

# 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.

И зложенный 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 передаточной энергией «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:

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

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:

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

где  $\mu_i$  — начальная магнитная проницаемость материала сердечника;

$\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, физическая константа имеющая значение  $1.257 \times 10^{-3}$  мкГн/мм;

$S_e$  — эффективная площадь сечения магнитопровода, мм<sup>2</sup>;

$l_e$  — 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:

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

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

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

$\mu_i$  — 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:

- 3С85, 3С90, 3Ф3 фирмы Philips;
- N27, N41, N47, N67 фирмы Siemens;
- РС30, РС40 фирмы TDK;
- В50, В51, В52 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:

$$\mu_e = \frac{l_e}{g} \quad (4)$$

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

Формула (4) справедлива при выполнении следующих условий:  $\mu_e$  много меньше проницаемости материала сердечника  $\mu_i$ , 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  $\mu_i$ , приведено и значение эффективной магнитной проницаемости  $\mu_e$  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 3С85, 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 0,25мм, 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:

$$A_L = \frac{A_{L[\text{табл}]}}{\mu_e[\text{табл}]} * \frac{l_e}{g} \quad (5)$$

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 3С85. 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 разрезали 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 45мм и усредненное сечение магнитопровода приблизительно 5×6=30 мм<sup>2</sup>, 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. Наматываем 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:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (6)$$

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

$$N = (L/A_L)^* \quad (7)$$

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	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)	Ф 25 (150)
Средняя длина [мм]	7,2	9,5	12,8	15,5	19,0	23,0	27,5	33,0	39,5	47,0	55,5	65,0	75,5	87,0
Эффективная длина [мм]	5,05	6,15	8,2	10,2	12,8	15,8	19,2	23,0	27,5	33,0	39,5	47,0	55,5	65,0
Эффективное сечение [мм²]	2,45	0,951	1,4	3,35	4,4	7,8	12,2	17,3	23,5	31,0	39,5	49,5	61,0	74,0
Материал	3С14	3С4	3С6	3С3	3С5	3С6	3С5	3С5	3С1	3С3	3С3	3С3	3С3	3С1
Материал феррита (μ <sub>i</sub> )	2000	2000	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430	1430
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,17	0,05	0,124	0,17	0,27	0,35	0,52	0,74	0,95	1,25	1,6	2,0	2,5	3,2
Материал феррита (μ <sub>e</sub> )	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,15	0,4	0,245	0,145	0,1	0,195	0,35	0,31	0,49	0,75	1,15	1,6	2,1	2,7
Материал феррита (μ <sub>i</sub> )	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,25	0,75	0,4	0,25	0,4	0,7	1,1	1,45	1,9	2,5	3,2	4,1	5,1	6,4
Материал феррита (μ <sub>e</sub> )	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,35	1,1	0,75	0,45	0,75	1,1	1,5	1,9	2,5	3,2	4,1	5,1	6,4	8,0
Материал феррита (μ <sub>i</sub> )	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,3	1,3	0,9	0,5	0,8	1,2	1,6	2,1	2,7	3,5	4,4	5,4	6,6	8,2
Материал феррита (μ <sub>e</sub> )	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,3	1,3	0,9	0,5	0,8	1,2	1,6	2,1	2,7	3,5	4,4	5,4	6,6	8,2
Материал феррита (μ <sub>i</sub> )	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A <sub>L</sub> [мкГн]	0,3	1,3	0,9	0,5	0,8	1,2	1,6	2,1	2,7	3,5	4,4	5,4	6,6	8,2

Примечание: Обозначения колец, в скобках даны размеры [мм] в следующем порядке: наружный диаметр/внутренний диаметр/толщина.

Таблица 2. Сердечники RM и P (броневые)

	Тип сердечника	RM4		RM5		RM6		RM7		RM8		RM9	
		Э30/30	Э30/35	Э30/40	Э30/45	Э30/50	Э30/55	Э30/60	Э30/65	Э30/70	Э30/75	Э30/80	Э30/85
	Габаритные размеры, мм	30x30x34	30x35x34	30x40x34	30x45x34	30x50x34	30x55x34	30x60x34	30x65x34	30x70x34	30x75x34	30x80x34	30x85x34
	Эффективный объем, см <sup>3</sup>	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
	Эффективная длина, мм	33,3	38,3	43,3	48,3	53,3	58,3	63,3	68,3	73,3	78,3	83,3	88,3
	Эффективное значение, мм <sup>2</sup>	3,8	4,3	4,8	5,3	5,8	6,3	6,8	7,3	7,8	8,3	8,8	9,3
	Вес в двух ползунин, г	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3
Проницаемость (марка феррита)	1300 (3F3)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	1,35	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5
2000 (3C36 или 3C30)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	-	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3
4300 (3E11 или 3E1)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3
4700 (3E4)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	4,9	5,2	5,5	5,8
7000 (3E5)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0

Примечание. Для сердечников типа P размер в (мм) указан в их названии в виде: (наружный диаметр) (высота). Сердечники типа P соответствуютечным броневым сердечникам B.

Таблица 3. Сердечники из двух Ш-образных половин

	Тип сердечника	E30/15/7		E42/21/15		E55/25/21		E70/32/27		E85/39/27		E110/49/27		E135/59/27	
		Э30/15/7	Э30/15/7	Э42/21/15	Э42/21/15	Э55/25/21	Э55/25/21	Э70/32/27	Э70/32/27	Э85/39/27	Э85/39/27	Э110/49/27	Э110/49/27	Э135/59/27	Э135/59/27
	Сечения средней части, мм	8x5	8x7	12x15	12x15	17x21	17x21	22x27	22x27	28x35	28x35	35x45	35x45	42x55	42x55
	Сечения наружных частей, мм	4x5	8x7	8x15	8x15	12x21	12x27	17x27	17x27	22x35	22x35	28x45	28x45	35x55	35x55
	Эффективный объем, см <sup>3</sup>	134,3	100,0	178,0	178,0	257,0	257,0	384,0	384,0	531,0	531,0	754,0	754,0	1000,0	1000,0
	Эффективная длина, мм	42,8	37	37	37	42,8	42,8	47,7	47,7	52,6	52,6	57,5	57,5	62,4	62,4
	Эффективное значение, мм <sup>2</sup>	31,2	30	38,3	38,3	46,4	46,4	54,5	54,5	62,6	62,6	70,7	70,7	78,8	78,8
	Вес в двух ползунин, г	4	4	4	4	11,5	11,5	20,0	20,0	28,5	28,5	37,0	37,0	45,5	45,5
1300 (3F3)	Проницаемость сердечника, ца	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	1,15	1,5	3,8	3,8	5,7	5,7	7,3	7,3	9,3	9,3	1,2	1,2	1,5	1,5
2000 (3C36 и 3C30)	Проницаемость сердечника, ца	1300	1700	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	1,3	1,9	3,9	3,9	5,4	5,4	7,0	7,0	8,8	8,8	1,1	1,1	1,5	1,5
4300 (3E11)	Проницаемость сердечника, ца	2550	2550	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
	AL, мкГн	2,5	3,3	8	8	12,3	12,3	15,7	15,7	19,2	19,2	23,5	23,5	27,0	27,0

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:

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

где  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость вакуума,  $1,257 \times 10^{-3}$ , мкГн/мм;

$\mu_r$  — 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?

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

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

значение 300 мТ для любых силовых ферритов

Для сердечников с зазором удобно подставить 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 3С85, магнитная проницаемость  $\mu_r=1700$ . 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	E=0,5(1/3)	E=0,5(1/7/1)	E=0,5(1/13)	E=0,5(1/5)	E=0,5(1/15)	E=0,5(1/10)	E=0,5(1/11)	E=0,5(1/14)	E=0,5(1/12)
Средняя длина сердечника, мм	12,8	12,8	12,5	12,5	12,5	9,5	11,5	13,4	15,4
Средняя окружность сердечника, мм	51,0	54,0	150,0	170,0	140,0	55,0	105,0	135,0	150,0
Эффективное сечение, мм <sup>2</sup>	7,5	7,5	22,2	25,2	14,4	3,4	35,2	45,2	44,4
Эффективная длина, мм	7,5	7,1	12,5	12,5	12,5	34,3	12,1	31	29
Эффективное сечение, мм <sup>2</sup>	1,5	1,0	3,0	4,0	5,0	18	15	65	12,5
Вес каждой половины, г									
Проницаемость марки феррита	1300	1480	1500	1500	550				
AL (мкГн)	1,5	2,3	2,5	3,5	3,5				
AL (мкГн)	1500	1500	1550	1550	1700	1500	500	1900	1500
AL (мкГн)	1,5	2,5	2,3	3,5	4	3,1	1,7	3,5	2,9
AL (мкГн)	3150								
AL (мкГн)	4,5								

Примечание. Обозначения сердечника указывает на рабочий размер каждой Ш-образной половины в следующем порядке: длина (диаметр) / толщина.

Таблица 5. Основные характеристики некоторых ферритов

Марка феррита	3D3		3H1		3H3		3E1		3E4		3E5		3E3		3C11		3C8		3C5		
	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	$\mu_r$	$\mu_{eff}$	
Материал феррита	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	MnZ	
Удельная магнитная проницаемость	750	3500	2000	3500	4700	10000	2500	1300	2500	1300	2500	1300	2500	1300	2500	1300	2500	1300	2500	1300	
Цвет пластиковой оболочки						желтый															
Проницаемость относительно воздуха магнитной индукции при 100 Гц	300	350	300	350	380	380	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	
Вихревые токи при 100 Гц	250	210	250	200	210	210	330	350	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	
Фактор потерь при 10 <sup>5</sup> Гц	30	5	2,5	20	20	25	5														
Удельная потеря при 200 Гц																					
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	
Проницаемость при 1 Гц	0,0018	700	1,005	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	
Удельная потеря при 100 Гц	2	1	2	1	1	2,5	2														
Проницаемость при 1 Гц	4700	4500	4700	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	4300	

Примечание:

- Ферриты 3E1 и 3E11 предназначены для подавления высокочастотных токов. Выпускаются в виде трубок и бусин, надеваемых на провод.
- В квадратных скобках приведены удельные потери при 100 Гц.

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 максимальном возможном токе, заполните сердечник проводом полностью, а затем создайте в сердечнике максимальный возможный зазор. Если при проверочном расчете окажется, что дроссель имеет чрезмерный запас по току, то выбирайте 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.

Таблица 6. Кольцевые сердечники фирмы Philips из порошкового железа

Сердечник	TN7,5/4,1/3	TN12,8/4,4	TN17,9/5,4/4	TN20/3/6	TN24/15/7,5	TN27/15/11	TN33/20/11
Объем [мм <sup>3</sup> ]	23	290	635	1020	1295	3720	5200
Эффективная длина [мм]	17,3	30,9	40,2	49,9	57,8	61,6	80
Эффективное сечение [мм <sup>2</sup> ]	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

Примечание:

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

**Алексей Кузнецов, Сидней**

Продолжение следует