивление постоянному току возрастает еще сильнее, поскольку большой вклад вносят высшие гармоники. Но возрастание потерь наблюдается не только при импульсе небольшой ширины. В ключевых источниках питания импульсный ток, как правило постоянный (при постоянной нагрузке). Потери от высших гармоник не зависят от ширины импульса, но среднеквадратичный ток, потери на постоянном токе и от низших гармоник увеличиваются при большей ширине импульса. Наибольшие потери в меди наблюдаются при коэффициенте заполнения, близком к 0,5. В этом случае оптимальным методом снижения потерь будет разработка обмоток с $F_R = 1,5$ (для синусоидального сигнала), и тогда вклад высших гармоник в общие потери составит (30 – 50)%.

Лицендрат

В трансформаторах импульсных источников питания, если диаметр провода обмотки того же порядка, или больше, чем глубина проникания на рабочей частоте, протекание переменного тока только по одной части проводника приводит к высоким потерям. Этот эффект экспоненциально нарастает с увеличением количества слоев. Для снижения потерь на переменном токе до приемлемой величины необходимо уменьшать диаметр провода.

Так же можно использовать тонкую ленту с шириной, равной ширине обмотки, особенно для низких выходных напряжений, где требуется высокий ток в обмотке, большое сечение провода и всего несколько витков. Каждый виток занимает один слой, и должен быть изолирован от другого. Ленты не могут быть соединены параллельно, если только они не располагаются в разных секциях, иначе индуцированные различные напряжения будут приводить к значительным вихревым токам, циркулирующим от одной полосы к другой и вызывающим большие потери.

Если лента или фольга не занимают всей ширины обмотки, проводник может быть разбит на несколько качественных свитых проводников, соединенных параллельно на краях обмотки. Все проводники в группе должны быть индивидуально изолированы и находиться в одинаковом поле для исключения циркуляции паразитных токов от проводника к проводнику. Если используются только несколько параллельно включенных проводников, они могут быть намотаны в ряд (т.е. одновременно, как лента). Для исключения циркуляции токов все проводники должны иметь равное количество витков в каждом слое. Однако этот способ становится неудобным, когда используется много проводов.

Другое решение состоит в скручивании или сплетении проводов таким образом, что каждый провод в группе периодически проходит через все уровни поля. Но в этом случае появляется много свободного места, в результате чего ухудшается использование окна сердечника по сравнению с предыдущим вариантом.

Лицендрат для слабых, высокочастотных схем обычно свивается из очень высококачественного провода, но в результате образуется слишком много пустот. Лицендрат для силовых применений часто делают из нескольких скрученных проводов, которые потом скручивают в большой жгут. Результат такой скрутки умеренный – диаметр жгута и длина каждого провода увеличивается незначительно.

Рассмотрим жгут из семи скрученных проводов с одним проводом в центре. Структура упаковки гексагональна, и эффективна насколько возможно, поскольку внешняя поверхность почти круговая. Внешние шесть проводов периодически проходят все внешние позиции, но центральный провод сохраняет свою позицию неизменной. Фактически, потери на переменном токе меньше при исключенном седьмом, центральном проводе (на практике он может быть заменен непроводящим наполнителем для сохранения формы жгута). Этот способ понижает коэффициент использования окна до 0,667 от монолитного провода.

Даже сплошной провод не позволяет достичь стопроцентного использования окна сердечника. Так как нижние части проводов в каждом слое ложатся диагонально на верхнюю часть проводов нижнего слоя, они не могут опуститься во впадины между проводами нижнего слоя, причем конфигурация их укладки становится вполне предсказуемой. По сравнению с укладкой квадратного провода того же диаметра, такой способ дает коэффициент заполнения окна в $(\pi/4) = 0,785$ раза меньше. В случае с шестипроводным жгутом, описанном выше, коэффициент заполнения окна понизится до $0,785 \cdot 0,667 = 0,524$.

Таблица 1 показывает коэффициент заполнения окна для жгута, содержащего от 3 до 6 жил. Несмотря на то, что коэффициенты близки по значению, будет показано, что они не так хороши в использовании, как жгуты с большим количеством жил.

Таблица 1

Количество проводов	3	4	5	6
Коэффициент использования окна	0,65	0,686	0,685	0,667

Не так редко требуются *сотни* качественных параллельно соединенных проводов для получения требуемого соотношения сопротивлений переменному и постоянному току на частоте 100кГц и выше. В этом случае желательно, чтобы жгуты были свиты в большие, а те, в свою очередь, так же свиты между собой для увеличения общего количества проводов, необходимых для переноса высокочастотного тока. Эффективный диаметр жгута равен диаметру оборота крайнего внешнего проводника. Каждый слой свивки понижает коэффициент использования окна. Как показано в таблице 2, значительно лучшее использование окна достигается, когда вместе свито большее количество проводов/жгутов, поскольку один – два слоя в свивке требуют того же самого количества проводов.

Таблица 2

Количество проводов	3		4		5		6	
	Всего проводов	Использ. окна	Всего проводов	Использ. окна	Всего проводов	Использ. окна	Всего проводов	Использ. окна
1 Уровень	3	0,65	4	0,69	5	0,69	6	0,67
2 Уровня	9	0,42	16	0,47	25	0,47	36	0,44
3 Уровня	27	0,28	64	0,32	125	0,32	216	0,30
4 Уровня	81	0,18	256	0,22	625	0,22	1296	0,20
5 Уровней	243	0,18	1024	0,15	-	-	-	-

Например, рассмотрим 4 - проводный жгут. Четыре свитых провода образуют жгут Уровня 1, четыре жгута Уровня 1, образуют жгут уровня 2, состоящий уже из 16 проводов. Точно так же, четыре жгута Уровня 2, свитые вместе, образуют жгут Уровня 3, состоящий уже из 64 проводов. Уровень повышают аналогичным образом, пока не достигнуто желаемое количество проводов.

Коэффициент использования окна в таблице 2 понижается через $(\pi/4) = 0,785$, поскольку диаметр кабеля занимает квадратные области окна.

Вместо того, чтобы вмещать все необходимые провода в один жгут, часто бывает выгодно оставить последний уровень несвитым. Это может обеспечить большую гибкость в подгонке обмотки под существующие размеры сердечника и улучшить коэффициент использования окна, как если бы у нас в жгуте было на один уровень меньше.

Для примера рассмотрим жгут из 256 проводов нужного нам диаметра. Он может содержать в себе 4 уровня свивки 4 – проводного жгута. В этом случае имеем коэффициент использования, равный 0,22 по сравнению со сплошным проводом того же диаметра, и коэффициент заполнения окна медью, равный $(0,22 \cdot 0,785) = 0,17$. Тем не менее, если мы четыре 3 – уровневых жгута с использованием 0,32 включим параллельно, получим общий коэффициент использования окна в $(0,32 \cdot 0,785) = 0,25$. Только не надо забывать, что все параллельные жгуты должны иметь одинаковое количество витков в каждом слое.

Изоляция провода понижает коэффициент использования окна, особенно для качественного провода, когда изоляция составляет ощутимую долю площади окна. Когда используется очень много витков качественного провода, окно сердечника должно быть значительно больше для сохранения общего количества меди на прежнем уровне. Когда заполнена вся площадь окна, дальнейшее улучшение может быть достигнуто переходом на большее количество витков, даже если возрастет сопротивление постоянному току, но сопротивление переменному току снизится. Другие решения состоят в следующем:

- Сделать трансформатор более горячим
- Использовать сердечник большего размера с большим окном (и требующий обычно меньшее количество витков)