

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Точное определение значения сопротивления обмоток переменному току является весьма актуальной задачей при проектировании электромагнитных компонентов высокочастотных преобразователей напряжения (ВПН).

Все предшествующие работы отечественных и зарубежных ученых подтверждают тот факт, что сопротивление обмоток переменному току может быть значительно выше, чем сопротивление постоянному току, и что эффективное сопротивление обмоток при несинусоидальной форме тока также существенно превышает аналогичное при синусоидальной форме тока. Существует, по крайней мере, пять причин возникновения дополнительных потерь в обмотках высокочастотных электромагнитных компонентов ВПН.

### Происхождение скин-эффекта, эффекта близости и родственных эффектов

Скин-эффект, являющийся частным случаем эффекта близости, базируется на генерации токов в проводниках под действием переменного магнитного поля.

Под действием магнитного поля, созданного вблизи проводника, на его поверхности возникают токи, генерирующие магнитное поле противоположное первоначальному, которое “вытесняет” ток из внутренней области проводника. Если проводник не имеет сопротивления (например, сверхпроводник), токи протекающие по поверхности не вызывают нагрева, и следовательно магнитное поле исключено из проводника.

При температурах выше нескольких десятков градусов по Кельвину все проводники имеют конечное сопротивление, но при этом и поверхностные токи имеют тенденцию к затуханию. Это позволяет магнитному полю проникать через поверхность проводника, вызывая протекание тока не только по поверхности. Так как магнитное поле проникает внутрь, то большая зона проводимости становится доступной наведенным токам. Потери снижаются, и степень проникновения прогрессивно затухает. В конечном счете, наведенные токи будут рассеяны в виде тепла, и магнитное поле будет простирается по всему проводнику.

Скин-эффект — это “эффект близости” магнитного поля, вызванного током протекающим непосредственно в проводнике. В этом случае, вновь сгенерированный ток, следует за магнитным полем в проводнике, и, в конечном счете, распространяется по всему проводнику.

Переменный ток достаточно высокой частоты вызывает изменение направления тока, прежде чем полностью распространится в проводнике. Протекающий ток сохраняет концентрацию вблизи поверхности, по отношению к токам ниже поверхности, его задержка прогрессивно нарастает, а значение уменьшается, учитывая поверхностный ток.

Амплитуда синусоидального тока в толстом проводнике уменьшается экспоненциально от поверхности с фазовой задержкой в один радиан на “глубину скин-слоя”. Глубина скин-слоя определяется, как расстояние ниже поверхности, где плотность тока падает на  $1/e$  от значения на поверхности ( $e$ -основание натурального логарифма). Из-за уменьшения зоны проникновения от времени, глубина скин-слоя изменяется обратнопропорционально квадратному корню от частоты.

Основной ток (среднее значение) в проводнике запаздывает от поверхностного тока, создавая феномен фазового опережения на 45 градусов. Интересно также обратить внимание на то, что на некоторой глубине в толстом проводнике ток протекает в направлении противоположном основному току.

Потери от эффекта близости и скин-эффекта всегда суммируются с потерями в проводнике. В обмотках магнитных компонентов, проводящих высокочастотные токи, потери в проводнике начинают заметно увеличиваться, когда толщина проводника обмотки становится соизмерима с глубиной скин-слоя высокочастотного тока.

Глубина скин-слоя в меди при температуре 100°C на частоте 20 кГц составляет 0,5 мм, уменьшаясь до 0,07 мм на 1 МГц.

### **Источники высокочастотных потерь**

1. *Скин-эффект* вызывает концентрацию переменных токов вблизи поверхности проводника. Он является фундаментальным эффектом на высокой частоте, проявляющимся как в отдельном проводнике, так и в обмотках магнитных компонентов.

2. *Эффект близости* вызывает дополнительные потери в проводниках находящихся в непосредственной близости от других проводников, проводящих ток. Эти потери являются результатом вихревых токов, создаваемых в проводнике под действием токов протекающих в близлежащих проводниках. Эффект близости имеет тенденцию становится доминирующим в образовании потерь в проводниках магнитных компонентов на высоких частотах, особенно когда обмотки многослойные.

3. *Концевой эффект* возникает из-за неравномерности магнитного поля на концах обмоток трансформаторов и дросселей. Он вызывает увеличение потерь в зависимости от размеров обмотки, расположения и геометрии сердечника магнитопровода вблизи от концов обмотки.

4. *Эффект зазора* в сердечнике магнитопровода. Присутствие дискретных воздушных зазоров в сердечнике создает магнитные поля не параллельные оси обмотки, которые пересекая обмотки наводят дополнительные вихревые токи, вызывающие потери. Этот эффект часто является главенствующим в трансформаторах и дросселях с большим уровнем пульсаций тока, где есть зазор в сердечнике магнитопровода.

5. *Эффект внешнего проводника*. Любой проводник, расположенный в области воздействия силового поля трансформатора или дросселя, работающего с высокочастотными токами, будет причиной потерь, вызванных вихревыми токами. Обычно этот эффект проявляется в чрезмерно толстых электростатических экранах, в выводах обмоток расположенных вблизи или проходящих через область сильных полей, в металлических креплениях и обоймах вблизи обмоток или около зазора в сердечнике.

### **Вычисление высокочастотных потерь в проводниках**

Скин-эффект и эффект близости, вызывающие потери в проводниках трансформаторов и дросселей на высоких частотах, являются наиболее поддающимися теоретическому вычислению.

Известен ряд работ, посвященных этой теме. Статья Доуэлла, рассматривающая потери при синусоидальной форме тока, — лучшая фундаментальная работа и используется как основа при рассмотрении других форм тока.

Для упрощения расчета потерь, заменим круглый проводник на квадратный эквивалентного сечения и используем коэффициент  $\eta$ , отражающий какую часть ширины обмотки занимают квадратные проводники. Например для проводника из фольги  $\eta = 1$ .

Фактическая применимость результатов к обмоткам из фольги зависит от равномерности тока по всей ширине фольги. Использование комбинирования при укладке: вначале фольговая обмотка, затем обмотка из провода, имеет тенденцию принудительно выравнивать ток в фольге, особенно, если витки из фольги чередуются проводами. Есть основание полагать, что использование фольги в обеих обмотках будет выравнивать ток, но это требует проверки.

При исключении магнитного поля из проводника на высокой частоте происходит снижение индуктивности рассеяния между обмотками трансформатора. Основное количество энергии индуктивности рассеяния обычно накапливается в магнитном поле между обмотками. В большинстве импульсных трансформаторов индуктивность рассеяния меньше 5-20%.

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.

Эти вычисления имеют тенденцию расходиться при увеличении числа учитываемых гармоник. Расчет сопротивлений на каждой частоте включает в себя несколько тригонометрических и гиперболических функций. Поэтому лучше эти расчеты проводить с привлечением соответствующих средств вычислительной техники.

Обозначим:

$h$  – высота проводника

$\delta$  — глубина скин-слоя

$m$  – число слоев в обмотке

$K_r$  – коэффициент изменения сопротивления на переменном токе (далее коэффициент сопротивления)

$t_r, t_f$  – время фронта (нарастания и спада)

$T$  – период

$D$  – коэффициент заполнения (отношение времени импульса к периоду).

В уравнениях для расчета потерь будем использовать фактическую высоту проводника, приведенную к глубине скин-слоя на низшей частоте. Это эффективно измеряет высоту проводника в единицах глубины скин-слоя на основной частоте. Отношение высоты проводника к глубине скин-слоя возрастает с увеличением частоты.

Коэффициент сопротивления  $K_r$  является отношением сопротивления на переменном токе (для любой формы тока) к сопротивлению на постоянном токе. Его использование позволит учесть влияние различных высот проводника (при разных гармонических частотах) на полные потери, и тем самым повысить точность расчетов.

Значение  $K_r$  может быть рассчитано (или определено по заранее составленным номограммам) для различных комбинаций из формы тока, высоты проводника, и числа слоев. Вычисление эффективного сопротивления, таким образом, можно свести к определению сопротивления обмотки на постоянном токе,

умножению этого сопротивления на отношение высоты проводника к глубине скин-слоя и на соответствующий коэффициент  $K_r$  для данной высоты проводника при выбранной форме тока. Полные потери в обмотке будут определяться произведением квадрата действующего тока на эффективное сопротивление.

### Анализ форм тока

В трансформаторах и дросселях преобразователей работающих на высоких частотах используются следующие формы тока:

1) *Однополярный прямоугольный импульс*: используется в различных одноктных преобразователях.

Анализ форм тока проведен при следующих условиях:

Коэффициент заполнения  $D$  изменялся от 0,1 до 0,8;

Время фронта  $t_r$ ,  $t_f$  изменялось от 0,1% до 5% периода;

Число слоев обмотки изменялось от 1 до 10;

Высота проводника изменялась от 2 до 0,05 глубины скин-слоя

2) *Разнополярная прямоугольная форма*, обычно используется в мостовых и полумостовых преобразователях. Эта форма анализировалась для случая  $D=1$ , при условиях, приведенных выше.

3) *Симметричная треугольная форма* тока, используется в большинстве дросселей фильтров в сумме с постоянной составляющей тока. Постоянная составляющая тока не связана с высокочастотными переменными составляющими, поэтому потери от постоянного и переменного токов необходимо считать отдельно и затем суммировать. Коэффициент сопротивления рассчитывался для обмоток с числом слоев до 10, но только для симметричной ( $D=0,5$ ) формы тока. Треугольная форма тока с  $0,3 \leq D \leq 0,8$  и более, имеет почти то же самое содержание гармоник, отличаясь только фазовым сдвигом гармоник, поэтому можно использовать результаты полученные выше.

4) *Однополярный синусоидальный импульс*, используется в квазирезонансных преобразователях с переключением при нуле тока силового транзистора.

5) *Однополярный треугольный импульс*, используется в преобразователях с переключением при нуле напряжения. Рассматривался для коэффициента заполнения  $0,2 \leq D \leq 0,7$ .

Одноктные преобразователи, как прямоходового так и обратногоходового типов, имеют ряд преимуществ при работе на высокой частоте, поэтому им было уделено основное внимание.

### Результаты расчета потерь

Проведенные аналитические исследования позволяют привести основные результаты расчета потерь в следующем виде.

Для однослойной обмотки эквивалентная высота круглого проводника:

$$h = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{0,75} \cdot d \left(\frac{d}{S}\right) = 0,834 \sqrt{\frac{d}{S}}.$$

где:  $d$  — диаметр круглого провода (включая изоляцию)

$S$  — расстояние между центрами двух соседних проводов.

Глубина скин-слоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}.$$

где:  $\rho$  — удельное сопротивление меди

$\omega$  — круговая частота

$\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума

Высота проводника, приведенная к глубине скин-слоя:

$$X = h/\delta.$$

Базовые уравнения, позволяющие рассчитать отношение сопротивления при синусоидальном переменном токе к сопротивлению при постоянном токе, с учетом высоты проводника и числа слоев обмотки:

$$F_r = R_{ac} / R_{dc} \quad (1)$$

$$F_r = M' + \left( \frac{m^2 - 1}{3} \right) D' \quad (2)$$

$$M' = X \left[ \frac{e^{2X} - e^{-2X} + 2 \sin 2X}{e^X + e^{-X} - 2 \cos X} \right] \quad (3)$$

$$D' = 2X \left[ \frac{e^X - e^{-X} - 2 \sin X}{e^X + e^{-X} + 2 \cos X} \right] \quad (4)$$

Подставив (3), (4) в (2), получим отношение сопротивления на данной частоте к сопротивлению постоянному току.

При несинусоидальной форме тока полные потери

$$P_{II} = I_0^2 R_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \dots + I_n^2 R_n, \quad (5)$$

где:  $I_n$  — амплитуда тока на частоте гармоники  $n$  ( $n=0$  на постоянном токе);

$R_n$  — сопротивление на частоте гармоники  $n$ ;

и  $R_n = F_{r_n} R_0$

$F_{r_n}$  — коэффициент сопротивлений на частоте гармоники  $n$

Тогда:

$$P_{II} = I_0^2 R_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \dots + I_n^2 R_n \quad (6)$$

Эффективное сопротивление обмотки можно определить как:

$$R_{ac} = P_{II} / I_D^2 \quad (7)$$

где:  $I_D$  — полный действующий ток в обмотке

$$I_D^2 = I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 \quad (8)$$

Отсюда:

$$R_{ac} = \frac{R(I_0^2 + I_1^2 Fr_1 + I_2^2 Fr_2 + \dots + I_n^2 Fr_n)}{I_D^2} \quad (9)$$

Здесь мы получили отношение эффективного сопротивления обмотки (для несинусоидального тока) к сопротивлению на постоянном токе, которое монотонно возрастает с увеличением толщины проводника. При этом, сопротивление постоянному току снижается. Поэтому влияние изменения толщины проводника на потери неоднозначно.

Коэффициент сопротивления  $K_r = Fr/X$ .

Тогда:

$$K_r = \frac{R_{ac}}{X R_0} = \frac{P_{II}}{X R_0 I_D^2} = \frac{R_0 (I_0^2 + \dots + I_n^2 Fr_n)}{X R_0 I_D^2},$$

$$K_r = \frac{I_0^2 + \dots + I_n^2 Fr_n}{X I_D^2}. \quad (10)$$

### Гармонический анализ форм тока

Типовая форма однополярного импульсного тока, которую можно увидеть в одноктактных преобразователях напряжения, представлена на рис. 1а.

При разложении данной функции в ряд Фурье возможны два варианта аппроксимации: трапецеидальная форма с  $t_r = t_f$  (рис. 1б) или идеальный усеченный импульс с нулевыми фронтами  $t_r = t_f = 0$  (рис. 1в)

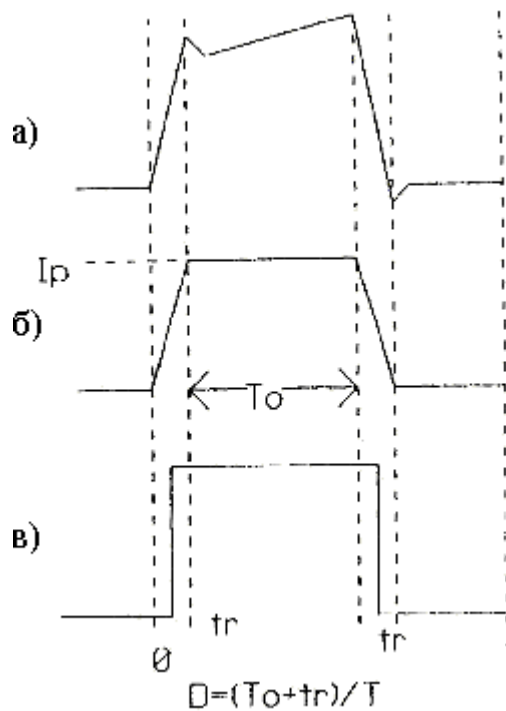


Рис. 1. Типовая форма тока в трансформаторах одноктактных преобразователей с эквивалентными аппроксимациями.

Разложение в ряд Фурье для аппроксимаций:

трапецеидальная форма

$$i(t) = I_p D + \frac{2I_p}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\pi t_r / T)}{n\pi t_r T} \right] \left[ \frac{\sin(n\pi D)}{n} \right] \cos(n\omega t);$$

идеальный усеченный импульс

$$i(t) = I_p D + \frac{2I_p}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\pi D)}{n} \right] \cos(n\omega t),$$

где  $D$ ,  $t_r$  и  $T$  определяются из рис. 1.

При этом для обеспечения достаточной точности число членов гармоник нужно выбирать в зависимости от  $t_r$ .

$$n = (T/2t_r) - 1 \quad (11)$$

График соотношения (11) показан на рис. 2.

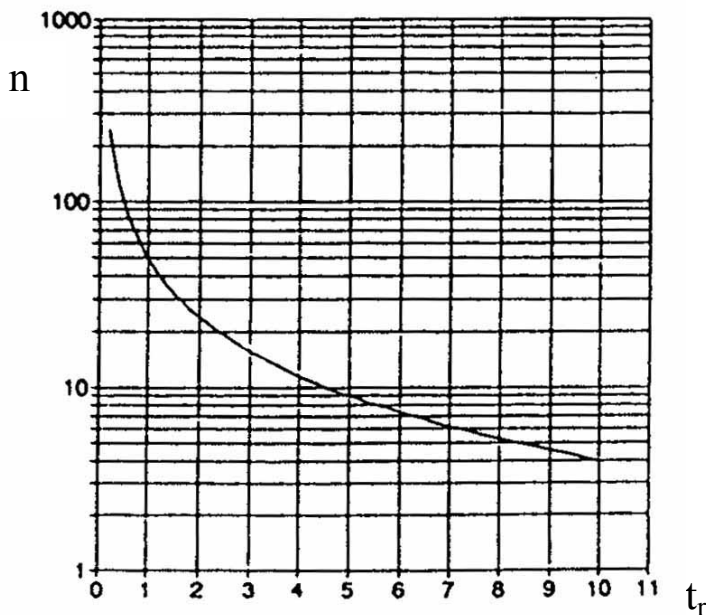


Рис.2. Зависимость  $n$  от  $t_r$ .

Зависимость потерь в трансформаторах на высоких частотах может быть определена аналогичным образом и ее основной характер показан на рис. 3. Коэффициент сопротивления изображен в зависимости от высоты проводника для коэффициента заполнения 0,5 в обмотке из 8 слоев, при различных временах фронтов.

При увеличении высоты (толщины) проводника, коэффициент сопротивления первоначально снижается, а затем увеличивается, достигая минимального значения при некоторой “оптимальной” толщине проводника. При уменьшении времени фронта, амплитуды высокочастотных гармоник и их число возрастают, потери устойчиво растут.

На рис. 4 приведены аналогичные рис. 3 зависимости для обмоток с числом слоев от 1 до 10 при времени фронта 0,5%.

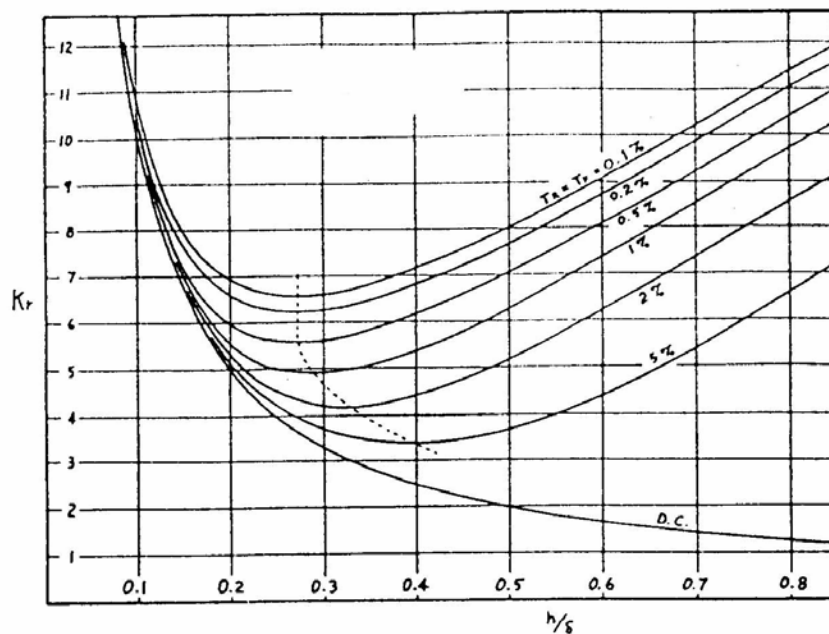


Рис. 3. Зависимости  $K_r$  от высоты проводника и времени фронта

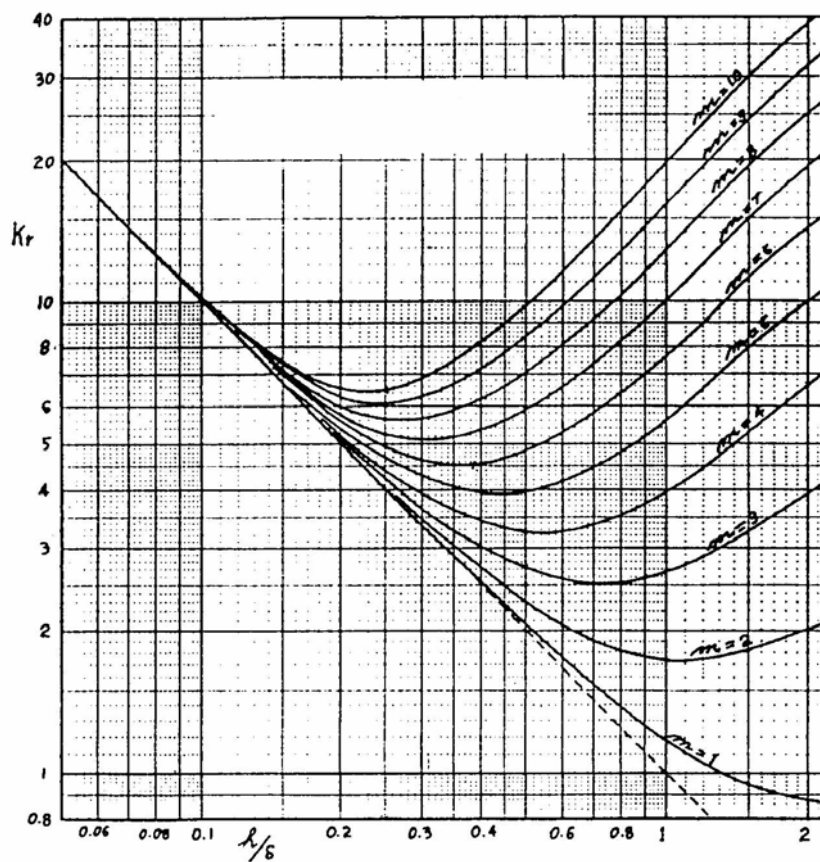


Рис. 4. Зависимости  $K_r$  от высоты проводника и числа слоев



Потери достигают минимума при некоторой толщине проводника на всех кривых, кроме линии для однослойной обмотки, и при этом, минимум потерь оказывается при толщине обратно пропорциональной числу слоев.

При изменении коэффициента заполнения импульсов от 0,1 до 0,8, характер зависимостей потерь полностью сохраняется. Исключение составит лишь изменение толщины проводника при оптимуме коэффициента сопротивления. При уменьшении времени фронта, оптимальная толщина проводника связана с коэффициентом заполнения следующим соотношением:

$$m \frac{h}{\delta} = 3,075 \sqrt{D} \quad \text{для минимума } K_r.$$

### **Разнополярная прямоугольная форма тока**

Данные о потерях для разнополярной прямоугольной формы тока при оптимальной толщине имеют тот же характер, что и для однополярного импульса. Но оптимальная толщина несколько меньше (составляет 1,54 глубины скин-слоя), а коэффициент сопротивления больше. Это можно понимать как полезный эффект постоянной составляющей тока в импульсе, которая имеет более низкие потери чем на эквивалентном переменном токе.

Если имеет место некоторое изменение коэффициента заполнения, то формула для оптимальной толщины будет иметь вид:

$$m \frac{h}{\delta} = 1,537 \sqrt{D}.$$

В трансформаторах, имеющих обмотки со средней точкой (первичные или вторичные) и намотанных бифилярно, для снижения индуктивности рассеяния, потери будут даже больше. Каждая обмотка, проводящая ток, наводит вихревые токи в расположенной поблизости непроводящей обмотке. Этот эффект можно преодолеть располагая обмотки чередованием, например: 1/2 первичной — вторичная — 1/2 первичной.

### **Треугольная форма тока в дросселях**

Потери в проводниках дросселей, имеющих существенные пульсации тока, складывается из потерь от постоянного и переменного токов. Потери на постоянном токе легко рассчитать, а потери на переменном токе можно определить отдельно по графикам на рис. 5.

На рис. 5 изображены зависимости  $K_r$  от высоты проводника, для обмоток с числом слоев от одного до десяти, проводящей ток симметричной треугольной формы.

Комбинированный коэффициент сопротивления  $K'_r$  можно рассчитать с учетом постоянного тока следующим образом:

$$K'_r = \frac{K_r + \frac{(I_{dc} / I_{ac})^2}{12} \frac{h}{\delta}}{\frac{1}{12} + (I_{dc} / I_{ac})^2},$$

где:  $I_{dc}$  — постоянный ток;

$I_{ac}$  — размах переменного тока (двойная амплитуда).

Когда в обмотке протекает постоянная составляющая тока, минимум потерь сдвигается в сторону большей толщины проводника. Значительная величина постоянного тока может привести к исчезновению минимума. Например: для двухслойной обмотки это произойдет, когда постоянная составляющая будет больше 70% от размаха переменной составляющей.

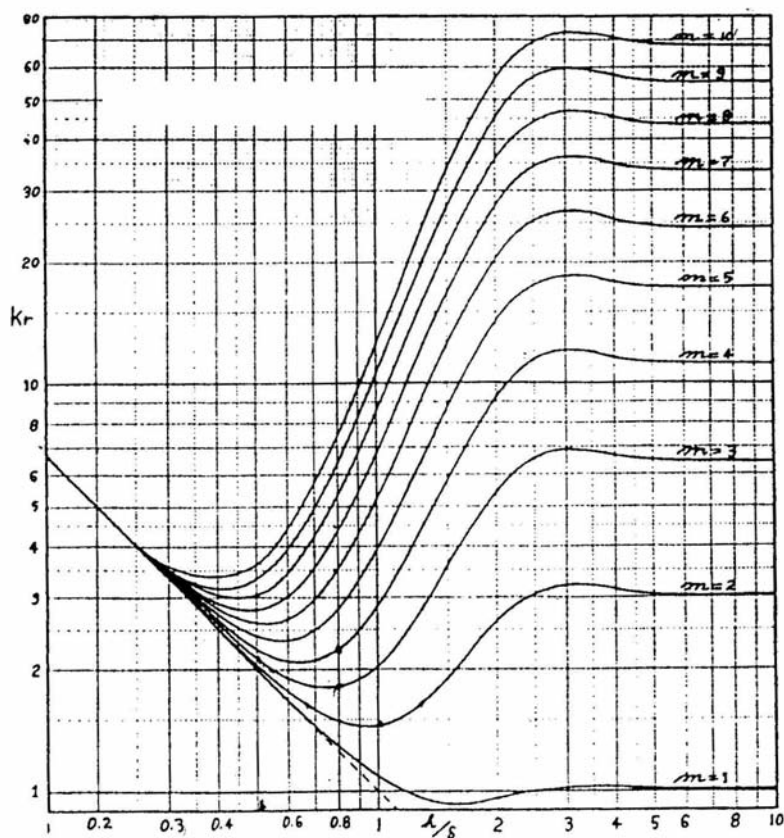


Рис. 5. Зависимости  $K_r$  от высоты проводника и числа слоев

## Другие виды потерь

### Концевой эффект

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 еще труднее вычислить. Магнитное поле вообще менее интенсивно на концах, что могло бы приводить к небольшому снижению потерь в проводниках выводов.

Однако, когда используются обмотки из фольги, магнитное поле старается проникнуть через фольгу в направлении, которое вызывает вихревые токи поперек ширины фольги, также как и по толщине. Это, казалось бы, приведет к увеличению потерь в проводнике, но на практике этого не происходит. Возможно оттого, что вихревые токи достаточно “разглаживают” магнитное поле около концов, что минимизирует увеличение потерь.

Если в качестве сердечника используется магнитопровод закрытого типа, который закрывает концы обмоток (типа броневое сердечника), то дивергенция поля свертывается и соответствующие потери тоже.

### *Эффект зазора в сердечнике магнитопровода*

Трансформатор или дроссель, имеющий дискретный воздушный зазор (зазоры), создаёт дополнительные потери от вихревых токов, обычно состоящие из двух компонентов. Первое, из-за сильного магнитного поля, сосредоточенного непосредственно около зазора, которое пересекает проводник вблизи зазора и вызывает вихревые токи. Второе, из-за менее интенсивного, но более обширного магнитного поля, сгенерированного магнитодвижущей разностью потенциалов сердечника на каждой стороне зазора.

Этот эффект имеет тенденцию более сильного проявления в обмотках из фольги, чем с круглым проводом того же сечения, так как эти поля имеют сильную составляющую перпендикулярную оси обмотки и следовательно поверхности фольги.

### *Эффект внешнего проводника*

Любой дополнительный проводящий материал, расположенный в областях сильного магнитного поля дросселя или трансформатора, вызывает появление в нем вихревых токов и, следовательно, дополнительные потери мощности. Это могут быть: толстые экраны, выводы, крепёжные детали или другие точечные элементы. Обычно, магнитное поле самое сильное в любых зазорах сердечника и около них, следовательно, и потери вызванные вихревыми токами будут большими в любых близлежащих проводниках.

## **Методы снижения высокочастотных потерь в проводниках**

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

*Провод литцендрат.* Возможно наиболее очевидный ответ, который приходит инженерам – использование провода типа литцендрат. К сожалению, исследование потерь в проводниках показывают, что вопреки всеобщему убеждению, литцендрат не является универсальной панацеей против высокочастотных потерь в проводниках.

Сначала, необходимо отличить истинный провод литцендрат от провода сформированного скручиванием изолированных проводов вместе. Провод литцендрат изготавливается сплетением изолированных жил так, чтобы каждая жила находилась на поверхности и в любом месте поперечного разреза на всем протяжении провода. Это усредняет импеданс каждой жилы провода, в результате чего в них протекают равные токи, что минимизирует скин-эффект.

Этот эффект не происходит в скрученных пучках проводов. Хотя эффекты, вызывающие вихревые токи и меньше, чем в сплошном проводнике того же диаметра, но, так как центральные жилы провода не проводят полезный ток, то результат был бы лучше, если бы они были удалены, или заменены непроводящим материалом.

Используем существующие вычисления, чтобы исследовать потенциальные преимущества провода литцендрат аналитически, при этом сделаем несколько простых допущений:

- 1) Будем учитывать только скин-эффект и эффект близости.
- 2) Магнитное поле везде параллельно оси обмотки.

- 3) Провод литцендрат идеален и имеет плотность материала такую же, как сплошной медный проводник.

Идеальный провод литцендрат не может существовать практически, из-за необходимости размещения изоляции и оплетки.

Замена сплошного проводника на идеальный провод литцендрат эквивалентна секционированию проводника по горизонтали и вертикали, и принудительному разделению полного тока равномерно по всем жилам. Горизонтальное секционирование не дает никакой выгоды, из-за второго допущения, поэтому, необходимо рассматривать только результат вертикального секционирования.

Вертикальное секционирование эквивалентно замене проводника из фольги на стопку проводников из более тонкой фольги с такой же суммарной толщиной и током. Максимальную выгоду от этой операции на уже оптимизированных обмотках можно оценить по рис.3 и 4, принимая число слоев равным корню квадратному от числа жил.

Для примера в таблице 1 приведены данные по потерям трансформатора с разнополярной прямоугольной формой для  $t_r = t_f = 5\%$  и  $D = 1$ .

Таблица 1.

Число слоев	Эквивалентное число проводов в литцендрате	Оптимальная толщина	$K_r$	Относительные потери
1	1	1.588	1.08	1.00
2	4	1.588	0.945	0.88
5	25	2.138	0.65	0.60
10	100	2.958	0.465	0.42

А в таблице 2 — для более коротких времен  $t_r$  и  $t_f$ .

Таблица 2.

Число слоев	Эквивалентное число проводов в литцендрате	Оптимальная толщина	$K_r$	Относительные потери
1	1	2.178	0.87	1.00
2	4	2.178	0.86	0.99
5	25	2.178	0.79	0.91
10	100	2.228	0.643	0.74

Как видно из таблицы 1 провод литцендрат дает ощутимое снижение эффективного сопротивления, но только при относительно больших фронтах переключения, и следовательно с относительно низкочастотным спектром.

Согласно таблице 2, при наличии в спектре более высокочастотных составляющих, оптимальная толщина обмотки изменяется незначительно, но все еще имеется скромное снижение потерь.

Из вышеизложенного следует, что нет вреда от использования провода литцендрат и имеется некоторое снижение потерь. Однако провод литцендрат не является универсальным решением для снижения высокочастотных потерь в проводниках. Для изученных форм тока он относительно скромно сокращает потери, но если использовать его неосторожно то в результате можно получить увеличение потерь.

Дифференцированная намотка по слоям. В многослойных обмотках доля потерь во внутренних слоях увеличивается с числом слоев. Оптимальная толщина слоя – компромисс, балансирующий между потерями от скин-эффекта во внешних слоях и потерь от вихревых токов во внутренних слоях. Можно предположить, что полные потери могли бы быть значительно уменьшены, если толщину каждого слоя независимо оптимизировать на минимальные потери в этом слое, производя изменение толщины провода по слоям, т.е. более тонкие во внутренней части и более толстые на внешней стороне.

Для однополярного импульсного тока с коэффициентом заполнения 0,5 и временами  $t_r$ ,  $t_f = 0,1\%$ , например, сокращение потерь составило 10% для двухслойной обмотки, и медленно увеличивалось с ростом числа слоев до 16% в десятислойной обмотке. Таким образом, эти улучшения не стоят усилий потраченных для их реализации.

Плоские многожильные обмотки. Ширина обмотки не оказывает влияния на коэффициент сопротивления на высоких частотах, и следовательно можно использовать более широкие обмотки для уменьшения сопротивления. Этот подход ограничен только практическими физическими соображениями и пригодностью в каждом конкретном случае применения.

Чередование обмоток. В трансформаторах первичная и вторичная обмотки могут чередоваться, создавая две и более секций, например: (П-В)(П-В) или (П-В)(В-П)(П-В), где скобки определяют независимые секции. Это позволяет сделать каждую обмотку в каждой секции оптимальной толщины, а сопротивление уменьшается от числа секций. Количество разбиений и тип чередования выбирается в зависимости от целесообразности.

Влияние зазора в сердечнике. Если требуемый воздушный зазор в дросселе и трансформаторе будет находится вне обмотки, генерирующей магнитное поле, то в обмотке не будет возникать значительных возмущений магнитного поля и, соответственно, дополнительных потерь.

Другая альтернатива – использование нескольких дискретных зазоров равномерно распределенных вдоль обмотки. Предварительные исследования показывают, что дополнительные потери, создаваемые одним зазором, уменьшаются приблизительно пропорционально кубу от числа используемых зазоров. Поэтому даже два или три зазора дадут значительный выигрыш.

Влияние внешних проводников. На высоких частотах следует избегать применения бифилярных обмоток и обмоток со средней точкой. Проволочные выводы не должны располагаться между первичной и вторичной обмотками, или между обмоткой и сердечником в дросселях. Не стоит, также, в этих местах располагать толстые клеммы.

Межобмоточные экраны следует делать минимально тонкими. Если возможно, то вспомогательные обмотки размещать на стороне слабого поля от основной обмотки. Любые проводники должны располагаться как можно дальше от всех воздушных зазоров в сердечнике.