

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 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 $1.257 \cdot 10^{-3}$ 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:

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

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

μ_i [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:

- 3С85, 3С90, 3Ф3 фирмы Philips;
- N27, N41, N47, N67 фирмы Siemens;
- РС30, РС40 фирмы TDK;
- В50, В51, В52 фирмы Thomson-LCC;
- F44, F5, F5А 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: 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 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 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:

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

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)	Ф 25 (150)
Средняя длина [мм]	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
Эффективная длина [мм]	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
Эффективное сечение [мм²]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Материал	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14	3С14
Материал феррита (μ _i)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
A _L [мкГн]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Материал феррита (μ _i)	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15	3С15
A _L [мкГн]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Материал феррита (μ _i)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)
A _L [мкГн]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Материал феррита (μ _i)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)
A _L [мкГн]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Материал феррита (μ _i)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)
A _L [мкГн]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Материал феррита (μ _i)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)
A _L [мкГн]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Материал феррита (μ _i)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)	2E5 (1500)
A _L [мкГн]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

Примечание: Обозначения колец, в скобках 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	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34	30x30x34
	Эффективный объем, см ³	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
	Эффективная длина, мм	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	
	Эффективное значение, мм ²	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	
	Вес каждой полужелезя, г	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	
Проницаемость (марка феррита)	1300 (3F3)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
	AL, мкГн	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	
2000 (3C36 или 3C30)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
	AL, мкГн	-	3	2,35	2,7	3,25	4,4	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5	
4300 (3E11 и 3E1)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
	AL, мкГн	-	4,90	5,20	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,0	8,4	
7000 (3E4)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
	AL, мкГн	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	
10000 (3E5)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
	AL, мкГн	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	

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		E30/15/9		E30/21/9		E30/21/15		E30/21/21		E30/21/27		E30/27/27		E30/36/9		E30/36/15		E30/36/21		E30/36/27		
		Сечения средней части, мм	8x5	8x7	12x15	12x15	17x21	17x21	22x27	22x27	28x36	28x36	36x45	36x45	45x54	45x54	54x63	54x63	63x72	63x72	72x81	72x81	81x90	81x90
Сечения наружных частей, мм	4x5	8x7	8x15	8x15	12x21	12x21	17x27	17x27	22x36	22x36	28x45	28x45	36x54	36x54	45x63	45x63	54x72	54x72	63x81	63x81	72x90	72x90	81x99	81x99
Эффективный объем, см ³	1340	1000	1700	1700	2500	2500	3300	3300	4100	4100	5000	5000	5900	5900	6800	6800	7700	7700	8600	8600	9500	9500	10400	10400
Эффективная длина, мм	42,8	37	37	37	42,8	42,8	48,6	48,6	54,4	54,4	60,2	60,2	66,0	66,0	71,8	71,8	77,6	77,6	83,4	83,4	89,2	89,2	95,0	95,0
Эффективное значение, мм ²	31,2	30	32	32	34	34	36	36	38	38	40	40	42	42	44	44	46	46	48	48	50	50	52	52
Вес каждой полужелезя, г	4	4	11	11	16	16	21	21	26	26	31	31	36	36	41	41	46	46	51	51	56	56	61	61
Проницаемость (марка феррита)	1300 (3F3)	1300	1400	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	1,15	1,5	3,6	3,6	5,7	5,7	7,3	7,3	9,0	9,0	10,8	10,8	12,6	12,6	14,4	14,4	16,2	16,2	18,0	18,0	20,0	20,0	22,0
2000 (3C36 и 3C30)	1300	1300	1700	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	1,5	1,9	3,9	3,9	6	6	7,4	7,4	9,1	9,1	10,9	10,9	12,7	12,7	14,5	14,5	16,3	16,3	18,1	18,1	20,0	20,0	21,9
4300 (3E11)	1300	1300	2900	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
	AL, мкГн	2,5	3,3	8	8	12,3	12,3	15,7	15,7	19,1	19,1	22,5	22,5	25,9	25,9	29,3	29,3	32,7	32,7	36,1	36,1	39,5	39,5	42,9

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

μ_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	ETD30/13/13	ETD31/17/11	ETD32/20/13	ETD44/21/8	ETD46/28/12	ETD51/17/10	ETD11/3/11	ETD21/4/11	ETD30/3/11
Средняя радиальная длина, мм	12,8	12,8	12,5	1,5	3,5	9,5	1,5	13,4	15,4
Средняя окружная длина, мм	5170	7542	11500	17800	24000	5532	10800	13800	20100
Эффективное сечение, мм ²	7,5	15,5	22,2	1,35	1,4	34,3	25,5	3,35	1,44
Эффективная длина, мм	7,5	17,1	12,5	17,5	21,1	11,4	15,1	3,35	17,9
Эффективное сечение, мм ²	1,5	10	30	47	52	18	13	65	11,5
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	3,9
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		3H2		3E1		3E4		3E5		3E3		3C11		3C8		3C5	
	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{eff}	μ_r	μ_{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	2300	1300	2300	2700										
Цвет пластиковой оболочки						желтый														
Проницаемость относительно воздуха магнитной индукции В/Акс, мТ/Ом/мм	300	350	300	350	380	380	420	420	400											
Вихревые токи при 1000 Гц	250	210	250	200	210	210	330	350	330											
Фактор потерь 10 ⁻³ Вт/Вт	30	5	2,5	20	20	15	5													
Удельная потеря, мкВт/мм ² при 200 мТ/с																				
Напряжение МВ	1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1											
Прочность при 10 ³ Гц при температуре 100 °С	0,0018	1,000	1,000	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018											
Удельная потеря при 100 Гц	2	1	2	1	1	1	2,5	2												
Прочность кПа/мм	4700	4500	4700	4300	4300	4300	4300	4300	4300											

Примечания:
1. Ферриты 3E1 и 3E11 предназначены для подавления высокочастотных токов. Выпускаются в виде трубок и бусин, — для замены в трансформаторах.
2. В квадратных скобках приведены удельные потери при 100 мТ/с.

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	TN17/9.8/4.4	TN20/13/6	TN24/15/7.5	TN27/15/11	TN33/20/11
Объем [мм ³]	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 ²]	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. Обозначения 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 $\mu = 65$ и т. д.
3. Цвет пластиковой оболочки: 2P40 — темно-желтый, 2P50 — темно-синий, 2P65 — темно-красный, 2P80 — темно-зеленый, 2P90 — темно-коричневый.

Алексей Кузнецов, Сидней

Продолжение следует

Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания

Суммарные потери в магнитном материале пропорциональны объему (массе) сердечника и частоте переключений, потери возрастают при увеличении амплитуды изменения потока магнитной индукции. В справочниках фирм-производителей ферритов приведены номограммы для определения удельных потерь. Сердечник большего размера должен иметь больше потерь просто за счет своего объема, но это компенсируется тем, что максимальное значение потока в нем можно сделать меньше. Как правило, ферриты с большей магнитной проницаемостью имеют и большие потери. Их следует использовать в ИИП, работающих на низких частотах или при малых плотностях потока индукции.

Для получения умеренного уровня потерь в феррите рекомендуется рассчитывать КИ таким образом, чтобы в рабочем режиме амплитуда изменения потока магнитной индукции в сердечнике не превышала 100–150 мТ. Наиболее популярные марки силовых ферритов, такие как 3С85 (Philips), N27 (Siemens), PC30 (TDK) и пр., имеют небольшие потери на частотах до 50–100 кГц. Для больших частот желательно использовать высокочастотные силовые ферриты, такие как 3F3 (Philips), N67 (Siemens), и т. д.

На рис. 2, 3 и 4* приведены номограммы для определения удельных потерь в зависимости от пикового значения потока магнитной индукции для ферритов Philips 3С85, 3F3 и Siemens N27, N67.

На рис. 5 представлены номограммы для определения потерь в сердечниках из порошкового железа фирмы Филипс. Нетрудно видеть, что потери в таких материалах существенно выше, чем в ферритах, что ограничивает область их применения. Обычно сердечники из порошкового железа используются в дросселях, работающих при больших постоянных токах. При этом, как упоминалось выше, сердечник переманивается по частной петле, амплитуда изменения потока сравнительно невелика и потери в

сердечнике малы. Постоянное же подмагничивание порошковое железо выдерживает гораздо лучше ферритов и не насыщается при потоках до 0,95...1,6 Т.

Трансформаторы с накоплением магнитной энергии

Помимо рассмотренных выше “обычных” трансформаторов, в некоторых разновидностях ИИП используется другой тип трансформаторов. Речь идет о преобразователях с передачей энергии в нагрузку “на обратном ходе ключа”. В таких преобразователях при открытом состоянии силового ключа (транзистора) сердечник трансформатора накапливает энергию в форме энергии магнитного поля, а при закрытом состоянии ключа накопленная энергия передается в нагрузку. Величина энергии, запасенной в КИ, определяется выражением

$$E = L \cdot I^2 \text{ (мкДж)}, \quad (16)$$

где L – индуктивность первичной обмотки, мкГн;
 I – ток через первичную обмотку, А.

Максимальная мощность такого ИИП прямо пропорциональна рабочей частоте, но только до тех пор, пока в каждом цикле на прямом ходе ток в индуктивность может возрасти до желаемого значения, а на обратном ходе накопленная энергия может быть полностью передана в нагрузку. При расчете прямого и обратного ходов можно использовать формулы (14) и (15).

Такие трансформаторы должны иметь сравнительно небольшую индуктивность первичной обмотки, иначе за время открытого состояния ключа ток в катушке, определяемый выражением (14), не сможет достичь требуемой величины. Эти трансформаторы, в отличие от “обычных”, обязательно имеют зазор в сердечнике или изготовлены из магнитного материала с низкой проницаемостью. При их расчете следует руководствоваться формулами (8)–(11), ограничивая $V_{\text{макс}}$ на уровне менее 200 мТ и выбирая несколько

меньшую частоту работы, чем для трансформаторов двухтактных ИИП. При этом получаются сопоставимые потери в феррите, а вредное влияние индуктивности рассеяния удастся существенно уменьшить. Иногда для таких трансформаторов применяют сердечники из специальных разновидностей порошкового железа с малыми потерями.

Полезно упомянуть еще один довод в пользу выбора рабочей частоты ИИП, равной 40 кГц. По требованиям европейских стандартов на электромагнитную совместимость, электронные устройства не должны “шуметь” на частотах выше 150 кГц. Выбрав рабочую частоту ИИП равной 40 кГц, удастся удержать третью гармонику сигнала помехи ниже границы контролируемого диапазона. Заметим, что в США нижняя граница контролируемого на электромагнитную совместимость диапазона равна 400 кГц.

Индуктивность рассеяния и емкость

Для обычных трансформаторов влияние индуктивности рассеяния и емкости обмоток приходится учитывать только при высоких напряжениях или больших частотах работы ИИП. При напряжениях менее 100 В и частотах менее 100 [кГц] ими можно пренебречь.

Индуктивность рассеяния L_s и приведенная емкость вторичной обмотки C_2'' образуют LC-фильтр низких частот, нагруженный на приведенное сопротивление нагрузки R_n . Для низких выходных напряжений, когда количество витков невелико и, соответственно, мала емкость вторичной обмотки, частота среза этого фильтра, как правило, оказывается намного выше рабочей частоты ИИП и не оказывает на его работу заметного влияния. Кроме того, в обычном двухтактном трансформаторе нагрузка через выпрямительный мостик большую часть времени подключена к его вторичной обмотке. При этом нагрузка эффективно демпфирует упомянутый LC-фильтр, забирая накапливаемую в реактивных элементах энергию.

В однотактных же трансформаторах нагрузка подключается ко вторичной обмотке только в одном полупериоде, когда выпрямительный диод находится в проводящем состоянии. В другом полупериоде LC-фильтр оказывается незадемпфированным. После возбуждения фронтом сигнала в нем возникают медленно затухающие колебания большой амплитуды, энергия которых не передается в нагрузку, а рассеивается в виде

*Опубликованы в журнале «Схемотехника» № 1, 2000 г.

“звона” и тепла. Кроме того, при разомкнутом состоянии силового ключа первичная обмотка тоже оказывается изолированной от низкочастотного источника входного питания, и емкость первичной обмотки тоже принимает участие в формировании высокочастотного “звона”. Поэтому трансформаторы для одноконтурных схем должны иметь минимально возможные значения L_s , C_1 и C_2 . Для уменьшения их вредного влияния приходится использовать более низкую рабочую частоту ИИП.

Чтобы добиться малых L_s , необходимо обеспечить хорошую магнитную связь между первичной и вторичной обмотками: например, наматывать первичную и вторичную обмотки одновременно, “в два провода”. Для трансформаторов, первичная обмотка которых находится под сетевым напряжением, этот путь не всегда приемлем. Согласно международным стандартам, первичная и вторичная обмотки в них должны быть надежно изолированы, испытание на пробой производится напряжением 3750 В 50 Гц в течение 1 минуты. Минимальное расстояние по поверхности изолятора между токопроводящими частями первичной и вторичной цепей должно быть не менее 5 мм, обычная эмалевая изоляция провода засчитывается как 0,5 мм пути.

Обычно, в целях выполнения требований к изоляции, первичную и вторичную обмотки располагают на разных секциях каркаса, но при этом L_s оказывается большой. Способ намотки с “изоляционной границей” позволяет несколько уменьшить L_s , но он сложен и трудоемок. Хороших результатов можно достичь при выполнении вторичной обмотки из обмоточного провода с тройной изоляцией. Такой провод выдерживает более 10 кВ и соответствует требованиям стандартов к изоляции (производитель Furukava Electric и др). Используя провод с тройной изоляцией, можно даже выполнять обмотки сетевых трансформаторов “в два провода”.

Меньшие значения L_s удастся получить при использовании сердечников с меньшим отношением l_e/s_e , а также броневых сердечников.

Измерить L_s нетрудно. Для этого надо замкнуть вторичные обмотки и измерить полученную индуктивность первичной обмотки. Из эквивалентной схемы видно, что при этом измеряется индуктивность параллельно включенных индуктивностей первичной обмотки L и индуктивности рассеяния L_s . Поскольку $L \gg L_s$, то влиянием индуктивности первичной обмотки

можно пренебречь и принять результат измерения за L_s .

Для уменьшения емкости обмоток рекомендуется выполнять их “виток к витку”, так как при намотке “внавал” витки начала и конца обмотки могут оказаться рядом. Для обмоток с большим количеством витков следует использовать провода с более толстой изоляцией, например, ПЭЛШО или ПЭВШО, а также одножильные обмоточные провода с монолитной фторопластовой изоляцией. Дополнительно уменьшить емкость обмотки можно вводя сравнительно толстые изолирующие прокладки между слоями обмотки. Емкость между соседними витками вносит сравнительно малый вклад в суммарную емкость обмотки, основная доля приходится на емкость между слоями и емкость между витками, имеющими большую разность потенциалов. Впрочем, для низковольтных низкочастотных ИИП влиянием емкостей часто пренебрегают.

Примеры расчета

Пример 1. Рассчитать дроссель для понижающего преобразователя с ШИМ, работающего на постоянной частоте 50 кГц при входном напряжении 40 В и выходном токе 2 А.

Для понижающих преобразователей такого типа наибольший уровень пульсаций тока в дросселе возникает при скважности импульсов, равной 2 (попутно отметим, что при этом выходное напряжение равно половине входного напряжения). Период коммутации $T=1/50$ кГц=20 мкс, время включенного состояния ключа $t_{вкл}=T/2=10$ мкс.

Предположим, что величина пульсаций тока через дроссель равна 10% от выходного тока, $I_{пульс}=0,1 \cdot 2$ А=0,2 А. Используя выражение (15), определим минимально необходимую индуктивность дросселя

$$L = \frac{40 [В] \cdot 10 [мкс]}{0,2 [А]} = 2000 \text{ мкГн.}$$

Выберем ферритовый сердечник ETD34/17/11. Он имеет размер окна для намотки провода $7,5 \cdot 24$ мм. При заполнении окна проводом на 70% в нем можно разместить не менее 160 витков диаметром 1,12 мм. Чтобы избежать насыщения сердечника, введем в него зазор, вычисленный согласно (11):

$$g = \frac{1,257 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \text{ А} \cdot 160}{0,001 \cdot 300 \text{ мТ}} = 1,47 \text{ мм.}$$

Округлим эту величину до большего значения: $g=1,6$ мм. Немагнитная прокладка должна иметь толщину 0,8 мм. Эффективная длина сердечника $l_e=78,6$ мм, эффективная проницаемость сердечника с зазором 1,6 мм составит $m_e = 78,6 \text{ мм}/1,6 \text{ мм} = 49,1$. Табличное значение A_L для сердечника без зазора ETD34/17/11 из феррита 3С85 равно 2,5 мкГн, при этом $m_{e[табл]}=1600$. Используя формулу (5), найдем параметр A_L для сердечника с зазором

$$A_L = \frac{2,5 \text{ мкГн} \cdot 78,6 \text{ мм}}{1600 \cdot 1,6 \text{ мм}} = 0,0767 \text{ мкГн.}$$

Если обмотка будет содержать 160 витков, то индуктивность составит $L = 0,0767 \text{ мкГн} \cdot 160^2 = 1963 \text{ мкГн}$. Немного меньшая, по сравнению с расчетной, величина индуктивности влечет чуть больший, чем 10%, уровень пульсации тока, что вполне приемлемо.

Потери в феррите можно не учитывать, так как пульсации тока малы. Тем не менее, для проверки определим потери в феррите. Максимальная амплитуда пульсаций тока в катушке 0,2 А. Следовательно, амплитуда изменения плотности потока в сердечнике:

$$B = 1000 \cdot 1,257 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$0,2 \text{ А} \cdot 160 / 78,6 \text{ мм} = 25 \text{ мТ.}$$

При таком значении потока феррит 3С85 имеет удельные потери порядка 1 мкВт/мм³ на частоте 50 кГц. Объем сердечника 7640 мм³, потери в сердечнике пренебрежимо малы: 1 мкВт/мм³ · 7640 мм³ = 7,64 мВт.

Для оценки потерь в проводе вычислим сопротивление обмотки. При заполненном проводом окне сердечника ETD34 средний диаметр витка приблизительно равен 18 мм, средняя длина витка 56,5 мм, а общая длина провода при 160 витках составит около 9 м. Сопротивление провода диаметром 1,12 мм равно 0,018 Ом/м, сопротивление 9 метров провода составит 0,162 Ом. При токе 2 А потери в проводе не превысят 0,65 Вт.

Пример 2. Рассчитать первичную обмотку трансформатора двухтактного полумостового преобразователя с выходной мощностью 50 Вт, работающего на частоте 40 кГц от напряжения 300 В, т. е. непосредственно от выпрямленного сетевого напряжения.

Для полумостового преобразо-

вателя амплитуда сигнала в первичной обмотке равна половине от напряжения питания, в нашем случае это будет 150 В. Следует ожидать КПД преобразователя порядка 80%, мощность, потребляемая от источника, $P_{вх}=50 \text{ Вт}/0,8=62,5 \text{ Вт}$. Ток, проходящий через первичную обмотку, составит $I_{перв}=62,5 \text{ Вт}/150 \text{ В}=0,416 \text{ А}$.

При расчете зададим ток через индуктивность первичной обмотки (ток магнетизации) порядка 5% от $I_{перв}$, то есть 20,8 мА. Длительность импульсов при частоте 40 кГц составляет $t=12,5 \text{ мкс}$ в каждом полупериоде. По формуле (14) найдем минимальную требуемую индуктивность первичной обмотки:

$$L = \frac{150 \text{ В} \cdot 12,5 \text{ мкс}}{0,0208 \text{ А}} = 90,14 \text{ (мГн)}$$

Выберем сердечник E30/15/7, изготовленный из феррита 3С85, табличное значение $A_L=1,9 \text{ мкГн}$. По формуле (7) найдем количество витков в первичной обмотке:

$$N = (90140 \text{ мкГн}/1,9 \text{ мкГн})^{1/2} = 218 \text{ витков}$$

Эффективная длина сердечника 67 мм, эффективная проницаемость 1700. По формуле (8) находим амплитуду потока магнитной индукции:

$$B = 1000 \cdot 1,257 \cdot 10^{-3} \cdot 1700 \cdot \frac{0,0208 \text{ А} \cdot 218}{67 \text{ мм}} = 144,6 \text{ мТ}$$

Полученное значение несколько выше, чем хотелось бы иметь для малых потерь в феррите. Чтобы уменьшить поток магнитной индукции, увеличим количество витков на 20%, до 260. Новое значение индуктивности $L=1,9 \text{ мкГн} \cdot 260^2 = 128,44 \text{ мГн}$. Величина тока через индуктивность первичной обмотки

$$I = \frac{150 \text{ В} \cdot 12,5 \text{ мкс}}{128440 \text{ мкГн}} = 0,0146 \text{ А}$$

Амплитуда потока магнитной индукции с новой обмоткой

$$B = 1000 \cdot 1,257 \cdot 10^{-3} \cdot 1700 \cdot \frac{0,0146 \text{ А} \cdot 260}{67 \text{ мм}} = 121 \text{ мТ}$$

Заметим, что при увеличении количества витков поток магнитной индукции уменьшился

пропорционально. Объем сердечника 4000 мм^3 , по номограмме (рис. 2) находим, что феррит 3С85 на частоте 50 кГц имеет удельные потери приблизительно $0,07 \text{ мВт}/\text{мм}^3$ при 120 мТ. Потери в сердечнике при частоте 40 кГц будут еще ниже и не превысят $4000 \text{ мм}^3 \cdot 0,07 \text{ мВт}/\text{мм}^3 = 280 \text{ мВт}$.

Для суммарного тока первичной обмотки $0,416+0,0146=0,43 \text{ А}$ выберем провод диаметром 0,5 мм. Полная площадь окна сердечника для намотки провода $6 \cdot 20=120 \text{ мм}^2$, так что мы без труда разместим первичную обмотку в одной половине сердечника, на отдельной секции каркаса. Средняя длина витка составляет приблизительно 80 мм, длина 260 витков – приблизительно 21 м. Сопротивление провода $0,0903 \text{ Ом}/\text{м}$, сопротивление первичной обмотки $1,9 \text{ Ом}$. Форма тока в обмотке – двуполярная прямоугольная, для расчета потерь в проводе ток можно считать постоянным. По формуле (12) потери в меди равны $0,35 \text{ Вт}$.

Пример 3. Рассчитать трансформатор для ИИП, работающего “на обратном ходе ключа”. Минимальное входное напряжение 9 В, выходное напряжение 5 В, частота 50 кГц, максимальная скважность 2.

Напряжение на вторичной обмотке должно быть выше выходного на величину падения напряжения на выпрямительном диоде. Используем диод Шоттки с максимальным прямым падением напряжения 0,8 В, напряжение на обмотке $5+0,8=5,8 \text{ В}$. Ток нагрузки 1 А, мощность на вторичной обмотке $5,8 \cdot 1 = 5,8 \text{ Вт}$.

Ожидаемый КПД трансформатора 90%, мощность, потребляемая от источника питания, $5,8/0,9=6,44 \text{ Вт}$. При частоте 50 кГц в каждом цикле работы мы должны накапливать в сердечнике энергию не менее $6,44/50 = 0,128 \text{ мДж}$. На частоте 50 кГц при скважности 2 длительность открытого состояния ключа равна $1/(2 \cdot 50 \text{ кГц})=10 \text{ мкс}$. Подставив в выражение (16) правую часть выражения (15), получим $E = U \cdot t \cdot I$, откуда находим ток через первичную обмотку:

$$I = \frac{128 \text{ мкДж}}{9 \text{ В} \cdot 10 \text{ мкс}} = 1,42 \text{ А}$$

Используя выражение (15), определим максимально допустимую индуктивность первичной обмотки:

$$9 \text{ В} \cdot 10 \text{ мкс}$$

$$L_{\text{макс}} = \frac{1,42 \text{ А}}{63,4 \text{ мкГн}} = 1,42 \text{ А}$$

Выберем сердечник P14/8 (российский аналог – Б14) из материала 3F3 (в качестве аналога можно взять 1500ММ) и введем в него прокладку толщиной 0,2 мм, суммарный зазор 0,4 мм. Согласно формуле (5):

$$A_L = \frac{2 \text{ мкГн} \cdot 19,8 \text{ мм}}{1250 \cdot 0,4 \text{ мм}} = 0,0792 \text{ мкГн}$$

Для получения индуктивности 63,4 мкГн требуется намотать 28,3 витка. Округляем значение до 28 витков, при этом индуктивность уменьшится до 62 мкГн, а ток возрастет до 1,45 А. Эффективная проницаемость сердечника $\mu_e = 19,8 \text{ мм}/0,4 \text{ мм} = 49,5$, максимальное значение потока магнитной индукции $B = 127,6 \text{ мТ}$. Объем сердечника 495 мм^3 , удельные потери в феррите по номограмме (рис. 3) равны примерно $0,05 \text{ мВт}/\text{мм}^3$, потери в феррите $495 \cdot 0,05 = 24,8 \text{ мВт}$.

Количество витков во вторичной обмотке $N_2=28 \cdot 5,8 \text{ В}/9 \text{ В} = 18$. При таком соотношении витков обеспечивается полная передача накопленной в сердечнике энергии в нагрузку за вторую половину периода (т.е. за 10 мкс) при напряжении на вторичной обмотке 5,8 В.

Выбор провода обмоток и расчет потерь в нем предоставим читателям в качестве самостоятельного упражнения.

Литература

1. PHILIPS. *Soft Ferrites Data Handbook MA01*, 1998. Eindhoven, The Netherlands. Document order number 536910/30 000/pp880.
2. SIEMENS MATSUSHITA COMPONENTS. *Ferrites and Accessories Data Book 1997*. Munchen, Germany. Document ordering No. B461-P6151-X-X-7600.
3. TDK. *Ferrite Cores for Power Supply and EMI/RFI Filter*, 1989. Japan
4. THOMSON LCC. *Soft Ferrites Selection Guide*, 1989. Courbevoie Cedex, France.

Алексей Кузнецов
akouz@senet.com.au