

Выбор материала сердечника для трансформаторов/катушек индуктивности

Порошковые сердечники изготавливаются из множества материалов. Магнитному сплаву придается форма мелкодисперсных частиц диаметром от 5 до 200 мкм. Частицы покрываются изолирующим материалом толщиной от 0,1 до 3 мкм, и прессуют в пресс-формах при усилии до 300.000 фунтов на квадратный дюйм (21.000 кг/см²).

Порошковые сердечники.

Порошковые сердечники изготавливаются из множества материалов. Магнитному сплаву придается форма мелкодисперсных частиц диаметром от 5 до 200 мкм. Частицы покрываются изолирующим материалом толщиной от 0,1 до 3 мкм, и прессуют в пресс-формах при усилии до 300.000 фунтов на квадратный дюйм (21.000 кг/см²).

При таких высоких давлениях необходимо использовать оснастку из карбида вольфрама. Возможно большое разнообразие форм порошковых сердечников, но самыми распространенными являются тороиды. На маленькие тороиды наносится покрытие из парилена (поли-п-ксилилен, *parylene*), а на большие - эпоксидное. Покрытие необходимо для предотвращения короткого замыкания в процессе намотки обмотки и эксплуатации.

Изменение размера частиц, толщины их покрытия и давления позволяет изменять проницаемость готовых порошковых сердечников в диапазоне от 14 до 350. Затем сердечники отжигаются при высокой температуре в атмосфера водорода. Отжиг снимает внутренние напряжения, возникшие при прессовании, препятствует окислению и улучшает магнитные свойства порошковых сердечников.

Потери на вихревые токи в порошковых сердечниках минимальны из-за того, что каждая частица магнитного материала изолирована от других. Изолирующий материал обеспечивает распределенный воздушный зазор, который снижает проницаемость и дает возможность сердечнику запасать значительное количество энергии. Отсутствие локализованного воздушного зазора устраняет вредное действие краевого эффекта и связанных с ним потерь.

Порошковое железо выпускается с проницаемостью от 10 до 90 и является самым дешевым порошковым материалом. Из-за сложности производства изготовление сердечников с более высокими проницаемостями практически нецелесообразно. Кроме тороидов оно выпускается в виде стержней и E - и I - сердечников. Насыщается в районе 10 кГс, но имеет очень большие потери.

Хотя потери в порошковом железе и высокие, они ниже, чем в трансформаторной стали. Оно эффективно применяется в виде стержней при очень низких уровнях потока для подстройки резонансных контуров с трансформаторной связью. Порошковое железо также используется в фильтрах с низкими эксплуатационными характеристиками, которые должны выдерживать большие постоянные токи, а цена имеет определяющее значение. Под воздействием высокочастотного пульсирующего тока значительной величины порошковое железо становится очень горячим.

MPP - порошковый молибденовый пермаллой, также известный как Мо-пермаллой. Мо-пермаллой (MPP) сердечники производят из сплава, состоящего из 2% молибдена, 81% никеля и 17% железа. Мо-пермаллой (MPP) тороиды изготавливаются с проницаемостью от 14 до 350. Это самый широкий диапазон проницаемостей для всех порошковых материалов. Мо-пермаллой (MPP) насыщается при 7 кГс и обладает самыми низкими потерями из всех порошковых материалов. У Мо-пермаллоя (MPP) самая лучшая температурная стабильность наряду с самым малым изменением проницаемости при малом и среднем уровне возбуждения. Высокое содержание никеля в Мо-пермаллоое (MPP) делает его самым дорогим из всех порошковых сердечников, но его превосходные характеристики более чем компенсируют его стоимость.

Мо-пермаллой (MPP) наилучший материал для фильтров звуковой частоты, среднечастотных низкоуровневых резонансных контуров и сглаживающих дросселей в переключаемых источниках питания. Мо-пермаллой (MPP) сердечники можно использовать в мощных резонансных контурах, работающих в области насыщения на частотах до 3,5 кГц. При введении в насыщение на частотах выше этой выделяется слишком много тепла. Это самый лучший материал для трансформаторов тока в диапазоне 10 кГц - 1 МГц, особенно если необходимо выдерживать большие постоянные токи. Наиболее эффективное решение, из-за очень низких потерь на вихревые токи, при необходимости изолировать шину питания от коротких мощных пиков напряжения.

Сендаст был изобретен в Японии перед Второй мировой войной. Он состоит из 6% алюминия, 9% кремния и 85% железа. Тороиды из сендаста производятся с проницаемостями от 60 до 125 под торговой маркой Super-MSS. Свойства сендаста при подмагничивании постоянным током схожи с Мо-пермаллоем (MPP), а потери меньше, чем у порошкового железа, но больше, чем у Мо-пермаллоя (MPP). Из сендаста изготавливались высококачественные магнитные головки. MSS хорошо подходит для сетевых и выходных фильтров средних характеристик.

И хотя он слегка дороже порошкового железа, его значительно более низкие потери оправдывают разницу в цене. В переключаемых источниках питания, где потери не так критичны, Super-MSS (сендаст) обычно используют как

замену Мо-пермаллою (MPP). Часто это - наилучший выбор, потому что Super-MSS (сендаст) стоит дешевле Мо-пермаллоя (MPP).

High Flux (HF) порошковые сердечники изготавливают из сплава 50% никеля и 50% железа. HF тороиды имеют проницаемость от 14 до 200. Сердечник из Hi-Flux (HF) может запасти в четыре раза больше энергии, чем сердечник MPP (Мо пермаллоя) или MSS (сендаста) такой же проницаемости и размеров, так как его практическое насыщение - 11 кГс. Hi-Flux (HF) стоит немного дешевле MPP (Мо-пермаллоя) и является самым лучшим выбором для применений, в которых требуется накопление максимальной энергии, а стоимость не имеет большого значения. Его потери значительно меньше, чем у порошкового железа, но больше, чем у MPP (Мо-пермаллоя) или Super-MSS (сендаста). Hi-Flux (HF) - лучший выбор для мощных низкочастотных резонансных контуров и дросселей, через которые должны протекать большие постоянные токи. Это делает возможным создание RFI фильтров для сетевых источников питания, которые могут удлинять импульсы выпрямителя и улучшать коэффициент мощности.

Ферриты являются керамическими материалами, изготовленными из окиси железа с добавлением окислов марганца, цинка или других металлов. Компоненты в виде порошков смешиваются, помещаются в форму и спекаются. В результате получается твердое, хрупкое стеклоподобное вещество. Обычно проницаемость имеет диапазон от 750 до 10000. Плотность потока насыщения - от 3 до 5 кГс. Ферриты можно производить в любой удобной форме - тороиды, E - и I - образные сердечники, броневые сердечники и стержни.

Ферриты могут обладать самыми низкими потерями из всех широко применяемых материалов из-за их низкого остаточного намагничивания и высокого удельного сопротивления. Они - наилучший выбор для трансформаторов в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц. Они не очень хорошо подходят для высокочастотных применений, если не снабжены зазором. Это обусловлено большим влиянием температуры и уровня возбуждения на проницаемость и Q (добротность).

Обычно, удельное сопротивление ферритов в миллионы раз больше, чем у магнитомягких сплавов. Хотя это обуславливает самые низкие потери на вихревые токи из всех твердотельных материалов, все равно обмотка должна быть изолирована от сердечника. Кромки феррита, острые как бритва, легко нарушат изоляцию провода во время намотки.

Для предотвращения короткого замыкания во время намотки на ферритовые тороиды наносится париленовое или эпоксидное покрытие. Не смотря на то, что ферриты обладают достаточно высоким удельным сопротивлением, потери на вихревые токи иногда могут создавать проблемы. Это происходит в применениях с высоким напряжением на виток, таких как дроссели в низкочастотных цепях с высоковольтными импульсами. В этих случаях лучший выбор - MPP (Мо-пермаллой).

Формы сердечников.

Тороиды являются самой эффективной магнитной формой и при этом самой дешевой в производстве. Для намотки большого количества витков необходимы специальные машины, что несколько корректирует их низкую цену в сторону повышения. В тороидах обычно зазоры не используют из-за сложности соединения двух секций вместе.

E - и I - сердечники более дорогие в изготовлении из-за необходимости точного совмещения. Если они не точно совмещены, то при креплении они расколются. При необходимости зазор вводится стачиванием среднего стержня E- сердечника. Иногда, для удвоения зазора, соединяются два сердечника. Катушки для таких сердечников наматывают с большой скоростью на недорогих машинах, что частично компенсирует высокую стоимость сердечников.

Наиболее дорогие в производстве - броневые сердечники. Их изготавливают в виде двух половин, которые должны очень точно подходить друг к другу. Сердечник почти полностью окружает катушку, за исключением небольших отверстий для выводов. Практически все магнитное поле катушки заключено внутри сердечника. Если сердечник заземлен, феррит, обладающий средней электропроводностью, действует так же хорошо, как электромагнитный экран. Таким образом, броневые сердечники экранированы лучше, чем все другие типы сердечников.

Броневые сердечники подвергаются перегреву, потому что их обмотка окружена материалом сердечника, который плохо проводит тепло и препятствует циркуляции воздуха. Как и для E - сердечника один или оба центральных стержня могут быть сточены, чтобы обеспечить воздушный зазор. Однако при этом тепловое действие краевых эффектов на обмотку приводит к еще большему возрастанию температуры. У броневых сердечников с зазором для подстройки индуктивности могут быть винтовые сердечники в центральной части.

Воздушным зазором можно обеспечить как стабильность проницаемости ферритов, так и способность запасать значительные количества энергии. При снижении проницаемости ферриты способны выдерживать большие значения постоянного тока без насыщения. На высоких частотах для минимизации потерь на краевые эффекты необходимо использовать литцендрат.

В начале 1980-х Stackpole Carbon Company выпускала ферритовые тороиды с низкой проницаемостью для накопления энергии. Однако по неизвестным причинам производственная линия была ликвидирована.

Потери в сердечнике.

Истинная стоимость потерь в сердечнике часто недооценивается конечным пользователем. Рассмотрим, например, сердечник, потери в котором составляют 1 Вт при стоимости электроэнергии 10 центов за кВт в час. За

год непрерывной работы сердечник потратит 88 центов. Это тепло может принести пользу в Маренго, штат Иллинойс в январе, но абсолютно бесполезно в Финиксе, штат Аризона в июле. В последнем случае необходимо потратить дополнительный доллар на кондиционирование, чтобы выкачать наружу потраченную впустую энергию.

Когда размеры сердечника удваиваются, площадь поверхности увеличивается в четыре раза, а объем и потери возрастают в восемь раз. Рост температуры пропорционален отношению потерь в сердечнике к площади поверхности, то есть в больших сердечниках она больше в два раза. Сердечники с диаметром больше 3 дюймов (76,2 мм) могут потребовать принудительного воздушного охлаждения даже при умеренных уровнях потока.

Потери в сердечнике вызывают увеличение температуры обмотки. Сопротивление меди увеличивается на 0,4%/°C. Таким образом, увеличение температуры на 30°C из-за потерь в сердечнике, на 12% увеличивает потери в меди, что еще больше повышает температуру. Высокая температура сердечника также приводит к деградации изоляции обмотки и вызывает тепловые напряжения, которые могут привести к закорачиванию витков обмотки.

Большинство химических реакций примерно удваивают скорость с увеличением температуры на 10°C. Механизм старения большинства электронных компонентов зависит от температуры и, таким образом, увеличение рабочей температуры на 10°C сокращает срок службы вдвое. Растрченная впустую мощность повышает температуру внутри электронного оборудования, что приводит к снижению срока службы компонентов.

Избыточное тепло медленно окисляет и делает хрупкими паяные соединения и обугливает печатные платы. Долговременно воздействие высокой температуры на электролитические конденсаторы высушивает их и сокращает срок службы. Резисторы в условиях работы при повышенной температуре меняют свой номинал. Функционирование при повышенной температуре полупроводников приводит к перераспределению введенных в них примесей и увеличивает перетекание зарядов. Это перетекание может еще больше увеличить температуру полупроводника.

Для поддержания стабильности полупроводников при повышенной температуре окружающей среды необходимы более массивные и более дорогие радиаторы. Во многих случаях стоимость радиатора превышает экономию на сердечнике, работающем при повышенной температуре. Очень часто применение дорогих сердечников, температура которых при работе ниже, позволяет отказаться от вентилятора и снизить общую стоимость. Кажущаяся экономия в 1\$ на стоимости сердечника может обернуться потерями 100\$ если источник питания придется ремонтировать в полевых условиях.

Кривые В/Н.

На рис. 1 показана петля гистерезиса ферритового сердечника EC70/70 (3C81) без зазора производства Phillips (Ferroxcube) с обмоткой из 200 витков провода #17. Его индуктивность около 160 мГн при 90 мА. Тот же самый сердечник, но с воздушным зазором (EC70/70G) приведен на рис. 2. Напряжение возбуждения осталось неизменным, а ток значительно вырос. Индуктивность равна 4 мГн при 3,5 А и масштаб изменился. Петля гистерезиса стала значительно более линейной от введения зазора величиной 190 мил (0,48 мм), но насыщение происходит при тех же 3 кГс. Воздушный зазор, распределенный или нет, просто расширяет ось Н. Он не влияет на потери в сердечнике при одинаковых частоте и уровне потока.

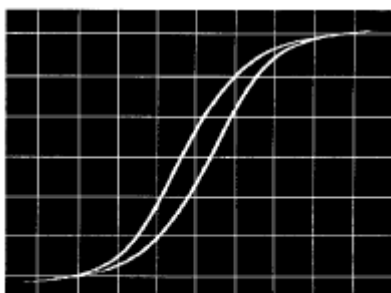


Рис. 1 EC70/70 феррит без зазора, материал 3C81, сердечник ЕЕ. Масштаб по вертикали 1кГс/дел, по горизонтали 0,5 Э/дел

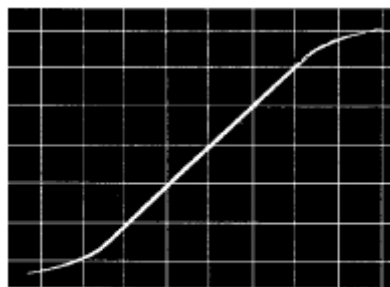


Рис. 2 Масштаб по вертикали 1кГс/дел, по горизонтали 25 Э/дел

Сердечники из МРР (Мо-пермаллоя), Super-MSS (сендаста), Hi-Flux и порошкового железа использовались для изготовления 4 мГн дросселей. Диаметр тороида был 1,84 дюйма (46,73 мм), проницаемость 60, обмотка состояла из 172 витков провода #17. На рис. 3 приведена петля гистерезиса для МРР (Мо пермаллового) сердечника. Петля гистерезиса для сердечника из порошкового железа приведена на рис. 4. Она более «массивная» по сравнению с петлей сердечника из МРР (Мо пермаллоя) и потери значительно больше. У многих видов порошкового железа существует значительное падение проницаемости при очень низких уровнях возбуждения. У используемого сердечника это падение составляло порядка 45%. Во время этого теста сердечник был очень горячим и производил неприятный звуковой шум.

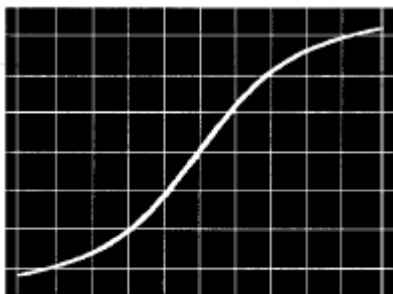


Рис. 3. МРР тороид. Масштаб по вертикали 2 кГс/дел, по горизонтали 40 Э/дел

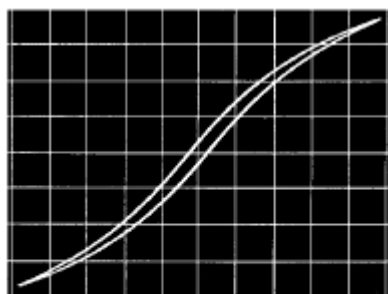


Рис. 4. Тороид из порошкового железа. Масштаб по вертикали 2 кГс/дел, по горизонтали 40 Э/дел.

На рис. 5 приведена тройная экспозиция правых половин петель гистерезиса порошковых сердечников из МРР (Мо-пермаллоя), Super-MSS (сендаста) и Hi-Flux. У сердечников из МРР (Мо-пермаллоя) и Super-MSS (сендаста) кривые почти идентичны, за исключением большего гистерезиса у МРР (Мо-пермаллоя). Насыщение этих сердечников происходит в районе 7 кГс. У порошковых сердечников из Hi-Flux гистерезис больше, чем у Super-MSS (сендаста) и насыщение происходит более плавно на уровне, большем 11 кГс. Потери для МРР (Мо-пермаллоя) и Super-MSS (сендаста) так малы, что их петли гистерезиса представляют практически прямую линию. Петлю гистерезиса Hi-Flux можно видеть, но она совсем не такая, как у порошкового железа на рис.4.

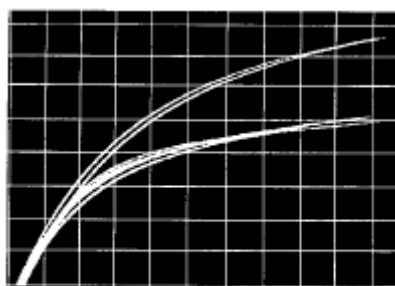


Рис. 5. Масштаб по вертикали 2 кГс/дел, по горизонтали 50 Э/дел.

Акустический шум, производимый сердечниками из порошкового железа и феррита с зазором при измерениях на частоте 1 кГц достаточно неприятный. Hi-Flux шумит на 3дБ тише, а МРР (Мо-пермаллой) и Super-MSS (сендаст) - на 6 дБ. Но даже эти сердечники могут производить раздражающий шум при работе на частоте около 3 кГц при максимальных уровнях потока.

Измерение потерь в сердечниках.

На рис. 6 приведены идеальные формы волн, соответствующие 4 мГн дросселю, введенному в насыщение прямоугольным сигналом с частотой 1 кГц. Когда ток втекает в индуктивность, запасенная в ней энергия пропорциональна значению индуктивности и квадрату тока. Когда ток уменьшается, индуктивность возвращает энергию в цепь. Энергия запасается при положительном напряжении, и ток увеличивается от нуля до максимума. Это период положительной мощности, так как энергия течет из источника в индуктивность.

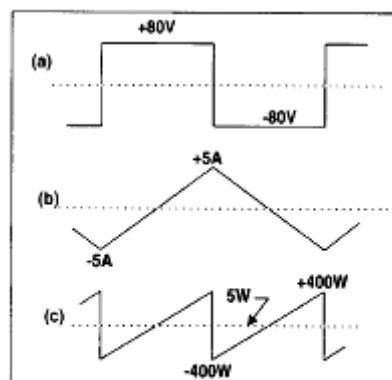


Рис. 6. Форма волны потерь в сердечнике.
(а) форма напряжения
(б) форма тока
(в) форма мощности

Когда напряжение возбуждения внезапно становится отрицательным, энергия из индуктивности возвращается в источник. Мощность становится отрицательной, так как напряжение отрицательное, а ток положительный. Когда ток переходит через ноль и становится отрицательным, энергия начинает течь в индуктивность и мощность снова становится положительной. В этой точке и ток, и напряжение отрицательные.

Когда при следующем переключении напряжения напряжение возбуждения становится положительным, мощность снова становится отрицательной и энергия из индуктивности возвращается в источник. В этом случае напряжение

положительное, а ток отрицательный. Наконец ток пересекает ноль в положительном направлении, и мощность становится положительной. Формой изменения мощности является пилообразная волна с частотой 2 кГц со смещением на 5 Вт по постоянному току из-за потерь в сердечнике. Для измерения таких малых потерь при ±400 Вт реактивной мощности необходим очень точный умножающий ваттметр.

В типовом переключаемом источнике питания удвоенная амплитуда тока пульсаций, протекающего через сглаживающий дроссель, зависит от размера применяемого сердечника. Уменьшение размеров сердечника с целью экономии средств приводит к увеличению тока пульсаций. Большой ток пульсаций вызывает большой нагрев из-за потерь на гистерезис, что делает необходимым применение конденсатора фильтра большей емкости. Наиболее экономически обоснованным является использование сердечника, обеспечивающего ток пульсаций около одной четверти от тока нагрузки.

Потери на гистерезис, вызванные током пульсации часто больше потерь в меди. Полезным показателем производительности индуктивности в переключаемом источнике питания является Q, измеренная на частоте 40 кГц. Это позволяет определить ESR индуктивности. Измерения Q были проведены для MPP (Мо-пермаллой), Super-MSS (Сендаст), Hi-Flux, порошкового железа и феррита. Уровни постоянного тока были 6, 6, 15, 13 и 3,5 А. Проницаемость порошковых сердечников равна 60. Q на частоте 40 кГц измерялась при двойной амплитуде 2А для порошковых сердечников и 1А для феррита. Сопротивление обмотки было около 0,18 Ом у порошковых сердечников и 0,28 Ом у феррита. Результаты измерений приведены в Таб.1.

Таблица 1.

Тип сердечника	Ток (А)	Выходное напряжение (В)	Выходная мощность (кВт)	Потери мощности (Вт)	Потери мощности (%)	Q (40 кГц)	ESR	Цена \$
MPP (Мо пермаллой)	6	320	1,92	11	0,6	74	14	10,97
Super-MSS (Сендаст)	6	320	1,92	16	0,8	34	30	3,02
Hi-Flux	15	800	12	157	1,3	19	56	10,68
Порошковое железо	13	693	9	131	1,5	16	64	0,64
Феррит с зазором	3,5	187	0,65	17	2,6	8	119	12,00
Феррит/лит-целатрат	3,5	187	0,65	8	1,2	100	10	13,00

Все сердечники тороидальные с диаметром 1,84 дюйма (46,7 мм), за исключением ферритового EC70/70G с зазором. Индуктивность 4,0 мГн. Ток пульсаций представляет собой треугольную волну с двойным размахом амплитуды, составляющим 33% от указанной во второй колонке таблицы.

В Таблице 2 приведены результаты сравнения сердечников для различных применений.

Таблица 2.

Тип сердечника	Обратные цепи	Сетевой фильтр	Мощные цепи	Дроссели фильтров	Прецизионные фильтры	Цена
MPP (Мо пермаллой)	Хорошо	Плохо	Плохо	Лучше всех	Хорошо	Высокая
Super-MSS (Сендаст)	Средне	Хорошо	Средне	Хорошо	Средне	Низкая
Hi-Flux	Плохо	Лучше всех	Лучше всех	Средне	Плохо	Средняя
Порошковое железо	Хуже всех	Средне	Хорошо	Хуже всех	Хуже всех	Самая низкая
Феррит/лит-целатрат	Лучше всех	Хуже всех	Хуже всех	Плохо	Лучше всех	Самая высокая