



Ферриты являются ключевыми компонентами современных источников питания. Благодаря программному обеспечению расчёт магнитных характеристик ферритов значительно упрощается

## РАЗРАБОТКА ФЕРРИТОВ СТАЛА ПРОЩЕ

До настоящего времени расчет магнитных характеристик индуктивных компонентов был весьма сложным. Благодаря разработанным компанией EPCOS новым программным средствам процесс разработки ферритов стал достаточно легкой задачей.

Ферритовые материалы компании EPCOS, такие как N27, N67, N41 и N87, широко используются в трансформаторах и дросселях, применяемых в импульсных источниках питания. Из этих материалов изготавливаются сердечники различных форм, например, броневые сердечники, RM- и E/U-сердечники. Для RM- и броневых сердечников обычно нормируется разброс коэффициента индуктивного сопротивления  $A_L$ , составляющий от 3 до 10%, а для E-сердечников — допуск на зазор.

### Расчет индуктивности

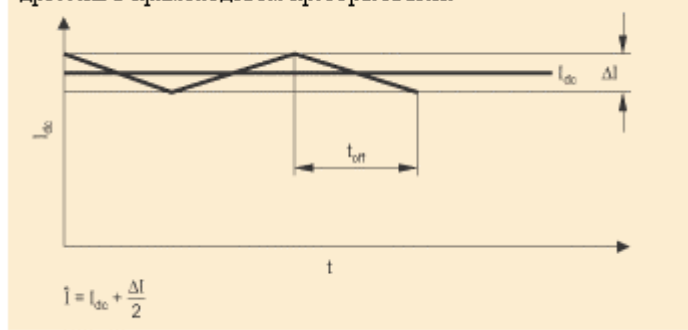
Типичная временная диаграмма тока нагрузки, протекающего через дроссель в прямоходовом преобразователе (рис. 2), приведена на рис. 1. Для снижения напряжения пульсаций до требуемого уровня необходимо иметь соответствующую величину LC. Фактически эту величину можно получить при различном сочетании значений L и C, однако при их выборе необходимо принять во внимание некоторые практические соображения. Для минимизации пульсаций напряжения индуктивность дросселя должна быть как можно больше, а для получения быстрой реакции на изменения нагрузки — как можно меньше. Кроме того, большие значения индуктивности L приводят к увеличению габаритов и повышению стоимости дросселя, так что экономически выгоднее сводить L к минимуму и увеличивать C. При постоянной нагрузке максимальное общее изменение тока нагрузки должно иметь одно и то же значение как при открытом (on), так и при закрытом ключе (off). Таким образом, необходимая величина индуктивности для заданного значения произведения  $LO^2$  (O — пиковый ток), соответствующего накопленной энергии, может быть вычислена по следующей формуле:

$$L = \frac{V_0 t_{off}}{\Delta I} \quad (t \text{ в мкс, } I \text{ в мА}) \quad (1)$$

Это значение индуктивности L должно вычисляться с учетом всех возможных рабочих режимов источника питания. Накопленная дросселем энергия равна произведению индуктивности на квадрат пикового тока. Подобный подход весьма полезен при выборе размеров сердечника и воздушного зазора. Поскольку индуктивность обычно задается в мкГн или мГн, то  $LO^2$  измеряется в микроджоулях или миллиджоулях. Пиковый ток O рассчитывается следующим образом (см. также (1)):

$$\hat{I} = I_{dc} + \frac{\Delta I}{2} \quad (2)$$

**1** Временная диаграмма тока нагрузки, протекающего через дроссель в прямоходовом преобразователе



**1** При большой величине LC напряжение пульсаций минимально

### Расчет размеров сердечника и воздушного зазора

После того как получено значение произведения  $LO^2$ , необходимо определить соответствующие размеры сердечника и воздушного зазора. Но сначала следует рассмотреть основное уравнение для индуктивности:

$$L = N \frac{\Phi}{i} \quad (3)$$

где  $N$  — число витков,  $i$  — мгновенное значение тока,  $\Phi$  — общий магнитный поток.

После преобразования и умножения обеих сторон уравнения на мгновенное значение тока получаем:

$$Li^2 = Ni\Phi$$

Если вместо  $\Phi$  подставить  $B_{\max} A_e$  ( $A_e$  — площадь центрального стержня сердечника), а вместо мгновенного значения тока — пиковый ток  $O$ , то мы получим следующее выражение для произведения  $LO^2$ , характеризующего накопленную энергию:

$$LO^2 = NOB_{\max} A_e$$

Произведение  $NO$  на данном этапе еще неизвестно, но его можно заменить на  $NI_e$ , где  $N$  — напряженность магнитного поля, а  $I_e$  — эффективная длина магнитного пути сердечника. Напряженность магнитного поля  $N$  — это отношение магнитной индукции  $B_{\max}$  и магнитной проницаемости. После подстановки получаем:

$$LI^2 = \frac{B_{\max} A_e I_e}{\mu_0 \mu_e} \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 0.4\pi 10^{-6}$  — эффективная магнитная проницаемость, а  $\mu_e$  — эффективная магнитная проницаемость. Эффективный объем  $V_e$  сердечника равен произведению длины магнитного пути на эффективную площадь сечения.

Приведенное выше уравнение непосредственно не содержит параметров, определяющих величину требуемого воздушного зазора, но можно без труда заметить, что наличие  $\mu_e$  в данном уравнении как раз и означает, что сердечник имеет воздушный зазор. Теперь у нас есть достаточная информация, чтобы определить, может ли данный сердечник накапливать необходимую энергию.

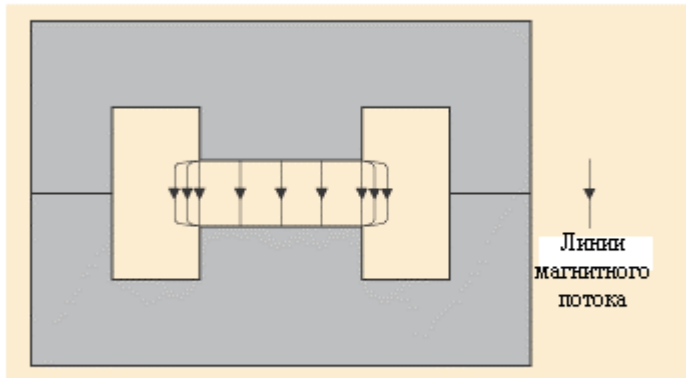
Максимальная магнитная индукция  $B_{\max}$  большинства магнитных материалов для силовых применений составляет 300 мТл, но для некоторых материалов она может составлять от 200 до 250 мТл.

Иногда коэффициент индуктивного сопротивления или эффективная проницаемость не приводится в справочных данных, предоставляемых производителем. В таком случае эти параметры необходимо рассчитать, принимая во внимание краевое искажение магнитного потока, описываемое далее. Альтернативой этим вычислениям является использование Magnetic Design Tool, программы с широкими возможностями, в которой учитывается и краевое искажение потока. Программу можно загрузить с корпоративного Web-сайта компании EPCOS ([www.epcos.com/tools](http://www.epcos.com/tools)).

Как показано на рисунке **3**, линии магнитного потока выходят за область зазора, таким образом, эффективная площадь зазора возрастает. Другими словами, площадь центрального стержня

сердечника меньше, чем эффективная площадь зазора. Данный эффект следует учитывать при расчете эффективной проницаемости, поэтому для сердечников с зазором при водится значение  $A_L$ . Чем больше зазор, тем больше область искажения поля в зазоре.

### 3 Поперечное сечение двойного Е-сердечника



Линии магнитного потока выходят за область зазора. Другими словами, площадь центрального стержня сердечника меньше, чем эффективная площадь зазора

По этой причине вводится корректирующий коэффициент  $F$ , называемый краевым коэффициентом:

$$F = 1 + \frac{I_g}{\sqrt{A_e}} \log_e \frac{2B_w}{I_g} \quad (5)$$

где  $I_g$  — величина воздушного зазора,  $A_e$  — площадь центрального стержня сердечника,  $B_w$  — ширина катушки.

Используя выражения для магнитного сопротивления сердечникам воздушного зазора, можно получить эффективную проницаемость  $\mu_e$  следующим образом:

$$\mu_e = \frac{\mu_0 A_e}{\frac{I_e}{\mu_i} + \frac{I_g}{F}} \quad (6)$$

Коэффициент индуктивного сопротивления  $A_L$  для заданного зазора равен:

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_e}{\frac{I_e}{A_e}} \quad (7)$$

После подстановки выражения для  $\mu_e$  получаем:

$$A_L = \frac{\mu_0 A_e}{\frac{I_e}{\mu_i} + \frac{I_g}{F}} \quad (8)$$

#### Пример

Необходимо вычислить  $LO^2$  для сердечника E42x21x20 (B66329-G1000-X127), изготовленного из материала N27, с общим воздушным зазором 2мм. В справочных данных на ферриты приведены следующие параметры сердечника:

$$\begin{aligned} I_e &= 97 \text{ мм} \\ A_e &= 240 \text{ мм}^2 \\ I_g &= 2 \text{ мм} \end{aligned}$$

### Решение

1. Вычисляем краевой коэффициент  $F = 1.42$  (уравнение 5)
2. Вычисляем  $\mu_e = 68$  (уравнение 6)
3. Вычисляем  $A_L = 208$  (уравнение 8)
4. Вычисляем  $LO^2 = 16.60$  (уравнение 4)

Магнитная индукция  $B$  предполагается равной 300 мТл.

Искажение магнитного потока можно уменьшить путем введения в воздушный зазор прокладки, изготовленной из разработанного компанией EPCOS материала FPC (**Ferrite Polymer Composite** — ферритполимерный композит).

### Расчет потерь в обмотке

Зная  $LO^2$ , можно вычислить омическое сопротивление обмотки и соответствующие потери в меди. Для упрощения можно пренебречь скин-эффектом, который, тем не менее, учитывается в расчетах при использовании программы Magnetic Design Tool.

Если также предположить, что  $I_{dc}$  и  $O$  отличаются незначительно (при небольшом уровне пульсаций), то можно получить несложное уравнение, связывающее значение  $LO^2$  с потерями в меди  $P_{cu}$ :

$$P_{cu} = I_{dc}^2 R_{dc} \sim O^2 N^2 A_R$$

где  $N$  — это число витков, а  $A_R = R_{dc}/N^2$  — коэффициент сопротивления, который для всех каркасов катушек компании EPCOS приводится при коэффициенте заполнения медной обмотки 0.5.

Если вместо  $N^2$  подставить  $L/A_L$ , получим уравнение, связывающее  $A_L$  и  $A_R$ :

$$P_{cu} = L I^2 \frac{A_R}{A_L} \quad (9)$$

Если известно тепловое сопротивление  $R_{th}$ , то можно рассчитать повышение температуры. Для сердечника E42x21x20 значение  $R_{th}$  составляет 15 К/Вт. Изменение температуры  $\Delta\theta$  равно  $R_{cu} R_{th}$ .

В таблице 4 представлены типовые значения параметров сердечников с зазором, выпускаемых компанией EPCOS, при величине магнитной индукции 250 мТл. Данные приводятся для сердечников E42x21x20, изготовленных из материала N27, с каркасами катушек B66423-A1018-T1. Эти сердечники имеют коэффициент сопротивления  $A_R = 20$  мкОм и тепловое сопротивление  $R_{th} = 15$  К/Вт.

### 4 Типовые значения параметров для E42x21x20

Код заказа	Зазор [мм]	$A_L$ [нГн]	$\mu_e$	$LO^2$ [мДж]	$P_{cu}$ [Вт]	$\Delta\theta$ [К]
B663329-G250-X127	0.25	339	1038	3.32	0.064	0.96
B663329-G500-X127	0.50	201	616	5.6	0.18	2.70
B663329-G1000-X127	1.00	116	355	9.7	0.564	8.20
B663329-G1500-X127	1.50	86	263	13.00	0.99	14.85
B663329-G2000-X127	2.00	68	208	16.60	1.6	24

Данная таблица дает представление о возможностях сердечников E42x21x20. К примеру, не имеет смысла применять подобные сердечники при значении  $LO^2$  менее 10 мДж, так как в этом случае величина  $A_L$  превысит 300 нГн. В такой ситуации следует выбирать сердечник меньшего объема, например E42x21x15. Для ускорения разработки можно легко составить подобные списки параметров для наиболее распространенных сердечников E и RM при помощи программ, работающих с электронными

таблицами. Самые недорогие разработки получаются при использовании E-сердечников. Броневые и RM-сердечники из-за их низкого профиля обычно применяются в источниках питания, монтируемых непосредственно на платах.

## Вычисление разброса $A_L$

Е-сердечники компании EPCOS обычно выпускаются с зазором, имеющим заданный допуск. В некоторых случаях, например для обратноходовых преобразователей, индуктивность не должна выходить за определенные пределы. Поскольку в справочных данных для Е-сердечников допуски на  $A_L$  не приводятся, то их необходимо рассчитать.

### Пример

Сердечник B66329-G-X127 (E42x21x20, N27, без зазора) применяется в паре с сердечником B66329-G1500-X127 (E42x21x20, зазор 1.5 мм). Требуется вычислить минимальное и максимальное отклонение  $A_L$  для наихудшего случая.

### Решение

В справочных данных для зазора 1.5 мм дается допуск  $\pm 0.05$  мм. Начальная магнитная проницаемость для материала N27 составляет 2000 при разбросе  $\pm 20\%$ .

1. Вычисляем краевой коэффициент  $F$  для зазора 1.5 мм с помощью уравнения 5.
2. Вычисляем  $A_L$  для номинальной начальной проницаемости 2000 с помощью уравнения 8.
3. Вычисляем нижнюю границу  $A_L$  для минимальной начальной проницаемости (1600) и максимального значения воздушного зазора (1.55 мм).
4. Вычисляем верхнюю границу  $A_L$  для максимальной начальной проницаемости (2400) и минимального значения воздушного зазора (1.45 мм).

Воздушный зазор [мм]	$\mu_0$	$A_L$ [нГн]	$\Delta A_L$
1,50	2000	259	0
1,55	1600	248	-3,9%
1,45	2400	268	+3,9%

Краевой коэффициент  $F = 1.34$

Таким образом, разброс составляет приблизительно  $\pm 4\%$ . Если сердечник состоит из двух частей (половин), каждая из которых имеет зазор, то результирующий разброс  $A_L$  будет больше из-за суммирования разбросов для каждой половины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- При использовании программного обеспечения Ferrite Magnetic Design Tool компании EPCOS вычисление магнитных параметров индуктивных ферритовых компонентов проще и быстрее, чем в приведенном здесь примере
- Компания EPCOS также разработала программное обеспечение САПР для проектирования SMD-дросселей, NTC-термисторов, варисторов, алюминиевых электролитических конденсаторов и фильтров на поверхностных акустических волнах
- Эти пакеты программ могут быть бесплатно загружены с Web-сайта [www.epcos.com/tools](http://www.epcos.com/tools)