

Сердечники из распыленного железа в импульсных источниках питания



Джим Кокс

Перевод Артема Терейковского, www.ferrite.com.ua

Переменная составляющая тока в обмотке дросселя постоянного тока может оказывать существенное влияние как потери в сердечнике, так и на индуктивность вследствие изменения начальной магнитной проницаемости материала. Кривые, представленные на рис. 7 и 8, получены при условии, что амплитудная магнитная индукция не превышает 1 мТл, что обычно соответствует менее 1% переменной составляющей тока в обмотке. На рис. 3 показана зависимость потерь материала -52 от амплитудной индукции переменного магнитного поля в сердечнике.

Смесь -26 наиболее широко используется при изготовлении дросселей выходных фильтров импульсных источников питания. Тем не менее, при увеличении частоты следует отдать предпочтение материалам -8, -18 и -52 с меньшими потерями.

Большинство дросселей фильтров на выходе импульсных ИВЭП работают при максимальных значениях индукции переменного тока в сердечнике менее 100 мТл; типичное значение составляет 20 мТл. Влияние амплитудной магнитной индукции на проницаемость различных материалов показана на рис. 11. Проницаемость всех материалов увеличивается с ростом переменной индукции более 10 мТл. Наибольший рост отмечен у материалов с высокой начальной проницаемостью -26, -40 и -52.

На рис. 12 показана зависимость изменения начальной магнитной проницаемости материала -26 от уровня пульсаций в обмотке. Зависимости для материалов -40 и -52 очень похожи.

Рассмотрим несколько примеров.

ДРОССЕЛЬ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Пример 1.

Требования:

- 45 мкГн при 7.5 А;
- пульсации < 1%.

Приоритетные условия разработки:

- стоимость;
- разогрев;
- размер.

Подходящие материалы. В первую очередь рассматриваем смеси -26, -40, -52 как наиболее дешевые, поскольку в задании нет ограничений на изменение индуктивности дросселя при изменении тока в обмотке.

Накапливаемая в дросселе энергия составит:

$$\frac{1}{2} LI^2 = (\frac{1}{2})(45)(7.5)^2 = 1266 \text{ мкДж}$$

Выбор размера и формы сердечника.

В данном случае вполне подходит материал -52. Выбор кольца T106 позволяет обойтись однослойной обмоткой при перегреве менее 25 °С (рис. 7). (Рассмотрение сердечников типа E выходит за рамки данной статьи – прим. переводчика).

Определение количества витков.

Согласно кривым в верхней части рис. 7, для накопления 1266 мкДж в сердечнике T106-52 потребуется около 200 Ампер-витков. Следовательно, число витков обмотки составит:

$$N = 200/7.5 = 27 \text{ витков.}$$

По табл. 3 выбираем однослойную обмотку проводом диаметром 1.15 мм, что обеспечит перегрев менее 25 °С.

Пример 2.

Требования:

- 45 мкГн при 7.5 А;

- 60 мкГн при 0 А;
- степень насыщения < 25%;
- пульсации < 1%.

Приоритетные условия разработки:

- размер;
- разогрев;
- стоимость.

Определяем подходящие материалы. Смеси -8, -18, -28 и -33 имеют наименьшую амплитудную нелинейность проницаемости, поэтому наиболее пригодны из-за ограничения изменения индуктивности в диапазоне рабочих токов.

Накапливаемая в дросселе энергия, как и в примере 1, составит:

$$\frac{1}{2} LI^2 = (\frac{1}{2})(45)(7.5)^2 = 1266 \text{ мкДж}$$

Выбор размера и формы сердечника. Анализ кривых для разных материалов показывает, что смесь -8 в качестве материала сердечника (рис. 8) позволит использовать кольцо минимальных размеров. T94-8 обеспечивает перегрев менее 40 °С при «полной» намотке. Согласно графику в нижней части рис. 8, при накоплении 1266 мкДж сердечник T94-8 функционирует со степенью насыщения около 15%, что полностью удовлетворяет начальным условиям.

Определение количества витков. Воспользуемся следующей формулой:

$$N = \sqrt{\left[\frac{L}{(A_L)(\% \mu_0)} \right]}$$

и после подстановки значений получаем:

$$N = \sqrt{\left[\frac{45000}{(25)(0.85)} \right]} = 46 \text{ витков}$$

Так как для обеспечения перегрева кольца T94 менее 40 °С требуется «пол-

* Продолжение. Начало см. «Chip News Украина», №№ 7, 8, 2005 г.

Таблица 8. Дроссели постоянного тока

		Торoidalные сердечники: однослойная обмотка							
Постоянный ток, Ø провода	Типоразмер	1.0 А	2.5 А	5.0 А	7.5 А	10 А	15 А	20 А	30 А
		0.32 мм	0.511 мм	0.813 мм	1.02 мм	1.45 мм	1.83 мм	2.30 мм	2.91 мм
	T50-52	94 мкГн 59 витков	30.7 мкГн 37 витков	10.2 мкГн 22 витка	5.0 мкГн 16 витков	2.8 мкГн 12 витков	1.3 мкГн 8 витков	0.7 мкГн 6 витков	0.2 мкГн 3 витка
	T68-52A	250 мкГн 74 витка	81.6 мкГн 46 витков	27.6 мкГн 28 витков	16.7 мкГн 21 виток	8.3 мкГн 16 витков	4.4 мкГн 12 витков	2.1 мкГн 8 витков	0.8 мкГн 5 витков
	T90-52	680 мкГн 115 витков	224 мкГн 72 витка	74.0 мкГн 44 витка	40.9 мкГн 34 витка	23.6 мкГн 26 витков	13 мкГн 20 витков	7.3 мкГн 15 витков	3.7 мкГн 11 витков
	T106-52	1.08 мГн 118 витков	362 мкГн 74 витка	124 мкГн 46 витков	69.3 мкГн 36 витков	39.0 мкГн 27 витков	21.3 мкГн 21 виток	11.4 мкГн 15 витков	5.8 мкГн 11 витков
	T131-52	1.66 мГн 134 витка	550 мкГн 85 витков	188 мкГн 52 витка	107 мкГн 41 виток	63 мкГн 32 витка	33.3 мкГн 24 витка	18.8 мкГн 18 витков	9.2 мкГн 13 витков
	T157-52	3.32 мГн 204 витка	1.09 мГн 129 витков	380 мкГн 81 виток	213 мкГн 64 витка	127 мкГн 50 витков	69.3 мкГн 39 витков	40.1 мкГн 30 витков	21.5 мкГн 23 витка
	T184-52	5.4 мГн 202 витка	1.79 мГн 129 витков	624 мкГн 81 виток	345 мкГн 63 витка	210 мкГн 50 витков	114 мкГн 38 витков	65 мкГн 29 витков	34 мкГн 22 витка
	T250-52	14.8 мГн 270 витков	4.96 мГн 172 витка	1.72 мГн 108 витков	978 мкГн 86 витков	591 мкГн 67 витков	332 мкГн 59 витков	195 мкГн 41 виток	102 мкГн 31 виток
	T400-52	26.1 мГн 494 витка	8.69 мГн 317 витков	3.1 мГн 160 витков	1.76 мГн 157 витков	1.05 мГн 126 витков	590 мкГн 100 витков	347 мкГн 78 витков	190 мкГн 61 виток

Примечание: данная таблица предполагает уровень пульсаций менее 1%, температуру перегрева 40 °С вследствие потерь в обмотке и сердечнике. Значительные пульсации приведут к повышению температуры перегрева и индуктивности дросселя.

ная» намотка, воспользуемся табл. 9. Рекомендуемый диаметр провода составляет 1.29 мм.

Для быстрого определения диаметра провода и количества витков в зависимости от требуемой индуктивности и максимального значения постоянного тока в обмотке для сердечников из смеси -52 служит табл. 8.

ДРОССЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В последнее время все более высокие требования предъявляются к минимизации гармоник тока, потребляемого ИВЭП от сети 220/380В. С этой целью в состав даже относительно мало-мощных источников питания включают активные корректоры коэффициента мощности (ККМ).

Структурная схема типичного ККМ приведена на рис. 17.

Корректор коэффициента мощности отличается от обычного импульсного преобразователя тем, что на его входе присутствует выпрямленное, но негладженное сетевое напряжение. Задача управляющей логики ККМ (на рисунке не показана) – обеспечить такой цикл пе-

рехлючений ключа Q1, при котором вход преобразователя со стороны сети ведет себя как некоторое активное сопротивление, при этом между напряжением в сети и током, отбираемым от нее, отсутствует сдвиг фаз ($\cos \theta = 1$), в то же время на выходном конденсаторе поддерживается постоянное напряжение, как можно менее зависящее от нагрузки и напряжения сети. Расчеты потерь в сердечнике дросселя подобного преобразователя более сложны, чем в рассмотренных выше примерах, так как магнитный поток в сердечнике непрерывно меняется в течение полупериода напряжения питающей сети даже при неизменном входном напряжении и стабильной нагрузке.

Рассматриваемый ниже подход предполагает синусоидальную форму входного напряжения, постоянное выходное напряжение и фиксированную частоту преобразования ККМ и не зависит от схемы управления ККМ.

Амплитудное значение индукции в сердечнике определяется исходя из формы напряжения на дросселе по формуле:

$$\hat{B} = \frac{10^3 E \Delta T}{2NA}$$

где E – пиковое значение напряжения на дросселе (Вольт), ΔT – интервал времени (сек), N – число витков обмотки, A – сечение сердечника, (см^2).

Максимального значения \hat{B}_{max} достигается при

$$V_i = V_o/2,$$

где V_i – мгновенное значение входного напряжения, V_o – постоянное выходное напряжение.

Зависимость отношения $\hat{V}/\hat{V}_{\text{max}}$ от фазы входного напряжения при разных отношениях V_i/V_o показана на рис. 18.

При фиксированной частоте преобразования потери в сердечнике пропорциональны \hat{V}^n , где значение n находится в диапазоне 1.65...3.00 для большинства порошковых материалов, включая расплавленное железо. Отношение среднего значения потерь к максимальному (при $V_i = V_o/2$) в течение полупериода питающего напряжения для $n = 2.0, 2.5$ и 3.0 показано на рис. 19.

Из рисунка видно, что отношение средних потерь к максимальным достигает наибольшего значения при отношении амплитудного значения входного напряжения к постоянному выходному около 0.61, при этом отношение потерь незначительно изменяется от 0.672 при $n = 3$ до 0.725 при $n = 2$.

Поскольку большинство ККМ функционируют при отношении потерь, близком к максимальному, при разработке рекомендуется использовать эмпирическое правило, согласно которому при «наихудшем случае» среднее значение потерь составляет 70% значения, вычис-

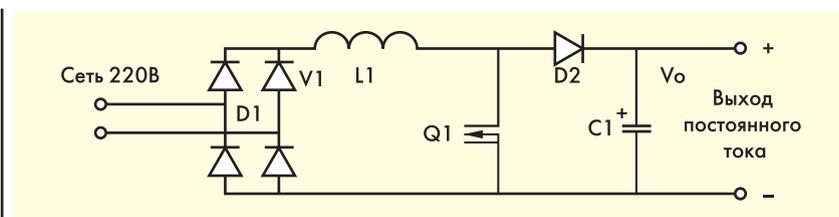


Рисунок 17 Структурная схема типичного ККМ

Таблица 9. Зависимость числа витков от диаметра провода при многослойной намотке* «Полная» намотка (заполнение внутреннего диаметра 55%)

Диаметр провода, мм	Число витков										Ампер-витки при температуре нагрева из-за потерь в обмотке			Общая рассеиваемая мощность, Вт, при температуре нагрева							
	0.32	0.404	0.511	0.643	0.813	0.912	1.02	1.15	1.29	1.45	1.63	1.83	2.05	2.3	2.6	10 °C	25 °C	40 °C	10 °C	25 °C	40 °C
Уд. сопротивление, мОм/см	2.13	1.34	0.842	0.53	0.33	0.264	0.21	0.166	0.132	0.104	0.0828	0.0651	0.0521	0.0413	0.0328						
Тип	T80	T90	T94	T106	T124	T80	T90	T94	T106	T124	T80	T90	T94	T106	T124						
Средняя длина см/вит.	2.8	3.64	3.44	4.49	3.95	2.8	3.64	3.44	4.49	3.95	2.8	3.64	3.44	4.49	3.95						
Площадь поверх., см ²	15.5	22.4	22	31	33.3	15.5	22.4	22	31	33.3	15.5	22.4	22	31	33.3						
	525	343	424	440	1080	525	343	424	440	1080	525	343	424	440	1080						
	218	141	174	180	290	218	141	174	180	290	218	141	174	180	290						
	89	89	110	114	184	89	89	110	114	184	89	89	110	114	184						
	71	57	70	73	117	71	57	70	73	117	71	57	70	73	117						
	88	71	88	91	147	88	71	88	91	147	88	71	88	91	147						
	88	70	88	91	147	88	70	88	91	147	88	70	88	91	147						
	73	58	73	75	117	73	58	73	75	117	73	58	73	75	117						
	38	30	38	40	60	38	30	38	40	60	38	30	38	40	60						
	37	29	37	38	56	37	29	37	38	56	37	29	37	38	56						
	29	23	29	29	47	29	23	29	29	47	29	23	29	29	47						
	22	18	22	23	37	22	18	22	23	37	22	18	22	23	37						
	18	14	18	18	30	18	14	18	18	30	18	14	18	18	30						
	14	11	14	14	23	14	11	14	14	23	14	11	14	14	23						
	11	9	11	11	19	11	9	11	11	19	11	9	11	11	19						
	9	7	9	9	15	9	7	9	9	15	9	7	9	9	15						

* Табл. 8 является дополнением табл. 4 (см. №7 «Chip News Украина», 2005 г.).

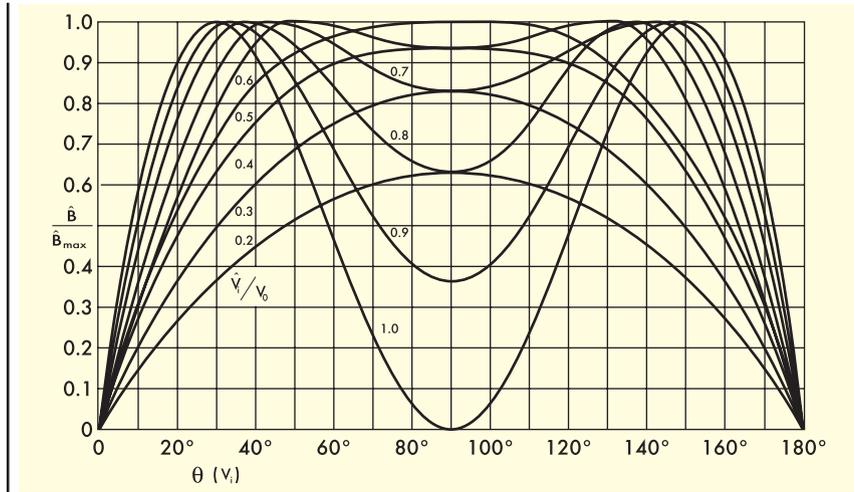


Рисунок 18 Зависимость отношения индукции в сердечнике дросселя ККМ от фазы входного напряжения

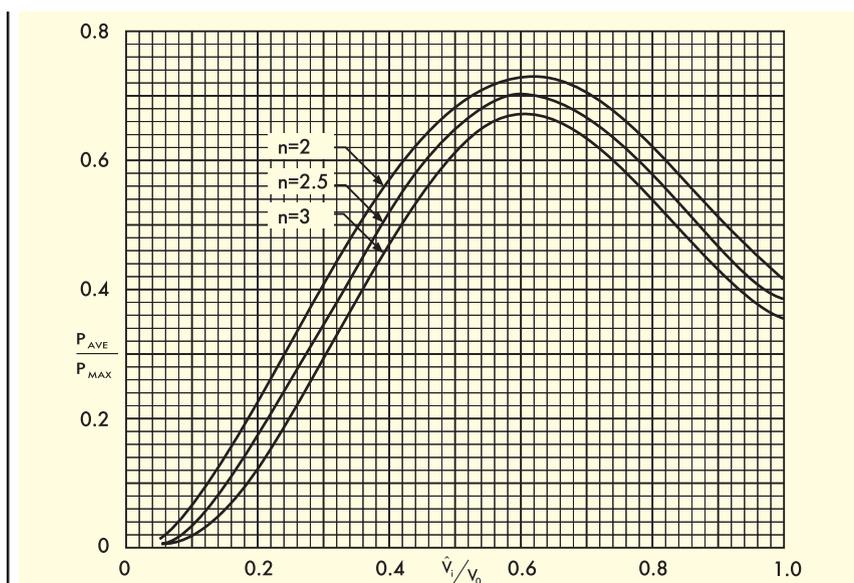


Рисунок 19 Зависимость относительного уровня потерь от нормализованного входного напряжения

ленного при $V_1 = V_0/2$. Амплитудная индукция в сердечнике определяется как:

$$\vec{B} = \frac{10^8 V_0}{8NAf}$$

где f – частота переключения преобразователя.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ

Производители магнитных материалов обычно приводят уравнение Штейнмеца для определения потерь в сердечниках:

$$P_{серд} = k f^x \Delta B^y$$

В этой формуле потери выражаются в мВт/см³, частота в кГц, индукция в сер-

дечнике – в Тесла. Коэффициенты Штейнмеца k , x и y подбираются для наилучшего соответствия результатам измерений. К сожалению, использование этого уравнения дает корректный результат только в ограниченных диапазонах рабочей частоты и плотности магнитного потока в сердечнике. Поэтому производители обычно указывают несколько наборов коэффициентов для соответствующих диапазонов. Однако, как показано в [1], это может привести к значительным несоответствиям при определении потерь на границах диапазонов.

Совокупные потери в сердечнике равны сумме потерь на перемагничивание и потерь на вихревые токи. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату амплитудного значения магнитного потока и квадрату рабочей частоты.

Потери на перемагничивание зависят от частоты линейно, но соотношение между составляющими потерь изменяется в зависимости от плотности магнитного потока и материала сердечника.

Бозорт в работе [2] доказал, что потери на перемагничивание для распыленного железа пропорциональны B^3 при очень малых значениях индукции и $B^{1.6}$ при больших значениях B . При изменении индукции экспонента плавно меняется в диапазоне 1.6...3. Эти изменения экспоненты определяются реакцией стенок магнитных доменов материала на изменение внешнего магнитного поля. При слабых магнитных полях стенки доменов постепенно смещаются, но остаются «привязанными» к различным дефектам и неоднородностям кристаллической решетки. С ростом напряженности поля возрастает энергия домена и происходит скачкообразное преодоление дефекта решетки. В сильных магнитных полях материал достигает насыщения; диполи ориентируются вдоль силовых линий поля и дальнейшего роста намагниченности не происходит.

Если считать, что потери на перемагничивание ограничены тремя прямыми линиями, как показано в верхней части рис. 20, тогда кривая потерь определяется как обратное значение суммы обратных величин уравнений, описывающих данные прямые:

$$P_h = \frac{f}{\frac{a}{B^3} + \frac{b}{B^{2.3}} + \frac{c}{B^{1.65}}}$$

Потери на вихревые токи:

$$P_e = d f^2 B^2$$

Совокупные потери в сердечнике:

$$P_{core} = \frac{f}{\frac{a}{B^3} + \frac{b}{B^{2.3}} + \frac{c}{B^{1.65}}} + d f^2 B^2$$

Модель, описываемая этим уравнением, известна как модель Оливера. Для максимальных значений индукции выбрано значение экспоненты 1.65 вместо 1.6 как наиболее точно подходящее для распыленного железа. Значения экспонент для минимальных и промежуточных значений индукции также оптимальны для всех типов распыленного железа, производимого фирмой Micrometals, изменяются только значения коэффициентов a , b и c .

В нижней части рис. 20 приведены кривые потерь на перемагничивание, вихревые токи и совокупных потерь смеси -52 на частоте 100 кГц.

Сравнение результатов измерений потерь на примере кольца T106-52 с ве-

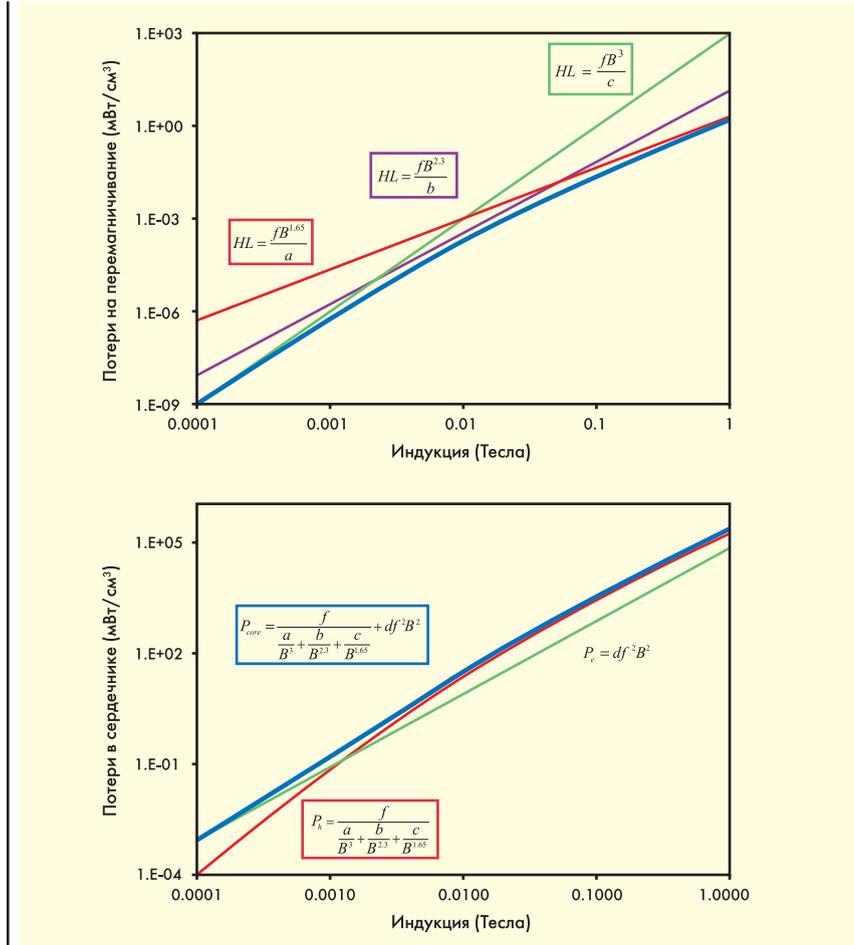


Рисунок 20 Составляющие потерь распыленного железа

Таблица 10. Коэффициенты для уравнения Оливера

Материал	a	b	c	d
Micrometals -52	1.0*10-6	6.94*10-5	5.27*10-4	6.9

личинами, полученными при помощи уравнений Штейнмеца и Оливера в диапазоне от 60 Гц до 500 кГц, показало, что средняя погрешность модели Оливера не превышает 4.9%, в то время как средняя погрешность при использовании модели Штейнмеца достигает 20%. При расчетах в уравнение Оливера подставлялись коэффициенты из табл. 10.

Наибольшую погрешность модель Штейнмеца дает при малых значениях индукции и потерь в сердечнике, поскольку изначально была оптимизирована для потерь, превышающих 10 мВт/см³.

Будучи более точной, модель Оливера позволяет определить взнос каждой составляющей в совокупные потери и корректно рассчитывать индуктивные элементы, работающие в предельных режимах.

Как видно из рис. 20, отношение между составляющими потерь меняется в зависимости от индукции в сердечнике на заданной частоте. Характерно,

что при минимальных значениях индукции преобладают потери на вихревые токи. Имея возможность экстраполировать вплоть до очень малых значений индукции, мы можем определить точные значения коэффициентов модели Оливера. Для этого нам потребуется измерить коэффициент Q при помощи прецизионного LCR-измерителя. Реальные потери в сердечнике вычисляются из следующего уравнения:

$$Q = \frac{V_{ex} I_{ex}}{(\text{Потери в обмотке}) + (\text{Потери в сердечнике})}$$

Если измерения коэффициента Q произведены при достаточно высоких частотах и низких значениях индукции, при которых преобладают потери на вихревые токи, можно определить значение коэффициента d модели Оливера.

Воспользуемся сердечником T106-52 с обмоткой из 100 витков. Индукция в сердечнике ограничена на уровне 0.01 мТл,

сопротивление обмотки переменному току на частоте 100 кГц составляет 0.74 Ом. При $V_{\text{вх}} = 29$ мВ, $I_{\text{вх}} = 0.049$ мА и $Q = 45.5$ потери в сердечнике составляют $2.99 \cdot 10^{-8}$ Вт. Пересчитав потери в удельное значение в мВт/см³, получаем коэффициент d , равный 6.9. Примечательно, что при этих значениях индукции и частоты потери на вихревые токи составляют до 99% совокупных потерь смеси -52.

Остальные коэффициенты могут быть получены по принципу наилучшего соответствия из результатов точных измерений на низких частотах.

Другое преимущество модели Оливера заключается в том, что для всех значений рабочих частот и индукции в сердечнике используется один и тот же набор коэффициентов.

Хотя модель Оливера разработана специально для распыленного железа, подобная методика применима для других магнитодиэлектриков, таких, как альсифер (Kool Mu, SuperMSS), молипремаллой (MPP), и для ферритов. В каждом случае следует уточнить формулу определения потерь на перемагничивание для наиболее полного соответствия свойствам конкретного материала.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА РАЗРАБОТЧИКА

- Температура окружающей среды накладывает ограничения на допустимый перегрев сердечника. Начните проект при одинаковых значениях потерь в обмотке и сердечнике. Постарайтесь закончить его так, чтобы расчетные потери в сердечнике оказались меньше потерь в обмотке, поскольку отвести тепло от обмотки значительно легче, чем от сердечника.
- Используйте предлагаемую фирмой Micrometals бесплатную программу для расчета индуктивных элементов (см. www.micrometals.com). Она поможет оценить продолжительность безопасного функционирования сердечника в заданных условиях, учитывающих явление термического старения, описанного выше.
- Если устройство позволяет использовать вентилятор для отвода тепла, постарайтесь устанавливать вентилятор с постоянной скоростью вращения. В большинстве случаев потери в сердечнике не зависят от мощности на выходе импульсного источника питания.

РЕЗЮМЕ

Распыленное железо в течение нескольких десятилетий используется в радиоэлектронной аппаратуре промышленного и бытового назначения. Чаще всего сердечники из распыленного железа применяются в дросселях фильтров с большими токами смещения/подмагничивания, дросселях электронных балластов ламп дневного света, помехоподавляющих дросселях, дросселях корректоров коэффициента мощности (ККМ) и DC-DC преобразователей, работающих в непрерывном режиме. Распыленное железо является самым дешевым из порошковых материалов с высокой индукцией насыщения, благодаря чему его применение во многих случаях оказывается экономически более эффективным, чем применение молипремаллой (MPP), альсифера (KoolMu, SuperMSS) или материала HiFlux.

Литература:

- [1] Ridley, R and Art Nace. «Modeling Ferrite Core Losses». *Switching Power Magazine*. Winter 2002: 8-9.
- [2] Bozorth, Richard M., *Ferromagnetism*. Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc. 1951.