

Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания

Одним из наиболее трудных вопросов, возникающих в процессе конструирования ИИП, является вопрос расчета трансформаторов и катушек индуктивности, в том числе и дросселей. Как известно, дроссель — это катушка индуктивности, выполненная таким образом, что способна выдерживать большие токи и имеет незначительные потери в рабочем режиме. Чаще всего дросселями называют катушки индуктивности, работающие при большом уровне постоянного тока, протекающего через обмотку. Трансформатор тоже является разновидностью катушки индуктивности. Для краткости далее везде катушки индуктивности будем обозначать КИ.

Изложенный ниже материал дает возможность не только создавать КИ самостоятельно. Автор надеется также, что читатели смогут использовать эту информацию для проверки и изменения параметров КИ при повторении и ремонте радиолюбительских или промышленных конструкций. Ведь часто главным препятствием для этого являются трудности в приобретении ферритовых сердечников указанного типа или намоточного провода определенного диаметра.

Следует оговориться, что приводимые ниже формулы и таблицы могут применяться при расчете любых КИ, а не только при расчете дросселей и трансформаторов для ИИП. Точность расчета параметров КИ на основе изложенной ниже методики составляет 25–35 %, что в большинстве случаев достаточно для практических целей. Встречаемые же иногда в литературных источниках претензии на более высокую точность расчета вызывают некоторое сомнение, поскольку справочные данные изготовителей сердечников сами по себе имеют точность порядка 25 % и только некоторые ферриты для сигнальных цепей определены более точно.

Основные характеристики

Основными электрическими характеристиками КИ являются индуктивность, омическое сопротивление обмотки, максимальный рабочий ток и величина потерь в сердечнике. Кроме того, немаловажными характеристиками являются габаритные размеры и вес, а также цена и трудоемкость изготовления.

Требования к КИ варьируются в зависимости от конкретного применения. Например, для многих понижающих преобразователей и для большинства помехоподавляющих фильтров индуктивность дросселя может быть выбрана большей, чем требуется по расчету. При этом качество работы преобразователя или фильтра не ухудшается, а, напротив, становится лучше. В то же время дрос-

сели для инвертирующих и повышающих преобразователей должны иметь определенную, довольно строго заданную расчетом величину индуктивности. В таких случаях существенное отклонение индуктивности примененной КИ от требуемой — как ее уменьшение, так и увеличение — приводит к нежелательным режимам работы ИИП, излишним потерям и перегрузкам полупроводниковых приборов.

Аналогичная картина наблюдается и для трансформаторов. В некоторых применениях, таких как двухтактные преобразователи и однотактные преобразователи с передачей энергии «на прямом ходе ключа», индуктивность первичной обмотки трансформатора не является критичной и всегда может быть увеличена или при соблюдении некоторых условий даже уменьшена. В то же время однотактные преобразователи «на обратном ходе ключа», которые по своей сути являются инвертирующими преобразователями, весьма чувствительны к величине индуктивности трансформатора. В этом случае трансформатор фактически является видоизмененным дросселем.

Что касается максимального рабочего тока и сопротивления обмоток, то здесь предела улучшению нет: практически любой дроссель или трансформатор можно успешно заменить на дроссель или трансформатор с большим максимально допустимым значением рабочего тока и меньшим сопротивлением обмоток.

Индуктивность

Индуктивность КИ рассчитывается по формуле:

$$L = A_L \cdot N^2 \text{ (мкГн)}, \quad (1)$$

где A_L — справочный параметр сердечника, мкГн;

N — количество витков в обмотке.

Для кольцевого сердечника с замкнутым магнитным сердечником без зазо-

ра параметр A_L легко вычислить самостоятельно по формуле:

$$A_L = \mu_0 \cdot \mu_i \cdot \frac{S_e}{l_e} \text{ (мкГн)}, \quad (2)$$

где μ_i — начальная магнитная проницаемость материала сердечника;

μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, физическая константа имеющая значение 1.257×10^{-3} мкГн/мм;

S_e — эффективная площадь сечения магнитопровода, мм²;

l_e — эффективная длина сердечника, мм.

Справочные данные ряда сердечников без зазора приведены в таблицах 1–4. Там же указаны эффективные геометрические параметры сердечников l_e и S_e , а также относительная магнитная проницаемость феррита. При использовании материала с другим значением магнитной проницаемости значение параметра A_L следует пересчитать:

$$A_L = A_{L[\text{табл}]} \cdot \mu_i / \mu_{i[\text{табл}]}, \quad (3)$$

где $A_{L[\text{табл}]}$ — табличное значение коэффициента индуктивности сердечника;

$\mu_{i[\text{табл}]}$ — магнитная проницаемость феррита, указанная в таблице;

μ_i — магнитная проницаемость используемого материала.

Известно, что обозначение марки отечественных ферритов включает в себя указание на их начальную магнитную проницаемость, например, феррит 1000НМ имеет магнитную проницаемость $\mu_i = 1000$ и так далее. Типичный диапазон проницаемости для ферритов лежит в пределах 100–10000. Практически все разъемные сердечники для силовой электроники выполняются из ферритов с высокой магнитной проницаемостью: 1500 и более. Следует иметь в виду, что чем выше магнитная проницаемость феррита, тем выше потери в сердечнике на высоких частотах. Разъемные сердечники из материала с низкой проницаемостью предназначены для сигнальных цепей, их не рекомендуется использовать в силовых цепях ИИП.

Технические данные некоторых зарубежных ферритов приведены в табл. 5. Из-за недостатка места относительно подробный перечень приведен только для ферритов фирмы Philips, для других фирм автор ограничился популярными силовыми ферритами для разъемных сердечников ИИП.

Наиболее часто для разъемных сердечников ИИП употребляются марганец-цинковые ферриты следующих марок:

- 3C85, 3C90, 3F3 фирмы Philips;
- N27, N41, N47, N67 фирмы Siemens;
- PC30, PC40 фирмы TDK;
- B50, B51, B52 фирмы Thomson-LCC;
- F44, F5, F5A фирмы Neosid, и т.д.

Никель-цинковые ферриты предпочтительны для использования на частотах более 2 МГц, что выходит за рамки рабочего диапазона частот большинства современных ИИП. Как видно из приведенной таблицы, ферриты разных изготовителей имеют схожие параметры и образуют взаимозаменяемые семейства. Их можно заменить в

том числе и отечественными ферритами марок 1500MM, 2000MM, 2500MM.

Кольца фирм Philips и Siemens имеют пластиковую оболочку, цвет которой указывает на марку феррита или порошкового железа. На разъемных сердечниках марка материала, как правило, указана в текстовом виде. К сожалению, не все магнитные сердечники имеют надлежащую маркировку. Приблизительно оценить магнитные свойства феррита можно следующим образом: как правило, ферриты с более высокой проницаемостью темные, почти черные, они обнаруживают заметно зернистую структуру на сколах и разломах, тогда как ферриты с относительно низкой проницаемостью имеют серый цвет и более однородную структуру.

Значение A_L для сердечников с зазором тоже можно получить на основе табличных данных. При увеличении зазора эффект получается такой же, как если бы магнитная проницаемость материала сердечника уменьшалась. Даже сравнительно небольшие зазоры уменьшают проницаемость сердечника в десятки и сотни раз. Получаемая при этом эффективная магнитная проницаемость не зависит в основном от геометрических размеров и почти не зависит от магнитной проницаемости материала:

$$\mu_e = \frac{l_e}{g} \tag{4}$$

где l_e — эффективная длина средней магнитной линии сердечника, мм; g — суммарная толщина зазора, мм.

Формула (4) справедлива при выполнении следующих условий: μ_e много меньше проницаемости материала сердечника μ_i , а зазор g много меньше размеров поперечного сечения сердечника.

Обратите внимание на то, что для разъемных сердечников в табл. 2–4, помимо значения магнитной проницаемости феррита μ_i , приведено и значение эффективной магнитной проницаемости μ_e для сердечника без зазора, которое имеет меньшую величину. Дело в том, что реально разъемный сердечник всегда имеет некий зазор, хотя и очень маленький. Кроме того, часть магнитных линий проходит мимо сердечника, особенно если размеры его малы, а форма значительно отличается от кольцевой.

При очень малых зазорах или малой проницаемости феррита соотношение (4) неточно, ведь даже при нулевом зазоре эффективная магнитная проницаемость не может превысить магнитной проницаемости материала сердечника. При очень больших зазорах форма магнитного поля в них искажается, что приводит к дополнительным погрешностям при использовании формулы (4). Выражение «много меньше» подразумевает отношение в 10 и более раз. Пусть читатель не смущает кажущаяся ограниченность области применения формулы (4), она покрывает подавляющее большинство практических случаев.

Например, возьмем сердечник, состоящий из двух Ш-образных магнитопроводов E20/10/5, изготовленных из материала 3C85, то есть из феррита с проницаемостью $\mu_i=2000$. Длина средней магнитной линии сердечника 42,8 мм, размеры поперечного сечения 3,5×5,0 мм в тонкой части магнитопровода. Введем в сердечник прокладку из немагнитного материала толщиной 0,25 мм, ширина зазора получится 2×0,25=0,5 мм. Эффективная магнитная проницаемость сердечника с зазором $\mu_e=42,8/0,5=85,6$. При этом условия применимости формулы (4) соблюдены: $\mu_e=85,6$ много меньше, чем 2000; зазор $g=0,5$ мм много меньше 3,5 мм.

Окончательная формула для расчета параметра A_L сердечника с зазором такова:

$$A_L = \frac{A_{L\text{ [табл]}} \cdot l_e}{\mu_e \text{ [табл]} \cdot g} \tag{5}$$

где $A_{L\text{ [табл]}}$ и $\mu_e \text{ [табл]}$ — табличные значения, а условия применимости такие же, как у формулы (4).

Продолжим приведенный выше пример с сердечником E20/10/5 из феррита 3C85. Его табличные значения

$A_{L\text{ [табл]}}=1,3$ мкГн, $\mu_e \text{ [табл]}=1430$. После введения зазора 0,5 мм формула (5) дает результат $A_L=0,074$ мкГн.

Ограниченный объем журнальной статьи не позволяет поместить данные всех имеющихся на рынке видов сердечников. Выход из положения подсказывают следующие рассуждения.

Значение A_L зависит только от двух факторов: магнитной проницаемости и геометрии сердечника. Практически любой замкнутый сердечник можно рассматривать как «деформиро-

ванное кольцо». Например, сердечник, состоящий из двух Ш-образных половин, можно представить так: большое кольцо разрежали вдоль на два тонких кольца, затем эти тонкие кольца деформировали в прямоугольники и составили вместе в виде «восьмерки». Очень важно, что при таком геометрическом (топологическом) преобразовании параметр A_L изменяется незначительно. Следовательно, любой замкнутый сердечник сложной формы можно мысленно подвергнуть и обратному преобразованию в кольцо.

Таким образом, становится ясно, как поступать с сердечниками, не описанными в таблицах: надо измерить их геометрические размеры, вычислить длину средней магнитной линии и усредненное поперечное сечение магнитопровода, а затем найти A_L сердечника по формуле (2).

Например, для того же сердечника E20/10/5, имеющего длину средней магнитной линии приблизительно 45 мм и усредненное сечение магнитопровода приблизительно 5×6=30 мм², расчет по формуле (2) дает результат $A_L=1,257$ мкГн. Это недалеко от «истинной» табличной величины $A_L=1,3$ мкГн, которая сама по себе имеет точность 25 %.

Есть и другой путь. Нетрудно найти значение A_L по результатам измерения индуктивности пробной обмотки. Наматывайте небольшую обмотку на проверяемый сердечник, например, 10 витков ($N=10$). Затем измерительным мостом или LC-метром измерьте получившуюся индуктивность L и рассчитайте A_L по формуле:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \tag{6}$$

Найти, сколько витков должна иметь обмотка для получения заданной индуктивности, можно по формуле:

$$N = (L/A_L)^* \tag{7}$$

Легко видеть, что обе последние формулы являются простыми преобразованиями формулы (1).

Насыщение сердечника

В случае когда через катушку с сердечником протекает большой ток, магнитный материал сердечника может войти в насыщение. При насыщении сердечника его относительная магнитная про-

Таблица 1. Некоторые кольцевые ферритовые сердечники фирмы Philips

| Сердечник | TC2 5/1 5/1 | TC4/2 2/1 1 | TC4/2 2/1 6 | TC6 3/3 8/2 5 | TN9/6/3 | TN10/6/4 | TN13/7 5/5 | TN14/9/5 | TN14/9/9 | TN16/9 6/3 3 | TN19/11/10 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Объем [мм³] | 2,73 | 8,82 | 12,9 | 46,5 | 102 | 188 | 368 | 430 | 774 | 760 | 1795 |
| Эффективная длина [мм] | 6,06 | 9,18 | 9,2 | 15,2 | 22,9 | 24,1 | 30,1 | 35 | 35 | 38,5 | 44 |
| Эффективное сечение [мм²] | 0,45 | 0,961 | 1,4 | 3,06 | 4,44 | 7,8 | 12,2 | 12,3 | 22,1 | 19,7 | 40,8 |
| Масса [г] | 0,014 | 0,04 | 0,06 | 0,23 | 0,5 | 0,95 | 1,8 | 2,1 | 3,8 | 3,8 | 9,2 |
| Марка феррита (и) | 3D3 (750) | 4A11 (92) | 4A11 (700) | 4A11 (700) | 4C65 (125) | 4C65 (125) | 4C65 (125) | 4C65 (125) | 4A11 (700) | 4A11 (700) | 3C85 (2000) |
| A_L [мкГн] | 0,07 | 0,092 | 0,134 | 0,177 | 0,03 | 0,052 | 0,064 | 0,055 | 0,56 | 0,45 | 2,33 |
| Марка феррита (и) | 3B7 (2300) | 3F3 (1800) | 3S4 (1700) | 3F3 (1800) | 4A11 (700) | 4A11 (700) | 4A11 (700) | 4A11 (700) | 3F3 (1800) | 3F3 (1800) | 3C11 (4300) |
| A_L [мкГн] | 0,215 | 0,24 | 0,325 | 0,45 | 0,17 | 0,286 | 0,36 | 0,31 | 1,43 | 1,16 | 5 |
| Марка феррита (и) | 3E27 (3800) | 3E25 (5500) | 3F3 | 3E25 (5500) | 3F3 (1800) | 3F3 (1800) | 3F4 (900) | 3F3 (1800) | 3C85 (2000) | 3C85 (2000) | 3E25 (5500) |
| A_L [мкГн] | 0,35 | 0,725 | 0,34 | 1,39 | 0,44 | 0,74 | 0,46 | 0,79 | 1,6 | 1,3 | 6,42 |
| Марка феррита (и) | 3E25 (3800) | 3E5 (8500) | 3E25 (5500) | 3E5 (8500) | 3C85 (2000) | 3C85 (2000) | 3F3 (1800) | 3C85 (2000) | 3C11 (4300) | 3C11 (4300) | |
| A_L [мкГн] | 0,35 | 1,12 | 1,05 | 2,15 | 0,485 | 0,82 | 0,9 | 0,88 | 3,4 | 2,7 | |
| Марка феррита (и) | 3E6 (10000) | 3E6 (10000) | 3E5 (8500) | 3E6 (10000) | 3E25 (5500) | 3C11 (4300) | 3C85 (2000) | 3C11 (4300) | 3E25 (5500) | 3E25 (5500) | |
| A_L [мкГн] | 0,93 | 1,315 | 1,63 | 2,53 | 1,34 | 1,75 | 1 | 1,9 | 4,37 | 3,54 | |
| Марка феррита (и) | | | 3E6 (10000) | 3E7 (12000) | 3E5 (8500) | 3E25 (5500) | 3C11 (4300) | 3E25 (5500) | 3E5 (8500) | 3E5 (8500) | |
| A_L [мкГн] | | | 1,915 | 3,6 | 2,07 | 2,25 | 2,2 | 2,43 | 6,76 | 5,47 | |
| Марка феррита (и) | | | | | 3E6 (10000) | 3E5 | 3E5 (8500) | 3E5 (8500) | 3E6 (10000) | 3E6 (10000) | |
| A_L [мкГн] | | | | | 2,435 | 3,47 | 4,34 | 3,76 | 7,955 | 6,43 | |

Примечание. Обозначение колец включает их размеры в [мм] в следующем порядке: (наружный диаметр)/(внутренний диаметр)/(толщина).

Таблица 2. Сердечники RM и P (броневые)

| Тип сердечника | RM4/1 | RM5/1 | RM6S/1 | RM7/1 | RM8/1 | RM10/1 | RM12/1 |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Габаритные размеры [мм] | 9,8x9,8x10,4 | 12,3x12,3x10,4 | 14,7x14,7x12,4 | 17,2x17,2x13,4 | 19,7x19,7x16,4 | 24,7x24,7x18,6 | 29,8x29,8x24,5 |
| Эффективный объем V_e [мм³] | 322 | 574 | 1090 | 1325 | 2440 | 4310 | 8340 |
| Эффективная длина l_e [мм] | 23,3 | 23,2 | 29,2 | 30 | 38,4 | 44,6 | 56,6 |
| Эффективное сечение, S_e [мм²] | 13,8 | 24,8 | 37 | 44,1 | 63 | 96,6 | 146 |
| Масса двух половин [г] | 1,7 | 3,3 | 4,9 | 7,7 | 12 | 22 | 45 |
| Проницаемость (марка феррита) | | | | | | | |
| 1800 (3F3) | Проницаемость сердечника, μ_e | 1260 | 1270 | 1350 | 1390 | 1440 | 1560 |
| | AL [мкГн] | 0,95 | 1,7 | 2,15 | 2,5 | 3 | 5,05 |
| 2000 (3C85 или 3C90) | Проницаемость сердечника, μ_e | - | 1340 | 1470 | 1500 | 1560 | 1700 |
| | AL [мкГн] | - | 1,8 | 2,35 | 2,7 | 3,25 | 5,5 |
| 2300 (3B8 или 3H1) | Проницаемость сердечника, μ_e | - | 1490 | 1620 | 1670 | 1730 | 1910 |
| | AL [мкГн] | - | 2 | 2,6 | 3 | 3,6 | 6,2 |
| 3800 (3E1) | Проницаемость сердечника, μ_e | 2400 | 2350 | 2600 | 2570 | 2800 | 2850 |
| | AL [мкГн] | 1,8 | 3,15 | 4,1 | 4,75 | 5,8 | 9,2 |
| 4700 (3E4) | Проницаемость сердечника, μ_e | 3360 | 3350 | 3590 | 3800 | 4040 | 4100 |
| | AL [мкГн] | 2,5 | 4,5 | 5,75 | 6,6 | 8 | 13,3 |
| 10000 (3E5) | Проницаемость сердечника, μ_e | 4700 | 4980 | 5370 | 5370 | 6000 | 5900 |
| | AL [мкГн] | 3,5 | 6,7 | 8,6 | 10 | 12,5 | 16 |

Примечание. Для сердечников типа P размер в (мм) указан в их названии в виде: (наружный диаметр)/(высота). Сердечники типа P соответствуют отечественным броневым сердечникам Б.

Таблица 3. Сердечники из двух Ш-образных половин

| Тип сердечника | E20/10/5 | E30/15/7 | E42/21/15 | E55/28/21 | E65/32/27 | EF12,6/7/4 | EF16/8/5 | EF20/10/6 | EF25/13/7 |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|
| Сечение средней части [мм] | 5x5 | 7x7 | 12x15 | 17x21 | 20x27 | 3,6x3,6 | 4,5x4,5 | 6x6 | 7,5x7,2 |
| Сечение наружных частей [мм] | 4x5 | 5x7 | 6x15 | 8,5x21 | 10x27 | 2x4,5 | 2,3x4,5 | 3x6 | 3,5x7,2 |
| Эффективный объем, V_e [мм³] | 1340 | 4000 | 17600 | 43700 | 78200 | 384 | 754 | 1500 | 3020 |
| Эффективная длина, l_e [мм] | 42,8 | 67 | 97 | 123 | 147 | 29,6 | 37,6 | 44,9 | 57,5 |
| Эффективное сечение, S_e [мм²] | 31,2 | 60 | 182 | 354 | 532 | 13 | 20,1 | 33,5 | 52,5 |
| Вес каждой половины [г] | 4 | 11 | 44 | 115 | 200 | 0,9 | 2,3 | 3,7 | 8 |
| Проницаемость (марка феррита) | | | | | | | | | |
| 1800 (3F3) | Проницаемость сердечника, μ_e | 1270 | 1400 | 1530 | 1580 | 1300 | 1300 | 1300 | 1400 |
| | AL [мкГн] | 1,15 | 1,6 | 3,6 | 5,7 | 7,3 | 0,7 | 1,2 | 1,6 |
| 2000 (3C85 и 3C90) | Проницаемость сердечника, μ_e | 1430 | 1700 | 1660 | 1650 | 1600 | 1500 | 1450 | 1750 |
| | AL [мкГн] | 1,3 | 1,9 | 3,9 | 5 | 8,4 | 0,9 | 1,35 | 2 |
| 4300 (3C11) | Проницаемость сердечника, μ_e | 2850 | 2930 | 3400 | 3500 | 3650 | 2200 | 2700 | 2700 |
| | AL [мкГн] | 2,6 | 3,3 | 8 | 12,8 | 16,7 | 1,2 | 1,8 | 3,1 |

Примечание. Обозначение сердечника указывает на габаритный размер каждой Ш-образной половины в следующем порядке: (длина)/(ширина)/(толщина).

ницаемость резко уменьшается, что влечет за собой пропорциональное уменьшение индуктивности. Снижение индуктивности вызывает дальнейший ускоренный рост тока через КИ, и т. д. В большинстве ИИП насыщение сердечника крайне нежелательно и может приводить к следующим негативным явлениям:

- повышенный уровень потерь в материале сердечника и увеличенный уровень омических потерь в проводе обмотки приводят к неоправданно низкому КПД ИИП;
- дополнительные потери вызывают перегрев КИ, а также расположенных поблизости радиодеталей; уместно будет упомянуть, что надежность электронной аппаратуры обычно снижается вдвое при увеличении температуры на каждые 6 градусов;
- сильные магнитные поля в сердечнике в сочетании с уменьшением его магнитной проницаемости являются многократно усиленным, по сравнению с нормальным режимом работы, источником помех и наводок на мало-сигнальные цепи ИИП и другие приборы;
- ускоренно нарастающий ток через КИ вызывает ударные токовые перегрузки ключей ИИП, повышенные омические потери в ключах, их перегрев и преждевременный выход из строя;
- ненормально большие импульсные токи КИ влекут за собой перегрев электролитических конденсаторов фильтров питания, а также повышенный уровень помех, излучаемых проводами и дорожками печатной платы ИИП.

Список можно продолжить, но и так уже ясно, что следует избегать работы сердечника в режиме насыщения. Ферриты входят в насыщение, если величина плотности потока магнитной индукции превышает 300 мТ

(миллitesла), причем эта величина не так уж сильно зависит от марки феррита. То есть 300 мТ является как бы врожденным свойством именно ферритов, другие магнитные материалы имеют другие величины порога насыщения. Например, трансформаторное железо и порошковое железо насыщаются при величине плотности потока магнитной индукции примерно 1Т, то есть могут работать в гораздо более сильных полях. Более точные значения порога насыщения для разных ферритов указаны в табл. 5.

Величина плотности потока магнитной индукции в сердечнике рассчитывается по следующей формуле:

$$B = 1000 \cdot \mu_0 \cdot \mu_e \cdot \frac{I \cdot N}{l_e} \text{ (мТ)}, \quad (8)$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, $1,257 \times 10^{-3}$, мкГн/мм;

μ_e — относительная магнитная проницаемость сердечника (не путать с проницаемостью материала сердечника);

I — ток через обмотку, А;

N — количество витков в обмотке;

l_e — длина средней магнитной линии сердечника, мм.

Несложное преобразование формулы (8) поможет найти ответ на практический вопрос: какой максимальный ток может проходить через дроссель до того, как сердечник войдет в насыщение?

$$I_{\text{макс}} = 0,001 \frac{B_{\text{макс}}}{\mu_0 \cdot \mu_e} \cdot N \text{ (А)}, \quad (9)$$

где $B_{\text{макс}}$ — табличное значение, вместо которого можно использовать

значение 300 мТ для любых силовых ферритов

Для сердечников с зазором удобно представить сюда выражение (4). После сокращений получаем:

$$I_{\text{макс}} = 0,001 \frac{B_{\text{макс}} \cdot g}{\mu_0 \cdot N} \text{ (А)}. \quad (10)$$

Результат получается, на первый взгляд, довольно парадоксальный: величина максимального тока через КИ с зазором определяется отношением размера зазора к количеству витков обмотки и не зависит от размеров и типа сердечника. Однако этот кажущийся парадокс объясняется просто. Ферритовый сердечник настолько хорошо проводит магнитное поле, что все падение напряженности магнитного поля приходится на зазор. При этом величина потока магнитной индукции, одинаковая и для зазора, и для сердечника, зависит лишь от ширины зазора, тока через обмотку и количества витков в обмотке и не должна превышать 300 мТ для обычных силовых ферритов.

Для ответа на вопрос, какой величины суммарный зазор g надо ввести в сердечник, чтобы он выдержал без насыщения заданный ток, преобразуем выражение (10) к следующему виду:

$$g = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{0,001 \cdot B_{\text{макс}}} \text{ (мм)}. \quad (11)$$

Чтобы нагляднее показать влияние зазора, приведем следующий пример. Возьмем сердечник E30/15/7 без зазора, феррит 3C85, магнитная проницаемость $\mu_e = 1700$. Рассчитаем количество витков, необходимое для получения индуктивности 500 мкГн. Сердечник, согласно таблице, имеет $AL = 1,9$ мкГн. Воспользовавшись формулой (7), получаем

чуть более 16 витков. Зная эффективную длину сердечника $l_e = 67$ мм, по формуле (9) вычислим максимальный рабочий ток: $I_{макс} = 0,58$ А.

Теперь введем в сердечник прокладку толщиной 1 мм, зазор составит $g = 2$ мм. Эффективная магнитная проницаемость уменьшится. После не-

крайней мере, уменьшайте количество витков в обмотке, чтобы снизить потери в меди, и одновременно уменьшайте зазор в сердечнике. Важно подчеркнуть, что эта рекомендация не относится к трансформаторам, в которых ток протекающий через первичную обмотку, определяется двумя составляющи-

ми: тогда как разъемные сердечники для ИИП, куда легко ввести зазор, почти всегда выполнены из ферритов с высокой магнитной проницаемостью. Наиболее распространенными при использовании в ИИП оказываются два типа колец: с низкой проницаемостью (в пределах 50...200) — для дросселей,

Таблица 4. Сердечники из двух Ш-образных половин с круглым средним стержнем

| Тип сердечника | ETD29/16/10 | ETD34/17/11 | ETD39/20/13 | ETD44/22/15 | ETD49/25/16 | EC35/17/10 | EC41/19/12 | EC52/24/14 | EC70/34/17 |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| Диаметр средней части [мм] | 9,5 | 10,8 | 12,5 | 15 | 16,5 | 9,5 | 11,6 | 13,4 | 16,4 |
| Эффективный объем, V_e [мм³] | 5470 | 7640 | 11500 | 17800 | 24000 | 6530 | 10800 | 18800 | 40100 |
| Эффективная длина, l_e [мм] | 72 | 78,6 | 92,2 | 103 | 114 | 77,4 | 89,3 | 105 | 144 |
| Эффективное сечение, S_e [мм²] | 76 | 97,1 | 125 | 173 | 211 | 84,3 | 121 | 134 | 279 |
| Вес каждой половины [г] | 14 | 20 | 30 | 47 | 62 | 18 | 26 | 56 | 125 |
| Проницаемость (марка феррита) | | | | | | | | | |
| 1800 (3F3) | Проницаемость сердечника, μ_e | 1430 | 1480 | 1500 | 1500 | 1550 | - | - | - |
| | AL [мкГн] | 1,9 | 2,3 | 2,6 | 3,2 | 3,6 | - | - | - |
| 2000 (3C85 или 3C90) | Проницаемость сердечника, μ_e | 1580 | 1600 | 1650 | 1650 | 1700 | 1600 | 1600 | 1600 |
| | AL [мкГн] | 2,1 | 2,5 | 2,8 | 3,5 | 4 | 2,1 | 2,7 | 3,9 |
| 4300 (3C11) | Проницаемость сердечника, μ_e | 3150 | - | - | - | - | - | - | - |
| | AL [мкГн] | 4,2 | - | - | - | - | - | - | - |

Примечание. Обозначение сердечника указывает на габаритный размер каждой Ш-образной половины в следующем порядке: (длина)/(ширина)/(толщина).

Таблица 5. Основные характеристики некоторых ферритов

| Марка феррита | 3D3 | 3H1 | 3H3 | 3E1 | 3E4 | 3E5 | 3B8 | 3C10 | 3C80 | 3C85 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|
| Изготовитель | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips | Philips |
| Материал феррита | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn | MnZn |
| Начальная магнитная проницаемость, μ_i | 750 | 2300 | 2000 | 3800 | 4700 | 10000 | 2300 | 1800 | 2000 | 2000 |
| Цвет пластикового покрытия колец | - | - | - | - | - | бел/желт | - | - | - | расп/бел |
| Предельное значение плотности потока магнитной индукции, B_{max} [мТ], при 25°C | 320 | 350 | 330 | 350 | 360 | 380 | 420 | - | 420 | 400 |
| B_{max} [мТ] при 100°C | 260 | 210 | 250 | 200 | 210 | 210 | 330 | 350 | 330 | 330 |
| Фактор потерь $10^{-4} \cdot 6 \cdot f \cdot B_{max}^2$ | 30 | 5 | 2,5 | 20 | 20 | 75 | 5 | - | - | - |
| Удельные потери [мкВт/мм³] при 200 [мТ] на частоте [МГц] | - | - | - | - | - | - | - | 140 | 250 | 140 |
| Гистерезис, μ_b [1/Т], при перемагничивании 1,5 - 3 [мТ] | 0,0018 | 0,001 | 0,006 | 0,0012 | 0,001 | 0,001 | - | 0,016 | 0,025 | 0,025 |
| Удельное сопротивление [Ом·м] | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0,5 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Плотность [кг/м³] | 4700 | 4800 | 4700 | 4800 | 4800 | 4900 | 4800 | 4800 | 4800 | 4600 |

Примечания:

1. Ферриты 3S1 и 4S1 предназначены для подавления высокочастотных помех. Выпускаются в виде трубок и бусин, надеваемых на провод.
2. В квадратных скобках приведены удельные потери при 100 [мТ].

сложных расчетов по формулам (5) и (7) находим, что для получения индуктивности 500 мкГн нам надо намотать 125 витков. По формуле (10) определяем максимальный ток КИ, он увеличился до 3,8 А, то есть более чем в 5 раз.

Отсюда следует и практическая рекомендация для читателей, самостоятельно конструирующих дроссели. Чтобы получить катушку индуктивности, работающую при максимально возможном токе, заполните сердечник проводом полностью, а затем создайте в сердечнике максимально возможный зазор. Если при проверочном расчете окажется, что дроссель имеет чрезмерный запас по току, то выберите меньший размер сердечника или, по

ми: током, передаваемым во вторичную обмотку, и небольшим током, намагничивающим сердечник (ток магнетизации).

Как видим, зазор в сердечнике дросселя играет исключительно важную роль. Однако не все сердечники позволяют вводить прокладки. Кольцевые сердечники выполнены неразъемными, и вместо того, чтобы «регулировать» эквивалентную магнитную проницаемость при помощи зазора, приходится выбирать кольцо с определенной магнитной проницаемостью феррита. Этим и объясняется факт большого разнообразия типов магнитных материалов, применяемых промышленностью для изготовления колец,

и с высокой проницаемостью (1000 и более) — для трансформаторов.

Порошковое железо оказывается наиболее предпочтительным материалом для кольцевых неразъемных сердечников дросселей, работающих при больших токах подмагничивания. Проницаемость порошкового железа обычно находится в пределах 40...125, чаще всего встречаются кольца, выполненные из материалов с проницаемостью 50...80. В табл. 6 приведены справочные данные кольцевых сердечников из порошкового железа фирмы Philips.

Проверить, входит ли сердечник в насыщение при работе обычного ИИП, несложно: достаточно проконтролировать при помощи осциллографа форму тока, протекающего через КИ. Датчиком тока может служить низкоомный резистор или трансформатор тока. КИ, работающая в нормальном режиме, будет иметь геометрически правильную треугольную или пилообразную форму тока. В случае же насыщения сердечника форма тока будет искривлена.

**Алексей Кузнецов,
Сидней**

Продолжение
следует

Таблица 6. Кольцевые сердечники фирмы Philips из порошкового железа

| Сердечник | TN7 5/4/1/3 | TN12/8/4/4 | TN17/9/8/4/4 | TN20/13/6 | TN24/15/7/5 | TN27/15/11 | TN33/20/11 |
|---------------------------|-------------|------------|--------------|-----------|-------------|------------|------------|
| Объем, [мм³] | 83 | 290 | 635 | 1020 | 1895 | 3720 | 5200 |
| Эффективная длина [мм] | 17,3 | 30,9 | 40,2 | 49,9 | 57,8 | 61,6 | 80 |
| Эффективное сечение [мм²] | 4,81 | 9,37 | 15,8 | 20,4 | 32,8 | 60,4 | 65 |
| Масса [г] | 0,6 | 2 | 5 | 7,5 | 13 | 25 | 35 |
| Марка материала | 2P40 | 2P40 | 2P40 | 2P40 | 2P40 | 2P40 | 2P40 |
| AL [мкГн] | 0,014 | 0,015 | 0,002 | 0,021 | 0,029 | 0,049 | 0,041 |
| Марка материала | 2P50 | 2P50 | 2P50 | 2P50 | 2P50 | 2P50 | 2P50 |
| AL [мкГн] | 0,018 | 0,019 | 0,025 | 0,026 | 0,036 | 0,062 | 0,051 |
| Марка материала | 2P65 | 2P65 | 2P65 | 2P65 | 2P65 | 2P65 | 2P65 |
| AL [мкГн] | 0,023 | 0,025 | 0,032 | 0,034 | 0,047 | 0,08 | 0,067 |
| Марка материала | 2P80 | 2P80 | 2P80 | 2P80 | 2P80 | 2P80 | 2P80 |
| AL [мкГн] | 0,028 | 0,031 | 0,04 | 0,041 | 0,057 | 0,094 | 0,082 |
| Марка материала | 2P90 | 2P90 | 2P90 | 2P90 | 2P90 | 2P90 | 2P90 |
| AL [мкГн] | 0,03 | 0,033 | 0,042 | 0,044 | 0,061 | 0,105 | 0,087 |

Примечания:

1. Обозначение колец включает их размеры в [мм] в следующем порядке: (наружный диаметр)/(внутренний диаметр)/(толщина).
2. Последние две цифры в обозначении порошкового железа фирмы Philips указывают на его магнитную проницаемость, например, 2P65 имеет $\mu_i = 65$ и т. д.
3. Цвет пластиковой оболочки: 2P40 — темно-желтый, 2P50 — темно-синий, 2P65 — темно-красный, 2P80 — темно-зеленый, 2P90 — темно-коричневый.