

Проектирование трансформатора с нецелым количеством витков

Lloyd H. Dixon, Jr.

slup200.pdf

Использование нецелого количества витков в трансформаторах высокочастотных ключевых источников питания позволяет уменьшить количество витков, которое требуется для получения низких выходных напряжений, при сохранении необходимой дискретности отношения между несколькими выходами. При использовании нецелого количества витков порой можно обойтись половиной витков (или даже меньше) во всех обмотках, что значительно уменьшает вес и стоимость трансформатора. К сожалению, нецелые витки по своей природе имеют значительную индуктивность рассеяния, делая их использование непрактичным, если не применить специальную методику. Некоторые методы описаны ниже.

Необходимость в нецелых витках

Оптимальное количество витков в обмотке трансформатора зависит от максимально допустимого размаха магнитной индукции и рабочей частоты согласно закону Фарадея (в СИ размеры в см):

$$N_{(\text{optimum})} = (V_N \Delta t / A_e \Delta B) \cdot 10^4$$

где ΔB – размах магнитной индукции (Тл), A_e – площадь керна (см²), Δt – время (примерно $\frac{1}{2}$ периода), когда напряжение V_N приложено к обмотке.

В ключевых источниках питания, спроектированных для работы на частоте менее 50 кГц, оптимальное количество витков является таким большим, что необходимость использования нецелых витков невелика. На более высоких частотах применение нецелых витков становится заманчивым по следующим двум причинам:

1. Оптимальный расчет трансформатора может потребовать менее одного полного витка для самой низковольтной вторичной обмотки. Это является наиболее вероятным при высоких частотах, высоких уровнях мощности и особенно при низких выходных напряжениях порядка 2...3 В, которые требуются для питания новых серий логики.
2. При нескольких вторичных обмотках получение необходимых выходных напряжений с достаточной точностью, используя целое

число витков, может потребовать увеличения числа витков в несколько раз относительно оптимального значения. Например, для выходных напряжений 12 В и 5 В может потребоваться отношение числа витков 2.5:1 или 2.25:1. Если 1 виток является оптимальным для 5 В, 3 витка дадут слишком большое напряжение для выхода 12 В, вызывая повышенные потери в линейном пост-стабилизаторе. Для получения требуемой дискретности напряжения потребуется 5 и 2 витка, или 9 и 4 витка.

В этих примерах реальное количество витков, требуемое для каждой обмотки, может быть в 2, 3 или 4 раза больше оптимального. Потребуется провод немного большего сечения, поскольку более крупный трансформатор должен работать при меньшем значении плотности тока. Это означает, что площадь окна обмоток должна быть больше в 2, 3 или 4 раза, объем сердечника и трансформатора в целом должен быть в 2.8, 5.2 или 8 раз больше с соответствующим ростом стоимости. Это может служить мощным стимулом для применения нецелых витков.

Реализация нецелых витков

Нецелый виток в действительности представляет собой целый виток, но вокруг части полного магнитного потока керна. Для Ш-образного сердечника, который имеет два боковых керна с одинаковой площадью сечения, магнитный поток каждого бокового керна составляет $\frac{1}{2}$ полного магнитного потока. В единичном витке вокруг любого из боковых кернов будет наводиться напряжение, равное $\frac{1}{2}$ значения числа вольт на виток для первичной обмотки. Такой виток эквивалентен $\frac{1}{2}$ витка. На рис. 1а обмотка А составляет $\frac{1}{2}$ витка, а обмотка В – $1\frac{1}{2}$ витка. Обе половинки витка связаны с керном №3. Для сердечника, показанного на рис. 1б, общий магнитный поток делится на четыре равных части в четырех боковых кернах одинакового сечения. Обмотки А, В и С фактически имеют $1\frac{1}{4}$, $1\frac{1}{2}$ и $1\frac{3}{4}$ витка.

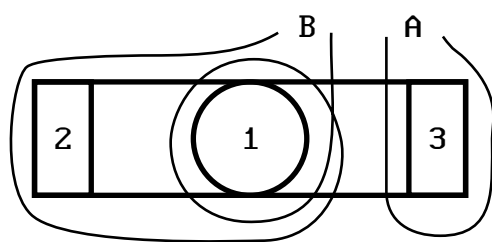


Рис. 1а.

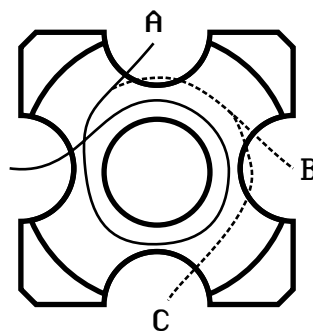


Рис. 1б.

На рис. 2а и 2б показан трансформатор с несколькими боковыми кернами и его эквивалентная магнитная схема. Показанный единичный «нецелый» виток охватывает один или несколько (но не все) боковые керна, которые объединены в керн №3 с магнитной площадью сечения A_3 и магнитной проводимостью $P_3 = \mu A_3 / l_3$. Оставшийся боковой керн (или керна) объединены в керн №2 с площадью сечения A_2 и магнитной проводимостью P_2 .

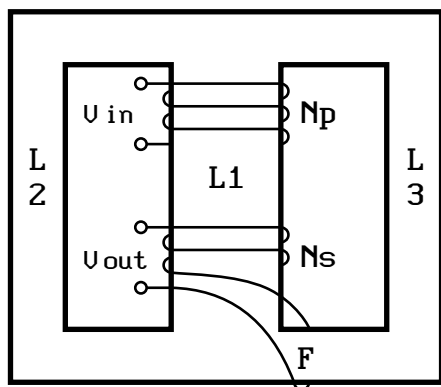


Рис. 2а.

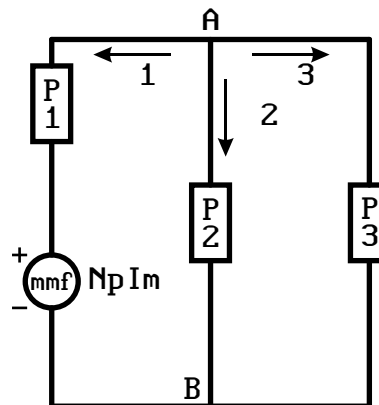


Рис. 2б.

Если ток вторичной обмотки отсутствует, поток центрального керна Φ_1 делится между боковыми кернами №2 и №3 пропорционально их магнитной проводимости или их площади (если принять длины магнитных силовых линий l_2 и l_3 одинаковыми). Пусть $F = P_3/(P_2+P_3) = A_3/(A_2+A_3)$, это часть общей площади боковых кернов, охваченная нецелым витком. Этот виток охватывает часть полного магнитного потока $\Phi_3 = F \cdot \Phi_1$, соответственно, $d\Phi_3/dt = F \cdot d\Phi_1/dt$. Из закона Фарадея следует, что наведенные вольт/витки пропорциональны изменению охваченного потока, т.е. наведенное в нецелом витке напряжение в F раз меньше значения вольт/витков для первичной обмотки V_{in}/N_p .

Целые витки вторичной обмотки вокруг центрального керна и витки первичной обмотки охватывают один и тот же магнитный поток Φ_1 , поэтому их вольт/витки практически одинаковые: $V_s/N_s = V_{in}/N_p$.

Таким образом, $V_{out}/V_{in} = (N_s + F)/N_p$ (без нагрузки)

Ампер-витки тока намагничивания первичной обмотки $N_p I_m$ обеспечивают магнитный потенциал, необходимый для поддержания необходимого уровня магнитного потока в сердечнике.

Проблема индуктивности рассеяния

Полные витки вторичной обмотки сильно связаны с первичной обмоткой. Из-за магнитного потока рассеяния между обмотками имеется небольшая индуктивность рассеяния, включенная последовательно с полными витками вторичной обмотки. К сожалению, нецелые витки имеют очень большую индуктивность рассеяния, и наведенное в них напряжение будет равно $F \cdot V_{in}/N_p$ только без нагрузки.

Когда нецелый виток нагружается, напряжение на нем падает. На практике, когда нецелый виток добавляется к мощной обмотке, ток короткого замыкания может оказаться намного меньше желаемого максимального тока нагрузки. Вместо улучшения, при добавлении нецелого витка характеристики обмотки ухудшаются из-за индуктивности рассеяния.

Как показано на рис. 3, ток вторичной обмотки, состоящей из целых витков вокруг центрального керна, создает магнитный потенциал $N_s I_s$, который компенсируется равным по величине, но противоположным по направлению

магнитным потенциалом первичной обмотки $N_p I_p$. Ток намагничивания I_m и магнитный поток центрального керна Φ_1 сколько-нибудь заметно не меняется. Ток через нецелый виток создает магнитный потенциал в керне №3, который отводит некоторую часть потока Φ_3 в керн №2. Поскольку поток Φ_3 уменьшается, напряжение, наведенное в нецелом витке, тоже уменьшается. Таким образом, напряжение, наведенное в нецелом витке, быстро падает с увеличением нагрузки. При больших значениях тока нагрузки (обычно намного меньше желаемого максимального тока нагрузки) $d\Phi_3/dt$ меняет направление, и напряжение, наведенное в нецелом витке, меняет знак. Когда это происходит, полное напряжение на вторичной обмотке становится меньше, чем в случае без добавления нецелого витка.

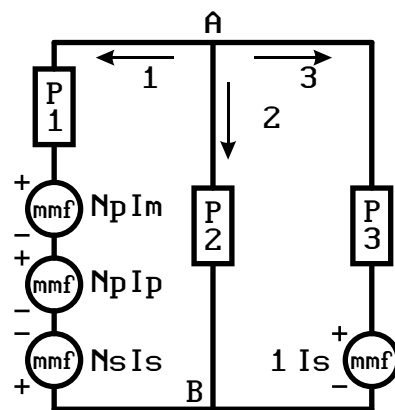


Рис. 3.

Индуктивность рассеяния нецелого витка равна:

$$L = F(1-F) \cdot P = F(1-F) \cdot \mu A/l \cdot 10^{-2} \text{ (Гн)}, \text{ где}$$

l (см) – длина магнитной линии для боковых кернов

$A = A_2 + A_3$ (см²) – общая площадь сечения всех боковых кернов

$F = A_3/A$ – часть общей площади боковых кернов, охваченная нецелым витком

$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость материала

$P = P_2 + P_3 = \mu A/l$ – общая магнитная проводимость всех боковых кернов

Индуктивность рассеяния нецелого витка эквивалентна индуктивности рассеяния одиночного витка, намотанного на сердечнике, состоящем из последовательно составленных кернов №2 и №3 (кern №1 эффекта не дает). Наихудший случай, это когда нецелый виток охватывает половину суммарной площади боковых кернов (тогда виток составляет эффективных $1/2$ витка). Когда нецелый виток включен последовательно с одним или несколькими целыми витками, охватывающими центральный керн №1, или когда он один составляет вторичную обмотку, его индуктивность рассеяния одна и та же. Тем не менее, когда нецелый виток соединен последовательно с несколькими целыми витками, мощность, снимаемая с него, представляет собой малую часть полной мощности трансформатора. Поэтому вредный эффект от индуктивности рассеяния становится пропорционально меньшим, но его более чем достаточно, чтобы испортить, например, групповую стабилизацию в источниках с несколькими выходными напряжениями.

Решение проблемы

Решение простое – поддерживать поток в боковых кернах №2 и №3 строго пропорциональным, независимо от тока вторичных обмоток. Другими словами, необходимо препятствовать перераспределению потока из керна №3 в керн №2, когда ток нагрузки увеличивается.

Один из способов сохранить баланс потоков в двух боковых ядрах Ш-образного сердечника, это разместить по одному витку вокруг каждого бокового ядра, как показано на рис. 4. Два боковых ядра имеют одинаковую площадь (и магнитную проводимость). Каждый из этих витков охватывает половину магнитного потока центрального ядра и работает как половина витка. Если эти витки соединить последовательно в правильной полярности, вместе они превратятся в полный виток. Но если их соединить параллельно (в той же полярности), то они будут работать совместно как половина витка. При параллельном соединении напряжение, наведенное на каждом из витков, должно быть одинаковым, что приводит к выравниванию магнитных потоков в боковых ядрах. Чтобы обеспечить одинаковые значения ампер-витков, требуются противоположные магнитные потенциалы в каждом из боковых ядер, что означает равномерное распределение тока между двумя витками.

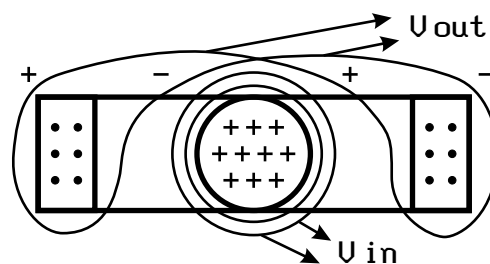


Рис. 4.

Если два боковых ядра имеют неодинаковые потоки, то напряжения, наведенные в двух соединенных параллельно витках, будут отличаться. Это вызовет появление разностного тока между двумя этими витками, который создаст в каждом ядре магнитные потенциалы такого направления, чтобы скомпенсировать неравенство начальных магнитных потоков. По существу, взаимное соединение двух витков заставляет поток распределяться равномерно между двумя боковыми ядрами.

Нужно отметить, что даже если два боковых ядра имеют *разные площади сечения*, поток в каждом ядре будет стремиться принять значение половины общего потока, в результате соединенные параллельно витки будут вести себя как половинные витки.

Данная методика устраняет огромную индуктивность рассеяния одиночного полувитка, но она далека от идеала, потому что существует большой поток рассеяния вне сердечника, который сцеплен с первичной обмоткой, но не с обмотками на боковых ядрах. Это приводит к значительной индуктивности рассеяния. Обычно, чтобы минимизировать индуктивность рассеяния, вызванную потоком рассеяния, вторичные обмотки наматывают как можно плотнее друг к другу и к первичной обмотке.

На рис. 5 показано значительное улучшение рассмотренной выше методики, которое обеспечивает намного лучшую связь с первичной обмоткой, минимизируя индуктивность рассеяния полувитковой вторичной обмотки. Два полуцилиндра из медной фольги или ленты расположены непосредственно на первичной обмотке, разделенные минимально необходимым слоем изоляции. Полуцилиндры не должны непосредственно соединяться друг с другом. Они соединяются параллельно с помощью двух выводов, выступающих с одной стороны, крест-накрест с выводами на другой стороне сердечника. Выход обмотки может быть подключен крест-накрест к этим выводам.

Последовательная индуктивность при такой конструкции полувитка не настолько хороша, как для одиночного полного витка из медной ленты, в основном из-за индуктивности соединенных крест-накрест выводов. Дальнейшее уменьшение последовательной индуктивности может быть достигнуто размещением соединенных крест-накрест выводов на *обеих* сторонах. Наилучшим вариантом является разделение первичной обмотки на две части и помещение вторичной обмотки между ними.

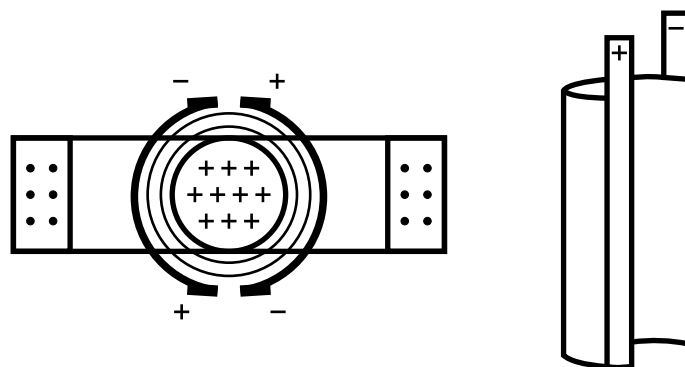


Рис. 5.

Поскольку соединенные крест-накрест полувитки на рис. 5 приводят к равномерному делению магнитного потока, боковые керны становятся «жесткими», поэтому половина витка, добавленная к любой другой вторичной обмотке (или обмоткам) будет тоже иметь низкую индуктивность рассеяния.

Использование отдельных обмоток для выравнивания потока

Любые обмотки, которые размещены на боковых кернах и соединены крест-накрест, будут способствовать равномерному делению магнитного потока между двумя боковыми кернами. Даже нет необходимости в том, чтобы выравнивающая потоки обмотка являлась одной из выходных обмоток. Как показано на рис. 6, это может быть полностью отдельная обмотка, предназначенная исключительно для выравнивания потоков в боковых кернах. Это позволяет добавлять одиночные половинные витки к любым вторичным обмоткам с минимальной последовательной индуктивностью, что достигается поддержанием равномерного деления общего потока между двумя боковыми кернами.

Эта методика полезна в тех случаях, когда нецелые витки добавляются более чем к одной вторичной обмотке. Что особенно актуально для вторичных обмоток со средней точкой в двухтактных преобразователях, где нецелые витки должны быть добавлены с каждой стороны обмотки. В этих ситуациях будет сложно применить методику, приведенную на рис. 5.

Как показано на рис. 6, выравнивающая поток обмотка состоит из двух катушек с одинаковым количеством витков, соединенных крест-накрест в точке, где боковые керны соединяются с центральным керном. На самом деле, эта обмотка может состоять из одного витка на каждом боковом керне, или из нескольких витков. Лучше использовать несколько витков, потому что тогда можно использовать более тонкий провод. Укладкой витков тонкого провода вплотную вдоль боковых кернов можно минимизировать взаимное влияние катушек и устранить проблему потерь на вихревые токи.

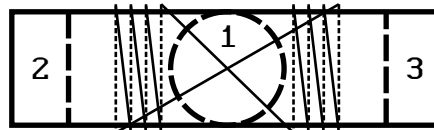


Рис. 6.

Ампер-витки выравнивающей обмотки должны составлять величину, равную $\frac{1}{2}$ значения несбалансированных токов (в амперах) для полувитков вторичных обмоток. Пусть, например, есть две вторичных обмотки: 12 В 3 А и 24 В 2 А. Пусть каждая имеет полувиток, соединенный последовательно с несколькими целыми витками. Если полувитки с током 3 А и 2 А связаны с одним и тем же боковым керном, в худшем случае ампер-витки для выравнивающей обмотки должны составлять $(3+2)/2 = 2.5$ А. Для пяти витков на каждом боковом керне ток составит $2.5/5 = 0.5$ А. С другой стороны, если полувитки 3 А и 2 А связаны с противоположными боковыми кернами, худший случай будет тогда, когда обмотка 3 А работает на полную нагрузку, а обмотка 2 А работает без нагрузки. Максимальное значение ампер-витков для баланса потока составит половину от 3 А, т.е. 1.5 А, в результате в выравнивающей обмотке из пяти витков будет ток всего $1.5/5 = 0.3$ А.

Чтобы этот метод выравнивания потоков давал наибольший эффект в уменьшении индуктивности рассеяния, выравнивающая обмотка должна быть хорошо связана с полувитками вторичных обмоток:

1. Наматывайте выравнивающие поток катушки на боковых кернах как можно ближе к тому месту, где происходит разделение потока – ближе к центральному керну. Если они расположены далеко на боковых кернах, связь с полувитками вторичных обмоток на центральном керне будет уменьшена.
2. Когда полувитки вторичных обмоток соединены с некоторым количеством полных витков, намотанных по спирали вдоль центрального керна, убедитесь, что эти полувитки расположены с той стороны обмотки, которая находится рядом с выравнивающей обмоткой.
3. Если полувиток выполнен из фольги или ленты во всю ширину центрального керна, разместите выравнивающие поток обмотки возле обоих концов центрального керна.
4. Если на вторичную обмотку, которая содержит всего $\frac{1}{2}$ или $1\frac{1}{2}$ витка, приходится основная часть мощности трансформатора, то лучше всего работает методика, показанная на рис. 5.

Другие значения нецелых витков

Безусловно, возможно получение других значений нецелых витков, отличных от $\frac{1}{2}$. Если вернуться к рис. 1б, показанный там сердечник с четырьмя внешними кернами может обеспечить $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ или $\frac{3}{4}$ витка. Для выравнивания потока во всех **четырёх** кернах потребуется чуть другая техника – одиночный выравнивающий виток размещается на каждом из четырех кернов, и эти четыре витка соединяются параллельно. В результате параллельного соединения наведенные на каждом из витков напряжения должны быть равными, что обеспечивает скорость изменения потока одинаковой в каждом керне. В противном случае ток будет течь по выравнивающим виткам таким образом, чтобы сделать потоки равными.

По ссылке (1) автор ловко реализует выравнивающую обмотку с помощью двухсторонней печатной платы с одной стороны центрального керна, где она минимально взаимодействует с обмотками трансформатора. Хотя это решение является простым и дешевым, выравнивающие витки находятся далеко от центрального керна, в результате связь с полувитками вторичных обмоток не такая хорошая, как хотелось бы. К тому же, такие сердечники не являются оптимальными для мощных высокочастотных приложений, так как для минимизации индуктивности рассеяния и потерь на вихревые токи желательно иметь длинное узкое окно сердечника.

Получение любых значений нецелых витков с Ш-образным сердечником

Как было показано выше, выравнивающая обмотка способна обеспечить одинаковый поток в боковых кернах, даже если они имеют разные площади сечения. Но можно и наоборот, *обеспечить любое желаемое наведенное напряжение в нецелом витке путем неравного деления потока между двумя боковыми кернами*, даже если их площади сечения одинаковы. Это делает возможным использование доступных и качественных современных Ш-образных сердечников, получая при этом все преимущества.

Неравное деление потоков между двумя боковыми кернами с одинаковой площадью сечения достигается *использованием неодинакового количества витков в обмотках выравнивания потока*. Допустим, на керне №3 вдвое больше витков, чем на керне №2. Наведенное на обеих обмотках напряжение должно быть одинаковым, так как обмотки соединены параллельно. Это означает, что вольт/витки и $d\Phi_3/dt$ для керна №3 должны иметь значения вдвое ниже, чем для керна №2. Следовательно, в керне №3 с удвоенным количеством витков будет $\frac{1}{3}$ от полного потока, а в керне №2 будет $\frac{2}{3}$.

Любой нецелый виток вторичной обмотки, связанный с керном №3, будет иметь только $\frac{1}{3}$ от вольт/витков первичной обмотки. Аналогично, отношение витков выравнивающей обмотки 1:3 будет приводить к делению потока в пропорции $\frac{1}{4} : \frac{3}{4}$ с соответствующей частью вольт/витков первичной обмотки, наведенной на нецелом витке. В зависимости от того, какой керн связан с нецелым витком, будет получено $\frac{1}{4}$ или $\frac{3}{4}$ витка. В этой конфигурации для получения $\frac{1}{2}$ витка возможно размещение дополнительного витка вокруг керна с потоком $\frac{1}{4}$.

Когда осуществляется неравное деление потока между двумя боковыми кернами с одинаковой площадью сечения, естественно, один из боковых кернов будет иметь большую индукцию по сравнению со вторым керном и, вероятно, даже большую индукцию, чем центральный керн. Теоретически, для устранения насыщения может потребоваться снижение рабочего уровня индукции, что ведет к ухудшению использования сердечника. Однако нецелые витки обычно используются на частотах выше 50–100 кГц, где размах индукции ограничен потерями в сердечнике, а не насыщением. Единственным минусом является то, что один из боковых кернов имеет потери выше, чем другой керн, что означает в целом небольшое увеличение потерь в сердечнике.

Экспериментальные результаты

Данные, приведенные в таблице 1, были получены с первичной обмоткой 20 витков, размещенной на центральном керне ферритового сердечника ЕС41. Вторичные обмотки были размещены непосредственно поверх первичной (без чередования) с межобмоточной изоляцией толщиной 0.127 мм. Индуктивность рассеяния измерялась на стороне первичной обмотки с короткозамкнутой вторичной обмоткой разных конфигураций, так как сложно осуществить точные измерения для низкоимпедансной вторичной обмотки, содержащей $\frac{1}{2}$ витка. Эквивалентная индуктивность рассеяния вторичной обмотки вычислялась на основе данных, полученных для первичной обмотки.

Таблица 1.

№	Описание	Измерения для первичной обмотки, мкГн	Вычисления для вторичной обмотки, нГн	Измерения для вторичной обмотки, нГн
1	Только первичка (20 витков), вторички нет	1480	-	-
2	1 полный виток вторички из медной полосы	1.6	1 (идеал)	-
3	1 полувиток из полосы, нет выравн. обмотки	944	885	-
4	То же, с выравн. обм. на противоположной стороне	144	91	-
5	То же, с выравн. обм. на той же стороне	38	24	-
6	2 параллельных полувитка на боковых кернах, рис. 4	42	26	-
7	2 параллельных полувитка поверх первички, рис. 5	8	5	-
8	5 витков вторички, распределенных по центр. керну	2.9	181	185
9	5½ витков вторички, нет выравн. обм.	17.5	1320	1580
10	То же, с выравн. обм. на противоположной стороне	4.2	317	307
11	То же, с выравнивающей обмоткой на той же стороне	2.8	211	207

В строке (1) показан результат для первичной обмотки из 20 витков на сердечнике ЕС41. В строке (2) показана минимально возможная индуктивность рассеяния, которая может быть получена без размещения вторичной обмотки между двумя половинками первичной обмотки. Деление величины 1.6 мкГн, измеренной для первичной обмотки, на $(20/0.5)^2$ дает значение 1 нГн, что является идеальной оценкой минимально возможной индуктивности рассеяния для $\frac{1}{2}$ витка. В строке (3) показано, насколько плохо ведет себя полувиток без выравнивающей

обмотки. Добавление выравнивающей обмотки с противоположной относительно расположения полувитка стороны (4) дает значительное улучшение, но размещение выравнивающей обмотки на той же стороне, что и полувиток (5), делает связь между этой обмоткой и полувитком намного лучше. Но все же значение 24 нГн слишком далеко от идеала 1 нГн. Для выравнивающей обмотки с одной стороны центрального керна невозможно получить хорошее сцепление по всей длине.

В строке (6) демонстрируется методика, показанная на рис. 4, где вокруг каждого бокового керна размещен один виток. Большое значение потока рассеяния между этими витками и первичной обмоткой приводит к большому значению индуктивности рассеяния. Наилучший результат показан в строке (7), где используются два полуцилиндрических полувитка прямо поверх первичной обмотки. Значительная часть из этих 5 нГн вызвана соединенными крест-накрест выводами, расположенными с одной стороны. Значение может быть уменьшено, если выводы разместить с обеих сторон. Это наилучший подход, если основная часть мощности трансформатора приходится на обмотку, содержащую $\frac{1}{2}$ или $1\frac{1}{2}$ витка.

Строки (8)...(11) показывают результат добавления половины витка к нескольким целым виткам вторичной обмотки, выполненной проводом вместо ленты. Импеданс вторичной обмотки достаточно большой, что позволяет его измерить и со стороны вторичной обмотки. В строке (8) видно, что 5 витков вторичной обмотки связаны с первичной обмоткой не так сильно, как было для закороченной ленты в строке (2). Это происходит по той причине, что витки распределены по всей длине центрального керна с большими зазорами между витками (но это все равно намного лучше, чем сгруппировать все 5 витков по центру керна). Чтобы заполнить весь центральный керн, может быть использовано несколько параллельных проводов. Значение 185 нГн – это почти вдвое больше, если сравнивать приведенные к первичной обмотке значения со строкой (2). Заметим, что при размещении дополнительного полувитка с той же стороны, что и выравнивающая обмотка, связь получается очень хорошей (11), дополнительная индуктивность рассеяния полувитка составляет всего 22 нГн. Это значение сравнимо с одиночным полувитком в строке (5), но в строке (11) оно составляет лишь малую величину по сравнению с индуктивностью рассеяния полных 5-ти витков вторичной обмотки.

Литература:

1. G. Perica, «Elimination of Leakage Effects Related to the Use of Windings with Fractions of Turns», Proceedings of Power Electronics Specialists Conference (PESC), 1984, pp. 268-278.

Перевод:

Ридико Леонид Иванович, e-mail: wubblick@yahoo.com