

# Потери в обмотках вследствие эффекта близости

Печатается с разрешения журнала CHIP NEWS Украина (<http://chipnews.com.ua>)

**Рэй Ридли (Великобритания)**  
**Перевод Артёма Терейковского**

**Вы используете при расчётах это уравнение?**

$$P_d = b_w \sum_{i=1}^n I_i \frac{1}{b_i \delta} H_i^2 \left[ (1 + \alpha_i^2) G_1(\Delta_i) - 4\alpha_i G_2(\Delta_i) \right]$$

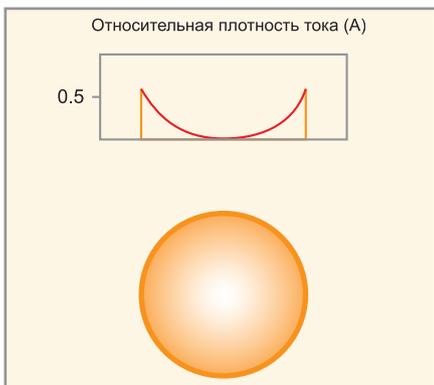
**Если нет, ваши магнитопроводы окажутся горячее, чем вы ожидали.**

Проблема, с которой я всегда сталкивался, сводилась к следующему: с чего начать? Существуют сотни методик расчётов, уравнений и рекомендаций, использование которых позволяет качественным магнитопроводам работать надлежащим образом. Если начинать с самых основ, придётся воспроизвести множество различных формул, прежде чем мы доберёмся до тех, которые будем использовать на практике.

Поэтому я решил двигаться в обратном направлении – начать с наиболее сложной проблемы, с которой неизменно сталкивается каждый инженер при разработке электромагнитных компонентов. Такой подход поможет понять уровень проблемы даже в относительно несложных разработках.

## ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ: ЧТО ЭТО?

Под действием магнитного поля, созданного вблизи проводника, на его поверхности возникают токи, генерирующие магнитное поле, противоположное первоначальному, которое «вытесняет» ток из внутренней области проводника. Скин-эффект



**Рис. 1.** Распределение тока в изолированном проводнике в свободном пространстве

является фундаментальным эффектом на высокой частоте, проявляющимся как в отдельном проводнике, так и в обмотках магнитных компонентов.

Вихревые токи составляют значительную часть полного тока, протекающего в проводнике, но вызывают перераспределение тока из глубины на поверхность и увеличивают рассеиваемую мощность.

Многие инженеры знакомы с понятием «скин-эффект», однако используют рудиментарные методики для оценки степени влияния скин-эффекта на их разработки. Скин-эффект вызывает концентрацию переменных токов вблизи поверхности проводника. Глубина скин-слоя определяется как расстояние, при прохождении которого плотность тока падает на 1/e от значения на поверхности (e – основание натурального логарифма). Из-за уменьшения зоны проникновения во времени глубина скин-слоя изменяется обратно пропорционально квадратному корню от частоты. На рис. 1 показан разрез одиночного изолированного проводника в свободном пространстве, через который протекает переменный ток.

Глубина скин-слоя легко может быть определена по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\omega$  – круговая частота,  $\sigma$  – проводимость материала (проводимость меди составляет  $5,8 \times 10^7$  при комнатной температуре).

Данное уравнение показывает, что при 60 Гц глубина скин-слоя составляет около 8,5 мм. Это означает, что

если вы не будете использовать провод диаметром более 8,5 мм, влияние скин-эффекта на рассеиваемую мощность будет незначительно. При частоте 100 кГц глубина скин-слоя уменьшается до 0,2 мм. Если толщина используемого провода не превышает это значение, расчёт покажет, что ситуация в порядке.

Так ли это на самом деле? К сожалению, нет. Если ваш электромагнитный компонент не состоит из одиночного проводника в свободном пространстве, к которому уравнение (1) применимо напрямую, реальные потери в обмотке будут значительно выше.

Такая ситуация обусловлена эффектом близости, который вызывает дополнительные потери в проводниках, находящихся в непосредственной близости от других проводников. Эти потери являются результатом вихревых токов, создаваемых в проводнике под действием токов, протекающих в близлежащих проводниках. Эффект близости имеет тенденцию становиться доминирующим в образовании потерь в проводниках магнитных компонентов на высоких частотах, особенно когда обмотки многослойные.

Потери вследствие эффекта близости всегда значительно превышают потери из-за вихревых токов, поэтому существенно влияют на перегрев и определяют методику проектирования всех высокочастотных электромагнитных компонентов. Даже если ваша обмотка состоит всего из одного витка, тот факт, что под обмоткой присутствует сердечник, влияет на распределение тока в проводнике, как показано на рис. 2.

На этом рисунке изображён поперечный разрез индуктивности, состоящей из сердечника с центральным керном и однослойной обмотки. Голубым фоном показан ток, втекающий в плоскость рисунка, а красным – вытекающий из плоскости рисунка. Интенсивность закраски со-

ответствует плотности тока в данной части проводника.

Обратите внимание, что протекающий ток сместился к внутренней стороне обмотки. Это происходит потому, что ток высокой частоты распределяется в проводнике таким образом, чтобы уменьшить наведённую индуктивность. Чем меньше площадь, охваченная током, тем меньше индуктивность.

Концентрация тока вблизи поверхности проводника вызывает увеличение его сопротивления переменному току, но определение этого сопротивления не поддаётся расчёту при помощи лишь одного уравнения. Для решения проблемы придётся прибегнуть к более сложным расчётам.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ЭФФЕКТОМ БЛИЗОСТИ

Любой электромагнитный элемент является сложным трёхмерным объектом, который с трудом поддаётся строгому аналитическому моделированию. Те из вас, у кого имеется доступ к суперкомпьютерам, могут попробовать применить программы, реализующие метод конечных элементов для моделирования всех трёхмерных полей и токов, однако такой подход описывает процессы в законченной разработке и не даёт представления о том, как эту разработку следует делать.

При проектировании электромагнитных элементов мы должны трансформировать сложную трёхмерную модель в одномерную. Для получения результатов аналитическим путем следует рассматривать каждый слой обмотки как единый проводник, размеры которого не меняются в плоскости XY. Конечно, такой подход является значительным упрощением, однако получаемые с его помощью результаты позволяют создать методику, значительно улучшающую разработку качественных электромагнитных узлов.

Теоретические вычисления потерь для скин-эффекта и эффекта близости базируются на условии, что магнитное поле параллельно оси обмотки по всей длине. Практически вблизи концов обмотки возникает дивергенция поля, влияние которой трудно оценить и ещё труднее вычислить. Магнитное поле вообще менее интенсивно на краях, что могло бы

приводить к небольшому снижению потерь в проводниках выводов. Если в качестве сердечника используется магнитопровод закрытого типа, который закрывает края обмоток (типа бронированного сердечника), то дивергенция поля свёртывается и соответствующие потери тоже.

На рис. 3 показан разрез дросселя, образованного пятью слоями обмотки вокруг центрального ядра E-образного сердечника. Электромагнитное поле будем считать практически неизменным во всех участках проводника.

На рис. 4 показан разрез одной стороны катушки, содержащей обмотку из пяти слоев. Обмотки урезаны в горизонтальной плоскости, однако подразумевается, что они не имеют краевого эффекта. Это позволяет считать поля H1 – H6 между слоями обмоток однородными на всём протяжении вдоль слоев. Слои обмоток рассматриваются как однородные медные проводники прямоугольного сечения (фольга). Слой может быть образован отдельными проводниками, которые должны быть аппроксимированы в эквивалентную фольгу. Рассмотрение этого вопроса находится за рамками данной статьи.

### УРАВНЕНИЕ ДОУЭЛЛА

Даже такая простая ситуация обрачивается трудно разрешимой проблемой. К счастью для современных инженеров, она решена, поэтому всё, что от нас потребуется, – понять и правильно применить результат.

В заголовке статьи приведено уравнение Дуэлла. В нём общая рассеиваемая мощность обмотки выражена как сумма потерь в каждом из слоев от 1 до n. Этот решающий момент аналитического подхода позволяет нам определять потери в обмотке на ненулевых частотах. Приведённое уравнение становится ещё более устранимым после расшифровки следующих членов:

$$G_1(\Delta) = \Delta \frac{\sinh 2\Delta + \sin 2\Delta}{\cosh 2\Delta - \cos 2\Delta}, \quad (2)$$

$$G_2(\Delta) = \Delta \frac{\sin \Delta \cos \Delta + \cos \Delta \sin \Delta}{\cosh 2\Delta - \cos 2\Delta}$$

Эти формулы являются комбинацией обычных тригонометрических функций и гиперболических, о которых многие из нас наверняка не вспоминали после окончания высшей школы.

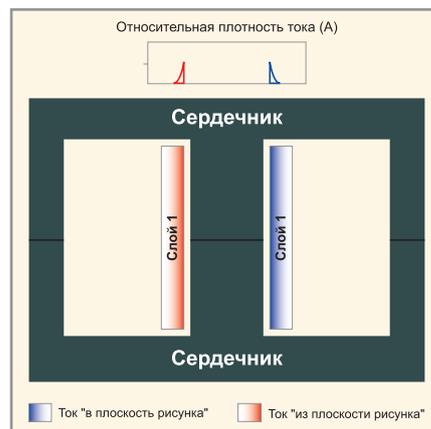


Рис. 2. Распределение тока в однослойной обмотке дросселя

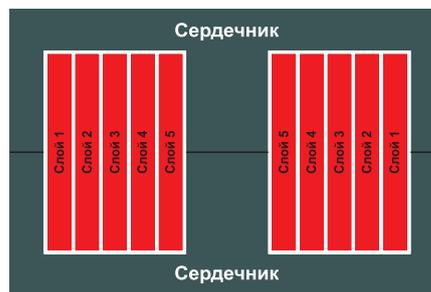


Рис. 3. Сечение дросселя с пятислойной обмоткой

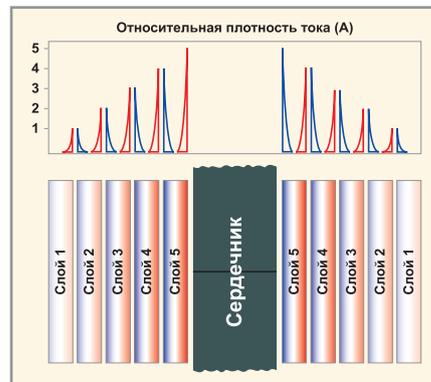


Рис. 4. Структура многослойной обмотки с изменением по оси Z

Аргумент Δ является отношением толщины слоя к глубине скин-слоя на заданной частоте.

$$\Delta_i = \frac{b_i}{\delta}, \quad (3)$$

где b<sub>i</sub> является толщиной i-го слоя, δ – глубина скин-слоя, см. уравнение (1).

На этом этапе вы можете почувствовать себя очарованными элегантностью этих математических выражений. Тем более что эта тема – не из самых лёгких для восприятия. Как многие другие инженеры, практикующие в области создания импульсных источников питания, я был не в состоянии заставить себя потратить кучу времени на осмысление и прак-

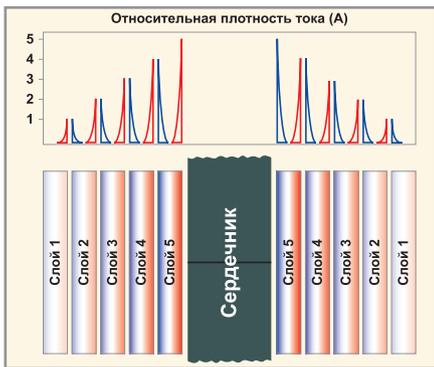


Рис. 5. Распределение тока в пятислойной обмотке дросселя

тическое применение результатов анализа, приведённых в источниках очень продвинутых авторов.

Наиболее одержимые читатели попытаются использовать это уравнение на практике. Для этого вам потребуется следующая информация.

Напряжённость поля на границе *i*-го слоя описывается как:

$$H_i = \frac{N I_i}{b_w}, \quad (4)$$

где *N* – число витков в данном слое, *I* – ток, протекающий в каждом витке. Ширина намотки обозначается как *b<sub>w</sub>*, а длина витка в слое *i* – как *l<sub>i</sub>*.

Нам понадобится ещё один элемент *a<sub>i</sub>*, обозначающий отношение полей на границе *i*-го слоя. Согласно принятому порядку расчёта, меньшее значение напряженности поля всегда подставляется в числитель. Для рассматриваемого примера с пятислойной обмоткой значения коэффициентов будут следующие:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{H_1}{H_2} = 0, \\ a_2 &= \frac{H_2}{H_3} = \frac{1}{2}, \\ a_3 &= \frac{H_3}{H_4} = \frac{2}{3}, \\ a_4 &= 0,75, \\ a_5 &= 0,8. \end{aligned}$$

Примечание: Значения этих коэффициентов являются одним из по-

казателей «эффективности» обмотки. Приближение значения к единице означает, что ток, протекающий в данном слое, оказывает минимальное влияние на поля по обеим сторонам слоя. Самые эффективные обмотки имеют соответствующие им значения *a<sub>i</sub>*, равные –1, которые могут быть достигнуты только в обмотках трансформаторов. Для этого слои обмоток должны быть расположены таким образом, чтобы ток в каждом слое изменял направление поля на противоположное.

Для выполнения вычислений по данным уравнениям формулы могут быть введены в MathCad или Excel. Сложные коэффициенты *G<sub>1</sub>* и *G<sub>2</sub>* являются константами для заданной толщины слоя и глубины скин-слоя. Расчёты могут быть упрощены, если результаты нормализуются по сопротивлению слоя обмотки постоянно-му току, равному 1 А.

### ПОТЕРИ ВСЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ ДЛЯ 5-СЛОЙНОЙ ОБМОТКИ ДРОССЕЛЯ

После ввода уравнений в выбранную программу нашими исходными данными становятся рабочая частота, толщина слоёв обмоток и количество слоёв. Полученные результаты выражаются в отношении сопротивления слоя обмотки переменному току к сопротивлению постоянному току *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>*, как показано в таблице.

Если ранее вы не сталкивались с эффектом близости, результаты вас неприятно удивят. В первой строке данные для слоя из фольги толщиной 0,3 мм, что соответствует намотке слоя проводом диаметром около 0,254 мм, при частоте 100 кГц. Отношение толщины слоя к глубине скин-слоя составляет 1,46 – вполне допустимое значение согласно правилам определения скин-эффекта.

Отношение *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>* на частоте 100 кГц для разной толщины слоёв 5-слойной обмотки дросселя

Толщина слоя, мм	Номер слоя (1= наружный)					Среднее <i>R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub></i>
	1	2	3	4	5	
0,3 (Δ = 1,46)	1,35	3,91	9,04	16,74	27,01	11,6
0,6 (Δ = 2,80)	2,81	14,87	39,00	75,19	123,45	51,1
0,9 (Δ = 4,33)	4,33	22,85	58,10	111,86	183,55	76,0
1,1 (Δ = 5,38)	5,38	26,95	70,09	134,80	221,08	91,7
0,3 (2 слоя)	1,35	3,91	–	–	–	2,6

Обратите внимание, как быстро возрастает значение *R<sub>ac</sub>* у каждого последующего слоя. Слой, находящийся в середине, имеет отношение *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>*, равное 27, а среднее значение для 5 слоёв составляет 11,6!

Обычно если потери в проводнике слишком велики, для их уменьшения просто увеличивают диаметр провода. В данном случае при удвоении толщины слоя (провод 0,511 мм) средний рост отношения *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>* составит 51, а его значение для внутреннего слоя, отвод тепла от которого представляется наиболее проблематичным, достигает 123. Дальнейшее увеличение толщины слоя до 1,1 мм приводит к почти удвоению значения *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>*.

Перераспределение токов в слоях в данном случае имеет более сложный вид, чем при однослойной обмотке. На рис. 5 показано распределение плотностей и направлений токов в рассматриваемом примере. Полный ток в наружном слое распределяется по внутренней поверхности проводника, при этом его значение составляет 1 А.

Во втором слое присутствуют уже две составляющие: на наружной поверхности слоя присутствует вихревой ток, создаваемый током, протекающим в первом слое. Направление вихревого тока противоположно направлению основного тока. Вторая составляющая протекает по внутренней стороне слоя и вдвое превышает значение тока на внешней стороне. Полный ток во втором слое равен полному току в первом слое, поскольку рассматриваемые слои входят в одну и ту же обмотку.

Ток в третьем слое также складывается из двух составляющих: на внешней стороне слоя присутствует вихревой ток со значением 2 А с направлением, противоположном полному току, а по внутренней стороне протекает составляющая 3 А. Аналогичным образом определяются значения для всех последующих слоёв.

Наиболее радикальным способом снижения потерь вследствие эффекта близости является уменьшение числа слоёв. В последней строке таблицы приведены значения *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>* для двухслойной обмотки. Среднее значение *R<sub>ac</sub>/R<sub>dc</sub>* для двух слоёв составляет всего 2,6 против 27 раз для пяти слоёв. В данном случае предпоч-

тительнее использовать более тонкий провод, который уместится в два слоя, вместо толстого провода, который потребует для своего размещения пять слоёв.

### ВЫБОР ПРАВИЛЬНОГО ДИАМЕТРА ПРОВОДА

Оптимальный диаметр провода – компромисс, балансирующий между потерями от скин-эффекта во внешних слоях и потерь от вихревых токов во внутренних слоях.

Прежде чем рассмотреть выбор оптимального диаметра провода для заданного применения, проанализируем форму тока в обмотке. Через обмотку дросселя DC/DC-преобразователя будет протекать значительная постоянная составляющая, как показано на рис. 6. Несмотря на значительный размах пульсаций, величина постоянной составляющей тока равна 6,26 А, при этом действующее значение переменного тока составит всего 0,81 А. В большинстве случаев при анализе потерь от эффекта близости достаточно рассматривать ток в обмотке как сумму постоянной и переменной составляющих. Переменная составляющая определяется как сумма всех гармоник тока с ненулевой частотой. Потери по постоянному току определяются как резистивные потери в меди. Для определения потерь по переменному току в данном случае в расчёт принимается только частота переключения. При проектировании дросселей потери по переменному току могут быть достаточно высокими, однако их часть в совокупных потерях окажется незначительной из-за высоких потерь по постоянному току. Это позволяет эффективно разрабатывать дроссели с многослойными обмотками, несмотря на значительные потери от эффекта близости.

В общем случае процедура определения потерь в обмотках при несинусоидальном токе состоит из определения гармонического состава тока и сопротивления обмотки на переменном токе на каждой гармонике. Полные потери есть сумма произведений  $I^2R$  на каждой частоте (включая нулевую частоту). Тогда эффективное сопротивление находится как отношение мощности полных потерь к квадрату действующего значения тока.

Если преобразователь работает при скважности импульса, близкой к двум, достаточно рассмотреть только основную частоту переключения. Иная форма сигнала потребует проведения более тщательных расчётов. Для обеспечения достаточной точности следует учитывать совокупность потерь, вносимых всеми гармоническими составляющими.

На высоких частотах и (или) уровнях мощности потери в обмотке оптимальной толщины могут оставаться ещё очень высокими. Существует ряд методов проектирования различной эффективности, позволяющих дополнительно снизить высокочастотные потери в проводниках.

### ПОТЕРИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА ВСЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ

Как правило, переменная составляющая в обмотках трансформаторов соизмерима или значительно превышает постоянную составляющую тока (рис. 7). По этой причине следует избегать использования многослойных обмоток в трансформаторах.

К счастью, при проектировании трансформаторов возможен более гибкий подход, чем при проектировании дросселей. В обмотке дросселя весь ток течёт в одном направлении, поэтому мы можем варьировать только число слоёв и толщину провода.

В трансформаторах токи в первичной и вторичной обмотках текут в разных направлениях. Если расположить одиночный слой первичной обмотки поверх одиночного слоя вторичной, токи в них будут течь так, как показано на рис. 8. Токи высокой частоты распределяются по поверхности проводника, стремясь компенсировать магнитное поле, наведённое соседней обмоткой. Определение потерь вследствие эффекта близости при однослойных первичной и вторичной обмотках

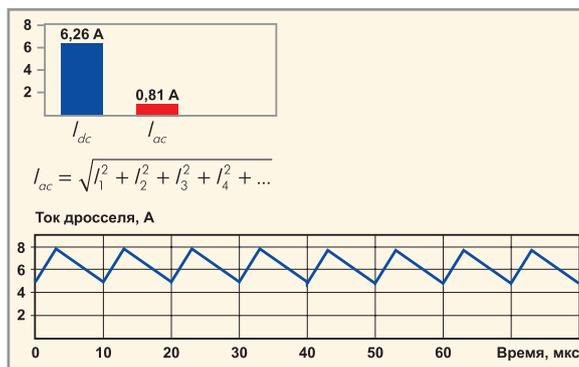


Рис. 6. Форма и компоненты тока в обмотке дросселя

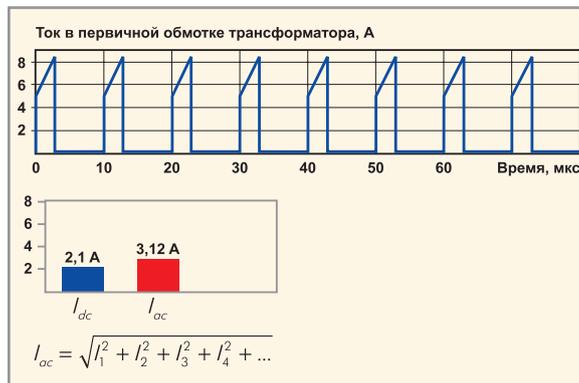


Рис. 7. Форма и компоненты тока в обмотке трансформатора

совпадают с аналогичным расчётом для дросселя.

Если число слоёв должно быть больше одного, всегда следует стремиться к его уменьшению во избежание повышенных потерь. На рис. 9 показано распределение токов в пятислойной первичной обмотке. Оно полностью совпадает с распределением токов в пятислойной обмотке дросселя, за исключением того, что в присутствующей вторичной обмотке ток течёт в противоположном направлении. Так как вторичная обмотка расположена в одном слое, для неё не имеет значения, как выполнена

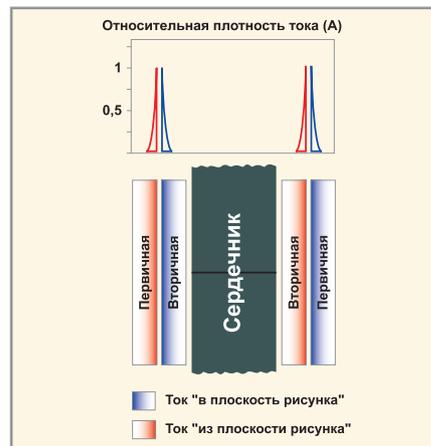
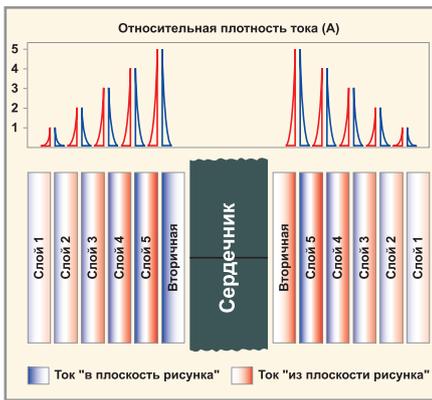
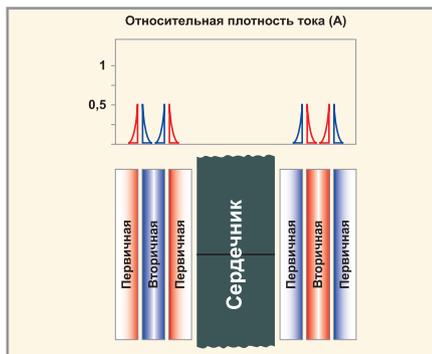


Рис. 8. Распределение токов в однослойных первичной и вторичной обмотках трансформаторов



**Рис. 9. Распределение токов в пятислойной первичной и однослойной вторичной обмотках трансформатора**



**Рис. 10. Распределение токов в трансформаторе с однослойной вторичной и разделённой первичной обмоткой**

первичная обмотка (один или пять слоёв).

Из этого частного случая расположения обмоток следует интересное наблюдение. При низких частотах токи в слоях распределяются равномерно. Измеренная при этом индуктивность рассеяния между первичной и вторичной обмотками достаточно велика.

На высоких частотах поля всех слоёв первичной обмотки компенсируются наведёнными вихревыми токами, которые достигают значения 5 А на внутреннем слое, непосредственно прилегающем ко вторичной обмотке. Разделение первичной и вторичной обмоток теперь невелико, измеренная индуктивность рассеяния окажется сравнительно небольшой. Зависимость индуктивности рассеяния от частоты является очень важной характеристикой при проектировании высокочастотных магнитных компонентов.

Если вы наблюдаете заметное изменение величины индуктивности рассеяния по мере увеличения частоты измерения до значения рабочей частоты преобразователя, то

это говорит о том, что вы получите значительные потери в трансформаторе вследствие эффекта близости.

### ЧЕРЕДОВАНИЕ СЛОЁВ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

В недорогих изделиях мы вынуждены выполнять намотку первичной и вторичной обмоток отдельно из-за требований к изоляции и нехватки места для изоляции каждого слоя. Однако в идеальном трансформаторе слои первичной и вторичной обмоток должны чередоваться для уменьшения напряжённости полей и минимизации потерь вследствие эффекта близости.

На рис. 10 показано, как разделить первичной обмотки на две части, наматываемые до и после слоя вторичной обмотки, способствует уменьшению потерь в трансформаторе.

Через каждый из слоёв первичной обмотки теперь протекает только половина полного тока, а потери вследствие эффекта близости такие же, как у однослойной обмотки. Такое решение позволяет в несколько раз уменьшить потери по сравнению с вариантом смежного расположения слоёв первичной обмотки.

Хотя конструкция вторичной обмотки остаётся неизменной в рамках рассматриваемых примеров, при разделении первичной обмотки потери во вторичной также уменьшатся, так как ток будет распределяться равномерно по внутренней и наружной поверхности, чем достигается значительно лучшее использование объёма проводника.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе любых работ, посвящённых определению потерь вследствие эффекта близости, неизменно очевидным становится одно простое правило: располагайте проводники на удалении от сильных высокочастотных магнитных полей. Достичь этого можно несколькими способами. Наиболее простой из них – минимизировать количество слоёв. Это чрезвычайно важно для дросселей со значительной переменной составляющей тока в обмотке. Если конструкция дросселя не позволяет ограничиться одним слоем из-за требуемого числа вит-

ков, следует оптимизировать толщину провода для достижения оптимального соотношения сопротивления по переменному току к активному сопротивлению обмотки при заданной форме сигнала. Точных формул для расчёта сопротивления по переменному току не существует ввиду большого разнообразия форм сигнала. Мы рекомендуем использовать основное уравнение определения потерь вследствие эффекта близости для нахождения оптимального баланса для вашей конструкции.

Для трансформаторов рекомендуется аналогичный подход: стараться ограничиваться однослойными обмотками, а при невозможности этого следует перемежать слои первичной обмотки слоями вторичных обмоток. На практике это не всегда достижимо при использовании традиционных методов межслойной изоляции из-за нехватки объёма или дороговизны изоляционного материала.

Планарные трансформаторы на основе сердечников типа ELP наилучшим образом приспособлены для организации чередования слоёв обмоток. В каждом слое печатной платы может быть расположено ограниченное количество витков, поэтому силовые обмотки трансформаторов преобразователей напряжения располагают, как правило, в нескольких слоях печатной платы. Это позволяет эффективно чередовать слои обмоток, располагая их в соседних слоях печатной платы. Будучи наиболее эффективными, планарные трансформаторы остаются достаточно дорогими из-за необходимости использования многослойных печатных плат. Хотя цены на планарные магнитопроводы значительно снизились, большинство производителей импульсных источников питания не могут использовать печатные платы с числом слоёв более двух, поэтому традиционные магнитопроводы по-прежнему остаются экономически наиболее эффективными.

Существует множество других аспектов, связанных с эффектом близости, таких как краевой эффект, искривление поля в зазоре магнитопровода, различные формы сечения проводников, которые ещё более усложняют разработку.



## Снижение габаритов и потерь энергии



Высокоэффективные магнитодиэлектрические сердечники Micrometals для силовой электроники и ВЧ-техники

### Применение сердечников MICROMETALS позволяет:

- Снизить стоимость индуктивных компонентов в 3...5 раз
- Снизить потери на 30...50% по сравнению с ферритами
- Оптимально распределить потери между сердечником и обмоткой
- Повысить надёжность аппаратуры
- Оптимизировать конструкцию и уменьшить габариты индуктивных компонентов

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДОСТОИНСТВА

- Большая номенклатура типоразмеров – от 3,4 мм до 165 мм
- Токоизолирующее полимерное покрытие до 3 слоёв
- Торoidalные, Ш- и U-образные, трубчатые, низкопрофильные сердечники, стержни, шайбы, бусины и др.
- Силовые магнитопроводы до 5 МГц
- ВЧ-сердечники для частот от 0,01 до 500 МГц
- Рабочая температура до 2000°C
- Высокая стабильность параметров

### СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ

состоят из 4 модулей для расчёта индуктивностей:

- Фильтров постоянного тока, включая дифференциальные фильтры
- Индукторов с фиксированной зависимостью изменения индуктивности от величины тока намагничивания
- Катушек с управляемой индуктивностью 10 : 1 или 20 : 1 с использованием композиционных сердечников из феррита и магнитодиэлектрика
- Катушек индуктивности для АККМ, повышающих и понижающих DC/DC - преобразователей



### CERTIFICATE OF REGISTRATION PRINCIPAL REGISTER

*The Mark shown in this certificate has been registered in the United States Patent and Trademark Office to the named registrant.*

*The records of the United States Patent and Trademark Office show that an application for registration of the Mark shown in this Certificate was filed in the Office; that the application was examined and determined to be in compliance with the requirements of the law and with the regulations prescribed by the Director of the United States Patent and Trademark Office; and that the Applicant is entitled to registration of the Mark under the Trademark Act of 1946, as Amended.*

*A copy of the Mark and pertinent data from the application are part of this certificate.*

*This registration shall remain in force for TEN (10) years, unless terminated earlier as provided by law, and subject to compliance with the provisions of Section 8 of the Trademark Act of 1946, as Amended.*



Director of the United States Patent and Trademark Office

Micrometals наносит на свои изделия запатентованную цветовую маркировку в качестве защиты от подделок. Оригинальная продукция Micrometals в компании ПРОСОФТ