

Применение кольцевых сердечников с зазором фирмы Ferroxcube

Николай САГАЙДАКОВ
cni@dialectrolux.ru

Для изготовления силовых индуктивных элементов наиболее часто применяются сердечники с распределенным зазором на основе железа и порошковых материалов. Приведем состав некоторых из них.

- **Трансформаторное железо** имеет самую большую индукцию насыщения.
 - Состав: железо (Fe) = 100%.
 - Проницаемость: до 90.
- **Molibdenum Permalloy Powder (MPP)** — порошковый прессованный материал на основе пермаллоя с примесью молибдена. По удельным потерям он наиболее близок к ферритам.
 - Состав: никель (Ni) = 80%, железо (Fe) с небольшой примесью молибдена (Mo) = 20%.
 - Проницаемость: до 550 (за счет высокой собственной проницаемости пермаллоя).
- **High Flux** имеет самую большую индукцию насыщения из всех сплавов.
 - Состав: никель (Ni) = 50%, железо (Fe) = 50%.
 - Проницаемость: до 160.

Главной причиной невозможности применения тороидальных сердечников из феррита без зазора в силовых индуктивных элементах (СИЭ) является низкое значение постоянного тока насыщения. Для пояснения вышесказанного рассмотрим пример.

Исходные данные: индуктивность дросселя 20 мкГн, ток 1 А.

Определим типоразмер ферритового сердечника без зазора, обеспечивающий работу в заданных условиях.

Максимальная индукция для ферритового сердечника определяется формулой:

$$B \text{ [мТл]} = 1000 \times \mu_0 \times \mu_e \times (I \times N) / l_e, \quad (1)$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума $1,257 \times 10^{-3}$ мкГн/мм; μ_e — относительная магнитная проницаемость сердечника; I — ток через обмотку (А); N — число витков; l_e — средняя длина магнитной линии (мм).

После преобразования формулы (1) получим выражение для определения средней длины магнитной линии, что необходимо для выбора сердечника:

$$l_e \text{ [мм]} = 1000 \times \mu_0 \times \mu_e \times (I \times N) / B. \quad (2)$$

Здесь размерность использованных величин такая же, как и в формуле (1).

Принимаем, что $N = 5$ витков, $B = 300$ мТл (усредненное значение максимальной индукции для силовых ферритов), $\mu_e = 2200$ (эффективная проницаемость ферритовых кольцевых сердечников из материала N87). Используя формулу (2), получаем значение средней длины магнитной линии $l_e = 46$ 090 мм, что явно превышает разумные значения. Выход в данном случае один — уменьшение относительной проницаемости сердечника с помощью воздушного зазора. Если

в разъемных сердечниках воздушный зазор можно получить с помощью прокладки соответствующей толщины между отдельными частями сердечника, то в кольцевом ферритовом необходимо делать пропи́л с помощью специального технологического оборудования.

Параметры стандартных кольцевых сердечников с зазором фирмы Ferroxcube

Фирма Ferroxcube представляет линейку кольцевых ферритовых сердечников с зазором (табл. 1, 2, 3, рис. 1).

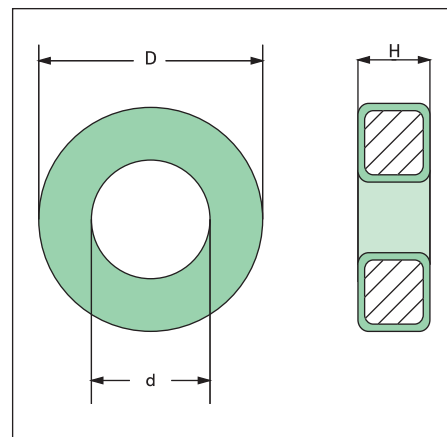


Рис. 1. Внешний вид тороидального сердечника с зазором

Таблица 1. Основные параметры кольцевых сердечников с зазором фирмы Ferroxcube

Тип сердечника	Потери в сердечнике (Вт) при		
	В (мТл) при H = 1200 А/м f = 10 кГц T = 100 °С	f = 100 кГц B = 100 мТл T = 100 °С	f = 100 кГц B = 200 мТл T = 100 °С
TN13/7.5/5	≤400	≤0,033	≤0,22
TN17/11/6.4		≤0,070	≤0,47
TN20/10/6.4		≤0,12	≤0,80
TN23/14/7.5		≤0,16	≤1,1
TN26/15/11		≤0,33	≤2,2

Таблица 2. Габаритные размеры кольцевых сердечников с зазором фирмы Ferroxcube

Тип сердечника	Размеры, мм			Эффективные параметры сердечника					
	Внешний диаметр D, мм	Внутренний диаметр d, мм	Высота H, мм	Постоянная сердечника $\Sigma I/A$, мм ⁻¹	Эффективный объем V_e , мм ³	Эффективная длина l_e , мм	Эффективная площадь сечения A_e , мм ²	Масса, г	Напряжение изоляции, В
TN13/7.5/5	13±0,35	6,6±0,35	5,4±0,3	2,46	368	30,1	12,2	≈1,8	1500
TN17/11/6.4	17,5±0,5	9,9±0,5	6,85±0,35	2,24	787	42,0	18,7	≈3,7	1500
TN20/10/6.4	20,6±0,6	9,2±0,4	6,85±0,35	1,43	1330	43,6	30,5	≈6,9	2000
TN23/14/7.5	24,0±0,7	13,0±0,6	8,1±0,45	1,69	1845	55,8	33,1	≈9,0	2000
TN26/15/11	26,8±0,7	13,5±0,6	11,6±0,5	0,982	3700	60,1	61,5	≈19	2000

Таблица 3. Эффективная проницаемость кольцевых сердечников с зазором в зависимости от типоразмера и ширины зазора

Тип сердечника	A_L , нГн	Эффективная проницаемость
TN13/5-3C20-A40	40±15%	90
TN13/5-3C20-A56	56±15%	125
TN13/5-3C20-A67	67±15%	147
TN13/5-3C20-A72	72±15%	160
TN13/5-3C20-A79	79±15%	173
TN20/6.4-3C20-A68	68±15%	125
TN20/6.4-3C20-A81	81±15%	147
TN20/6.4-3C20-A87	87±15%	160
TN20/6.4-3C20-A96	96±15%	173
TN20/6.4-3C20-A109	109±15%	200
TN26/11-3C20-A113	113±15%	90
TN26/11-3C20-A157	157±15%	125
TN26/11-3C20-A185	185±15%	147
TN26/11-3C20-A201	201±15%	160
TN26/11-3C20-A217	217±15%	173
TN17/6.4-3C20-A52	52±15%	90
TN17/6.4-3C20-A72	72±15%	125
TN17/6.4-3C20-A88	88±15%	147
TN17/6.4-3C20-A92	92±15%	160
TN17/6.4-3C20-A104	104±15%	173
TN23/7.5-3C20-A65	65±15%	90
TN23/7.5-3C20-A90	90±15%	125
TN23/7.5-3C20-A106	106±15%	147
TN23/7.5-3C20-A115	115±15%	160
TN23/7.5-3C20-A124	124±15%	173

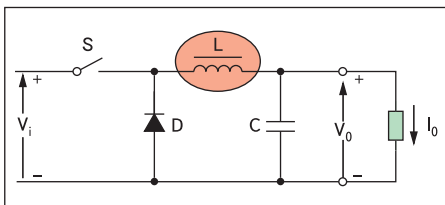


Рис. 2. Функциональная схема однофазного прямоходового DC/DC-преобразователя

По аналогии с примером, рассмотренным выше, рассчитаем выходной дроссель однофазного прямоходового DC/DC-преобразователя (рис. 2).

Задача 1: выбрать сердечник с зазором для выходного дросселя $L \geq 20$ мкГн, уменьшение индуктивности при токе $I_L = 1$ А должно быть не более 10%.

Выбор начинаем с минимального по размерам сердечника и минимального значения A_L .

$$n = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(20000/40)} = 22,36 \rightarrow \rightarrow 23 \text{ витка} \rightarrow n \cdot I = 23 \text{ А} \cdot \text{виток}.$$

Кривые, приведенные на рис. 3, подтверждают, что сердечник не насыщается, изменение индуктивности составляет менее 10%, что удовлетворяет заданным условиям.

Определим, какой максимальный ток может протекать через обмотку дросселя при заданном количестве витков и изменении индуктивности:

- по графику определим число ампер-витков (70), обеспечивающее снижение индуктивности не более 10%.

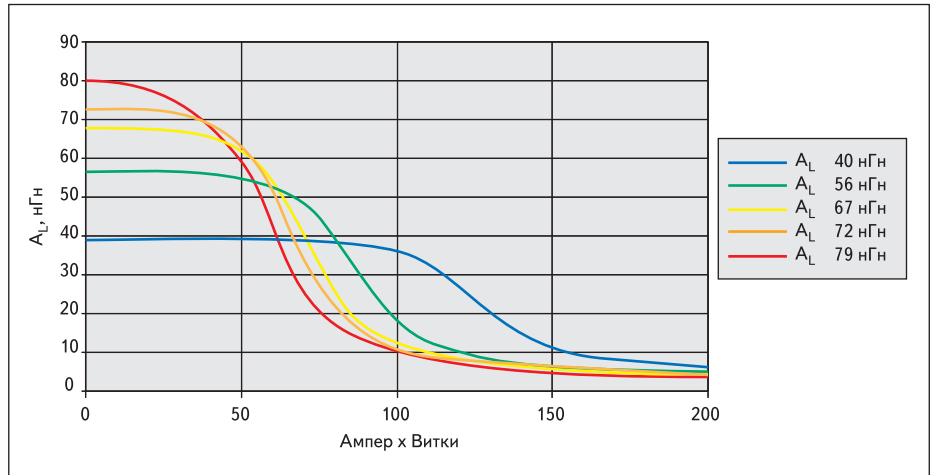


Рис. 3. Графики функции $A_L = f(I_{DC})$ для стандартных типов сердечников с зазором TN13/5-3C20

- максимальный ток $I_{max} = 70/I_L = 70/23 \approx 3$ А. Так как получился достаточно большой запас по току, можно уменьшить число витков за счет увеличения параметра сердечника A_L (уменьшения зазора).
Выбираем сердечник TN13/5-3C20-A79, у которого $A_L = 79$ нГн.

$$n = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(20000/79)} = 15,9 \rightarrow \rightarrow 16 \text{ витков} \rightarrow n \cdot I = 16 \text{ А} \cdot \text{виток}.$$

Кривые, приведенные на рис. 3, подтверждают, что сердечник не насыщается, изменение индуктивности составляет менее 10%, что удовлетворяет заданным условиям.

Сравним среднюю длину магнитной линии для кольцевого сердечника с зазором и без зазора:

- с зазором $l_g = 30,1$ мм;
- без зазора $l_g = 46$ 090 мм;

Далее сравним варианты решения одной и той же задачи расчета СИЭ на материале с распределенным зазором. Для этого используем кольцевые сердечники из материала Kool Mu фирмы Magnetics.

Задача 2: выбрать сердечник с зазором для выходного дросселя $L \geq 20$ мкГн, при этом уменьшение индуктивности при токе $I_L = 1$ А должно быть не более 10%.

Начнем с сердечника, наиболее соответствующего TN13/5-3C20 по габаритным размерам — 77050, проницаемость материала 125, $A_L = 56$ нГн, $l_g = 31,2$ мм, габаритные размеры $12,7 \times 7,62 \times 4,75$ (внешний диаметр × внутренний диаметр × высота).

$$n = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(20000/56)} = 18,89 \rightarrow 19 \text{ витков}$$

Находим напряженность магнитного поля по формуле

$$H [A/M] = (I \times n) / l_g, \quad (3)$$

$$H = (1 \times 19) / (31,2 \times 10^{-3}) = 608,97 \text{ А/М} = 7,65 \text{ Э}.$$

По графику, приведенному на рис. 4, найдем уменьшение индуктивности при заданном токе: изменение составляет примерно 8%, что удовлетворяет заданным условиям.

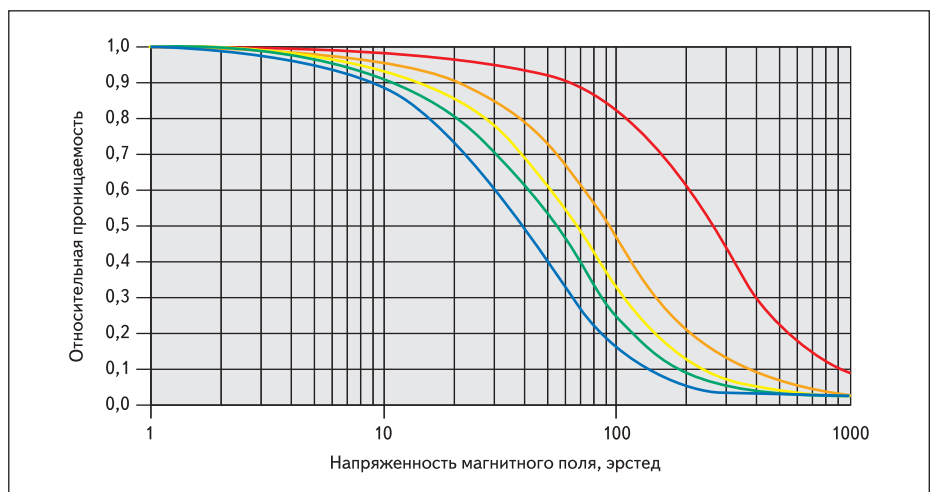


Рис. 4. График зависимости проницаемости материала Kool Mu от напряженности магнитного поля, создаваемого постоянным током

Теперь проверим, можно ли использовать сердечник из материала с распределенным зазором меньших размеров.

Используем сердечник 77130 со следующими параметрами: проницаемость материала 125, $A_L = 53$ нГн, $l_c = 26,9$ мм, габаритные размеры $11,2 \times 6,35 \times 3,96$ (внешний диаметр \times внутренний диаметр \times высота).

$$n = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(20000/53)} = 19,4 \rightarrow 20 \text{ витков.}$$

По формуле (3) находим напряженность магнитного поля:

$$H = 743,49 \text{ А/м} = 9,34 \text{ Э.}$$

По графику на рис. 4 определяем, что уменьшение индуктивности составляет примерно 10%.

Используем сердечник меньшего размера 77040 с параметрами: проницаемость материала 125, $A_L = 66$ нГн, $l_c = 23,8$ мм, габаритные размеры $10,2 \times 5,08 \times 3,96$ (внешний диаметр \times внутренний диаметр \times высота).

$$n = \sqrt{L/A_L} = \sqrt{(20000/66)} = 17,4 \rightarrow 18 \text{ витков.}$$

По формуле (3) находим напряженность магнитного поля

$$H = 756,3 \text{ А/м} = 9,5 \text{ Э.}$$

По графику на рис. 4 определяем, что уменьшение индуктивности составляет примерно 12%, что превышает заданные пределы.

Определим, каким проводом можно намотать обмотку в один слой на сердечниках TN13/5-3C20-A79 и 77130, исходя из допустимого значения плотности тока.

Диаметр провода по изоляции $D_{\text{пр.из}}$ рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{пр.из}} = k \times D_{\text{внутр}} \times \sin(360/n) / [2 \times (1 + \sin(360/n))], \quad (4)$$

где $k = 0,8 \dots 0,82$.

Диаметр провода по меди $D_{\text{пр}}$:

$$D_{\text{пр}} \approx (D_{\text{пр.из}} - 0,025) / 1,079. \quad (5)$$

Для сердечника TN13/5-3C20-A79 по формулам (4) и (5) получаем:

$$D_{\text{пр}} \times 0,63 \text{ мм} \rightarrow \\ \rightarrow \text{из стандартного ряда } 0,63 \text{ мм,} \\ S_{\text{сеч}} = 0,3116 \text{ мм}^2.$$

Для сердечника 77130 по формулам (4) и (5) получаем:

$$D_{\text{пр}} \times 0,59 \text{ мм} \rightarrow \\ \rightarrow \text{из стандартного ряда } 0,56 \text{ мм,} \\ S_{\text{сеч}} = 0,2462 \text{ мм}^2.$$

Вычислим плотность тока в обмотках СИЭ:

$$J [\text{А/мм}^2] = I/S_{\text{сеч}}.$$

Для TN13/5-3C20-A79 $J = 3,2 \text{ А/мм}^2$.

Для 77130 $J = 4,1 \text{ А/мм}^2$, следовательно, обмотка на сердечнике 77130 будет больше нагреваться.

Заключение

Приведенные выше соображения и расчеты позволяют сделать вывод, что для приложений, где габаритные размеры играют определяющую роль, лучше всего использовать материалы сердечников с распределенным зазором. В тех случаях, когда главным критерием выбора являются малые потери и низкая себестоимость СИЭ, лучше использовать кольцевые сердечники с зазором фирмы Ferroxcube. ■

Литература

1. Gapped ferrite toroids core for power inductors. Technical note. www.ferroxcube.com
2. 2006a Powder Core Data Magnetics Catalogue. www.mag-inc.com
3. Кузнецов А. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания // Схемотехника. 2000. № 1.