

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДРОССЕЛЕЙ

ВЕЙМАН ЛУНДКВИСТ (WEYMAN LUNDQUIST), президент и технический директор, West Coast Magnetics, Stockton, Calif.

Разработчикам предлагаются новые способы снижения высокочастотных потерь в обмотках силовых дросселей, основанные на расчетах при помощи свободно распространяемой (freeware) программы, оптимизирующей конструкцию обмоток из литцендрата, и на технологии формирования обмоток из фольги (foil-winding technology), хорошо работающей в условиях больших пульсирующих токов и высокой мощности.

Быстрое развитие силовых компонентов позволяет увеличивать рабочие токи и частоты новых электронных устройств. Поскольку дроссели входят в состав практически всех силовых узлов, они так же, как и другие компоненты, нуждаются в совершенствовании. К тому же дроссели, как правило, являются самыми громоздкими и дорогими элементами мощных приборов, неэффективно использующими пространство.

Поэтому совершенствование дросселей, ведущее к существенному снижению их размеров и стоимости, оказывает значительное влияние на улучшение конструктивных параметров всех систем силовой электроники. Один из путей, способствующих уменьшению габаритов силовых дросселей — снижение потерь на высоких частотах, что позволяет задавать в схемах меньшие значения индуктивности и, соответственно, использовать более миниатюрные дроссели.

Добиваясь снижения ВЧ-потерь мощности в дросселях, разработчики должны понимать причины возникновения этих потерь и знать возможные способы их уменьшения — например, технологию формирования обмоток из фольги, подходящую для больших пульсирующих токов и высокой мощности. Тех, кто работает в направлении оптимизации конструкции дросселей с обмотками из литцендрата, может заинтересовать новый метод, упрощающий процесс проектирования. Этот метод заключается в применении свободно распространяемой программы, позволяющей оптимизировать параметры обмотки, а также ее расположение внутри доступного пространства.

ПОТЕРИ В ОБМОТКАХ

Существуют два принципиально разных вида потерь в дросселях: потери в сердечнике и потери в обмотках. Первые обусловлены вихревыми токами внутри самого сердечника и магнитными свойствами материала — потерями на перемагничивание, отображаемыми в виде петли гистерезиса. Причина потерь в

обмотках — это сопротивление самих проводов, обычно медных.

Дроссели, используемые в импульсных силовых приборах, подвержены воздействию ВЧ-пульсаций тока, что может привести к существенному росту эффективного сопротивления обмотки и связанных с ним потерь в медных проводниках. Сопротивление обмотки силовых дросселей включает в себя две составляющие: сопротивление постоянному и переменному току, возникающее в результате действия скин-эффекта и эффекта близости.

Изменение тока в проводе индуцирует магнитный поток, который, в свою очередь, приводит к снижению тока в центральной части провода до очень малых величин. Это ведет к уменьшению эффективного поперечного сечения проводника и увеличению его сопротивления с ростом частоты. Поэтому чем выше частота и ток, тем больше потери мощности.

На рабочих частотах той цепи, в которую включен дроссель, сопротивление переменному току может становиться очень большим, часто намного превышающим сопротивление по постоянному току, что ведет к существенному росту потерь в медных проводниках. Кроме того, в силовых дросселях, оснащенных сердечниками с зазором, магнитное поле в зоне воздушного промежутка создает сильный локальный эффект близости, способный значительно увеличить сопротивление медных проводников по переменному току, а, значит, привести к росту соответствующих потерь и даже выходу дросселя из строя.

Все описанные явления влияют на величину потерь мощности в любом электромагнитном устройстве. Взаимосвязь этих явлений значительно усложняет процесс разработки дросселей. Например, один из распространенных способов уменьшения сопротивления по переменному току — применение литцендрата. Однако при этом значительно снижается поперечное сечение проводника, что ведет к резкому росту сопротивления постоянному току.

Рассмотрим другой пример. Для снижения потерь в обмотках при работе в режимах высоких постоянных токов часто применяются дроссели с обмотками из фольги, позволяющие эффективно использовать пространство внутри сердечника. Однако появление даже очень небольшого переменного тока может привести к возникновению в таких обмотках существенных потерь. Все это неприемлемо для большинства современных силовых систем. Многие преобразователи постоянного тока требуют использования дросселей, способных работать в режиме пульсирующих токов с большой постоянной составляющей. Даже при условии того, что переменная составляющая тока будет всегда намного меньше постоянной составляющей, сопротивление переменному току может стать на порядок больше сопротивления постоянному току. Проблема становится все более острой по мере того, как в современных установках повышается плотность тока и рабочая частота.

К счастью, уже найдены способы снижения потерь по переменному току в медных проводниках. Например, эти потери существенно уменьшаются при применении однослойных обмоток. При использовании порошковых сердечников без зазора удается значительно ослабить влияние эффекта близости, что также ведет к снижению потерь по переменному току в медных проводниках.

Однако порошковые сердечники, как правило, характеризуются гораздо большими потерями на перемагничивание, чем ферритовые. Поэтому в силовых установках с высоким уровнем пульсаций тока иногда все же предпочитают использовать сердечники с зазором — из-за меньших потерь в них. Или же применяют порошковые сердечники из материала со сравнительно высокой магнитной проницаемостью и зазором, что позволяет использовать преимущества и того, и другого подхода. Но в этих случаях приходится решать проблемы, связанные

USB для встроенных решений

Microcontrollers

Digital Signal
Controllers

Analog

Serial
EEPROMs



Если Вам нужно устройство с Full-Speed USB 2.0 со встроенной функциональностью хоста или On-The-Go, Microchip предлагает 8-и, 16-и и 32-битные микроконтроллеры со встроенным модулем USB, что позволяет быстро переводить разработку с одного семейства на другое. Максимальная совместимость по выводам и универсальный программный код для всех МК от 20-и до 100-выводных, сделают Вашу разработку более гибкой.

Скачайте бесплатный USB стек в исходных кодах:

- Host стек
- OTG стек
- Device стек
- классы основных драйверов (HID, Mass Storage, CDC)
- поддержка ThumbDrive (Mass Storage Driver, интерфейс SCSI, 16-и и 32-битные файловые системы, прикладное ПО)

Ядро	Программная память Flash	Выводы	Тип USB
8-bit	Up to 128 Kbytes	20 - 80	Device
16-bit	Up to 256 Kbytes	64 - 100	Device, Embedded Host, Dual Role, OTG
32-bit	Up to 512 Kbytes	64 - 100	Device, Embedded Host, Dual Role, OTG

Быстрое знакомство в три шага:

1. Купите стартовый набор для знакомства с USB «USB Starter Kit»
2. Скачайте бесплатный программный стек USB
3. Закажите образцы www.microchip.com/usb

USB Starter Kits позволяет ускорить разработку устройств с USB, как на 8-и и 16-и, так и на 32-битных МК. По образцам и заказам обращайтесь в компанию Гамма Санкт Петербург по телефону (812) 325 5115



Intelligent Electronics start with Microchip

www.microchip.com/usb

 MICROCHIP

с краевыми эффектами в зазорах, а также с потерями в медных проводниках, которые могут быть весьма значительными.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБМОТКИ ИЗ ФОЛЬГИ

Обмотки из фольги являются хорошей альтернативой традиционным обмоткам, что связано со сравнительно высоким коэффициентом использования пространства внутри сердечника и очень низким сопротивлением постоянному току. West Coast Magnetics совместно с Thayer School of Engineering из Dartmouth разработали технологию формирования обмоток из медной фольги¹, обладающих низкими потерями как по постоянному, так и по переменному току. Новая технология позволяет формировать фольгу в окрестности зазора таким образом, чтобы магнитный поток по краям зазора помогал выравнивать распределение тока через фольгу и минимизировать скин-эффект и эффект близости. В случае

больших токов с сильными пульсациями применение дросселей со специально сформированными обмотками из фольги может существенно сократить потери.

Для сравнения обмоток, изготовленных из фольги по новой технологии, с традиционными обмотками из фольги, одножильного провода и литцендрата, был проведен специальный эксперимент². Для этого были изготовлены и протестированы серии дросселей на 40 А. Во всех дросселях применялись одинаковые ферритовые сердечники E70/33/32 из материала EPCOS N67 с зазором 2,63 мм в центре (стандарт B66371-G-X167). Обмотка каждого дросселя состояла из 15 витков, обеспечивающих индуктивность в диапазоне 90...95 мкГн.

На рисунке 1 показаны тестируемые типы обмоток. Во всех случаях применялись наилучшие техники изготовления обмоток: послойная намотка литцендрата и одножильного провода, а также

максимальное заполнение пространства внутри сердечника.

Обмотка из одножильного проводника состояла из 4 слоев провода номер 10; каждый слой состоял из 15 витков; все слои были соединены параллельно. Обе обмотки из литцендрата были также намотаны в 4 параллельных слоя из 15 витков, но в одном случае использовался литцендрат AWG 500/40 (500 жил провода номер 40), а во втором — литцендрат AWG 80/32 (80 жил провода номер 32).

Стандартная обмотка из фольги состояла из 15 витков 0,020-дюймовых медных полос шириной 1,55 дюйма, разделенных диэлектриком Nomex 0,003 × 1,69 дюйм. Два дросселя были изготовлены по новой технологии формирования фольги. Обмотка одного из них была рассчитана на постоянный ток 40 А с 15-% пульсациями (полный размах 6 А) с частотой 50 кГц, а второго — на тот же ток, но с 22,5-% пульсациями той же частоты.

В каждом из шести дросселей экспериментально определялись суммарные потери в сердечниках и медных проводниках. Полученные результаты показаны на рисунке 2. Выделенная область иллюстрирует снижение потерь, наблюдаемое в дросселях, реализованных по новой технологии, по сравнению с традиционными дросселями. Поскольку потери в сердечниках всех дросселей были одинаковыми, продемонстрированное уменьшение потерь происходило только за счет снижения потерь в обмотках.

Кроме того, было проведено тестирование тех же дросселей при пульсациях тока в диапазоне 1—30% с частотами 10...500 кГц. Экспериментальные данные показали, что применение технологии формирования обмоток из фольги наиболее эффективно (с точки зрения снижения потерь) при пульсациях тока, превышающих 10%, в диапазоне частот 25...500 кГц.

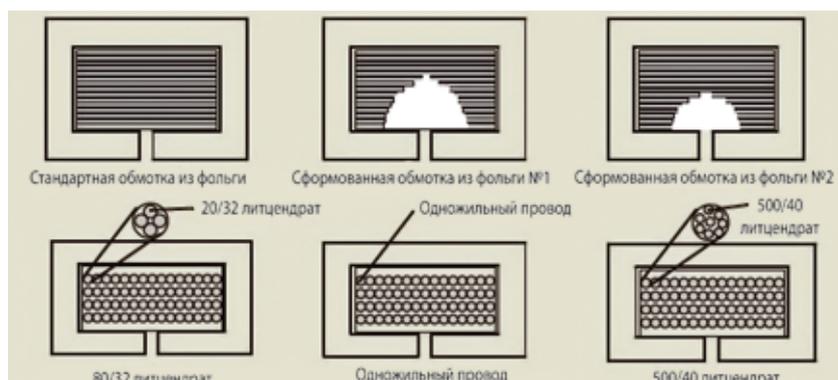


Рис. 1. Поперечные сечения шести разных типов дросселей на 90 мкГн, 40 А

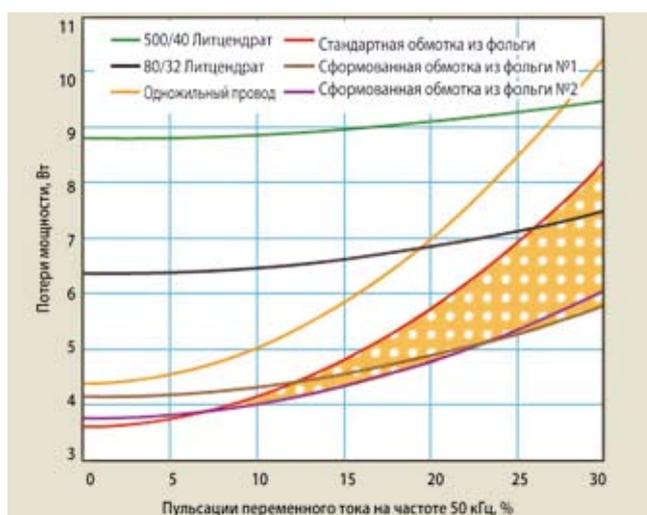


Рис. 2. Сравнение потерь мощности для дросселей, реализованных по технологии формирования обмотки из фольги, и дросселей, изготовленных по традиционным технологиям, выявило, что они обладают минимальными потерями при работе с пульсациями тока, превышающими 10%, в частотном диапазоне 25...500 кГц

¹Технология формирования обмоток из фольги запатентована Dartmouth College, обладателем лицензии является West Coast Magnetics.

²Этот эксперимент был разработан West Coast Magnetics, а также инженером-электриком Jennifer Pollock, кандидатом наук из Dartmouth's Thayer School of Engineering. Профессор Charles Sullivan из Thayer School of Engineering и Ryan Goldhahn, кандидат наук из Duke University, также приняли участие в данном эксперименте.

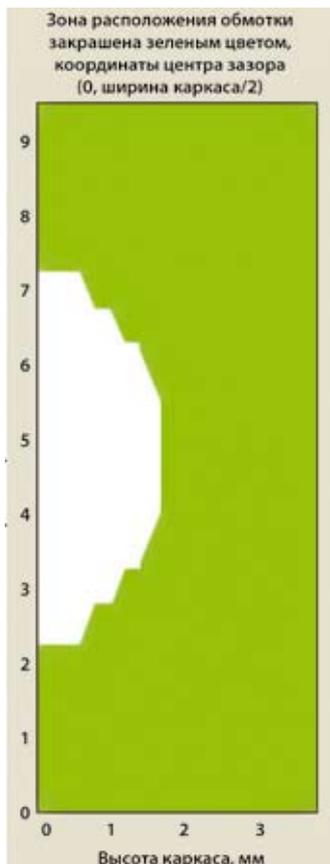


Рис. 3. Определение оптимального расположения обмотки внутри окна заданного каркаса дросселя на 10,6 мкГн программой ShapeOpt

жения внутри каркаса, позволяющее минимизировать потери в обмотке.

Свободно распространяемая программа симуляции ShapeOpt, которую можно скачать на сайте www.thayer.dartmouth.edu/inductor/shapeopt, дает разработчикам возможность оптимизировать параметры обмотки и ее расположения внутри доступного внутреннего пространства дросселя. Программа проста в использовании. Для работы с ней необходимо ввести следующие данные:

- ширина и высота окна внутри сердечника;
- ширина и высота окна каркаса дросселя;
- амплитуда и частота пульсаций тока;
- длина зазора;
- коэффициент заполнения каркаса;
- диаметр жил литцендрата;
- длина витка;
- количество витков.

Используя эти данные, программа рассчитывает напряженность поля внутри каркаса, а также идеальное расположение в нем обмотки. Кроме того, программа определяет суммарные потери в обмотке и выбирает количество жил, требуемое для заполнения доступного внутреннего пространства.

Для примера рассмотрим дроссель индуктивностью 10,6 мкГн, работающий на частоте 250 кГц со среднеквадра-

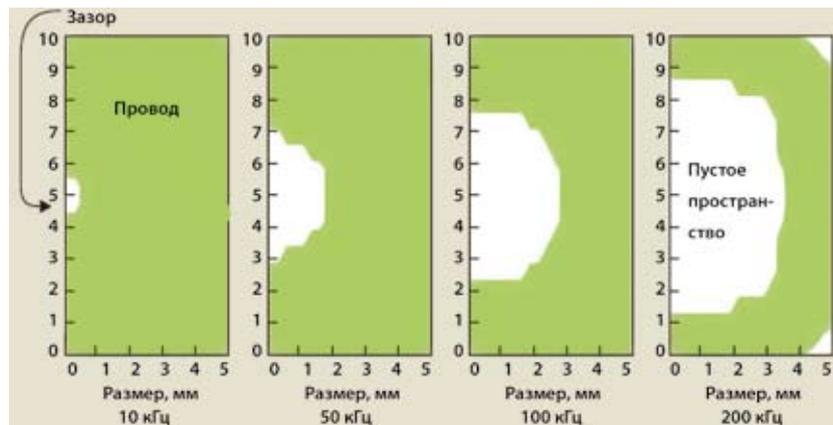


Рис. 4. Определение оптимального расположения обмотки одного и того же дросселя в зависимости от рабочей частоты программой ShapeOpt

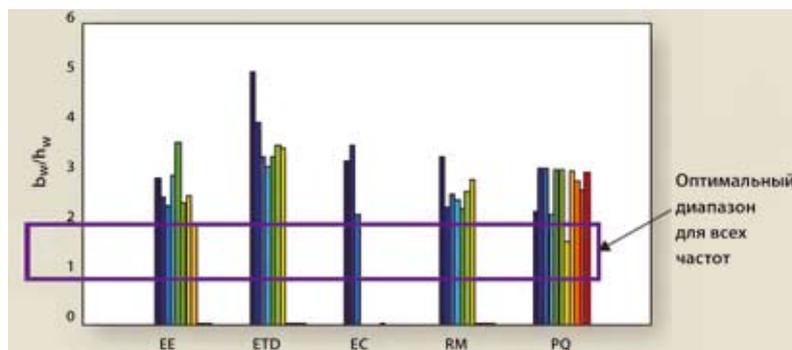


Рис. 5. Анализ отношения высоты к ширине нескольких типовых сердечников E-типа показал, что большинство доступных сердечников и каркасов не обладают оптимальной формой для создания силовых дросселей с сердечниками с зазором

тичным значением пульсаций тока 4 А. В дросселе используется сердечник E19/8/5 с зазором 0,65 мм и обмотка из 13 витков. Для обмотки выбран литцендрат 44 AWG с диаметром жил 0,05 мм. Программа ShapeOpt выдала результат, что при оптимальном суммарном количестве жил (314) полные потери в обмотке дросселя составят 0,28 Вт. На рисунке 3 показано оптимальное расположение обмотки внутри каркаса: зеленым показана область, занимаемая обмоткой, а белым — свободное пространство.

На практике данный каркас может быть быстро реализован при помощи специальной изоляционной ленты, формирующей требуемое прямоугольное сечение, близкое к показанному на рисунке 3. Этот тип ленты аналогичен межслойной ленте, широко используемой в трансформаторах для ограничения утечек по поверхности и поддержания изоляционных расстояний на уровне, определяемом требованиями к диэлектрикам силового устройства.

Из рассмотренного примера видно, что полное заполнение каркаса обмоткой не является оптимальным решением. Фактически, такой подход часто ведет к увеличению потерь. С ростом частоты эта проблема становится еще более острой.

На рисунке 4 показан пример выбора оптимального расположения обмотки силового дросселя в зависимости

от частоты. Из рисунка видно, что чем выше частота, тем критичнее для минимизации потерь становится вопрос расположения обмотки во внутреннем пространстве сердечника.

При помощи программы ShapeOpt исследователи из Thayer School of Engineering также попытались определить оптимальное соотношение высоты и ширины отверстия в сердечнике, предназначенного для обмотки. Поиск этого соотношения, от которого зависят суммарные потери в обмотке, проводился варьированием высоты отверстия по отношению к его ширине, тогда как периметр отверстия и параметры обмотки из литцендрата оставались неизменными. После проведения данной работы удалось сделать интересные выводы.

На низких частотах — в диапазоне 1...10 кГц — оптимальное соотношение ширины к высоте оказалось приблизительно равным 1. Но при увеличении частоты до 500 кГц оптимальное соотношение возросло почти до 2.

При сравнении этого результата с соотношением высоты к ширине нескольких типовых сердечников E-типа (см. рис. 5), становится очевидным то, что большая часть каркасов и сердечников, представленных на рынке сегодня, имеют геометрию, неоптимальную для проектирования силовых дросселей с сердечниками с зазором.