

Сердечники из распылённого железа в импульсных источниках питания

Печатается с разрешения журнала CHIP NEWS Украина (<http://chipnews.com.ua>)

Джим Кокс (Великобритания)

Перевод Артёма Терейковского

В статьях этого цикла описываются магнитные свойства различных марок распылённого железа фирмы Micrometals и особенности использования сердечников в сглаживающих дросселях, дифференциальных сетевых фильтрах, корректорах коэффициента мощности, дросселях электронных балластов ламп дневного света и высокочастотных преобразователях резонансного типа. Будут приведены примеры расчётов, а также рассмотрен метод аналитического определения потерь в сердечниках.

ВВЕДЕНИЕ

Распылённое железо в течение многих лет используется в качестве материала при изготовлении разнообразных сердечников для работы в широком диапазоне частот. Присущая этому материалу структура с распределённым воз-

душным зазором в сочетании с высокой индукцией насыщения делает его наиболее подходящим для различных применений, требующих накопления энергии в зазоре сердечника. При наименьшей стоимости среди аналогичных материалов сердечники из рас-

пылённого железа могут успешно заменять более дорогие из молипермалоя, материала HiFlux и альсифера (KoolMu). Они также могут применяться вместо ферритов с зазором и ленточных магнитопроводов из металлических сплавов (типа Гаммамет) с зазором.

Сердечники из распылённого железа изготавливаются из мельчайших частиц порошка железа высокой чистоты. Подготовленный порошок подвергается воздействию очень высокого давления для придания сердечнику необходимой формы и прочности. При этом создаётся магнитная структура с распределённым воздушным зазором.

Существующие технологии позволяют изготавливать сердечники различных форм и размеров. При помощи одной пресс-формы можно получить несколько отличающихся по толщине сердечников в зависимости от развиваемого прессом давления.

Распылённое железо допускает достаточно жёсткие условия эксплуатации. Оно имеет относительно высокую температурную стабильность и выдерживает значительные механические нагрузки без заметных изменений свойств, однако подвержено т.н. термическому старению, поэтому непригодно для длительной работы при высоких температурах.

Магнитные свойства распылённого железа наилучшим образом подходят для различных типов дросселей, однако не являются оптимальными при использовании в трансформаторах.

Общие свойства различных марок (смесей) приведены в табл. 1.

Относительная стоимость показывает сравнительную цену продажи колец диаметром 1 дюйм. Кольца меньших диаметров имеют менее значительную разницу в цене.

Типичные применения различных смесей представлены в табл. 2.

ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

- Смесей -2...-14 с низкой проницаемостью предназначены для работы

Таблица 1. Общие свойства различных марок распылённого железа

Номер смеси	Начальная проницаемость	Плотность (г/см ³)	Относительная стоимость	Цветная маркировка
-2	10	5,0	2,7	Красный/нет цвета
-8	35	6,5	5,0	Жёлтый/красный
-14	14	5,2	3,6	Чёрный/красный
-18	55	6,6	3,4	Салатовый/красный
-19	55	6,8	1,7	Красный/салатовый
-26	75	7,0	1,0	Жёлтый/белый
-30*	22	6,0	1,4	Салатовый/серый
-34*	33	6,2	1,5	Серый/голубой
-35*	33	6,3	1,4	Жёлтый/серый
-38	85	7,1	1,1	Серый/чёрный
-40	60	6,9	1,0	Салатовый/жёлтый
-45	100	7,2	2,6	Чёрный/чёрный
-52	75	7,0	1,4	Салатовый/голубой

*Смесь -30 была разработана как улучшенная замена смеси -28. Аналогично смеси -34 и -35 имеют меньшие потери и стоимость, чем предшествующая -33. Смесей -28 и -33 не представлены в этой таблице, но по-прежнему производятся.

Таблица 2. Типичные области применения различных марок распылённого железа

Типичное применение	-2	-8	-14	-18	-19	-26	-30	-34	-35	-38	-40	-45	-52
Дроссели электронных балластов ламп дневного света						■				■	■	■	
Дроссели фильтров дифференциальных ЭМ помех						■				■	■	■	■
Дроссели с подмагничиванием: <50 кГц, малое значение Et/N						■	■	■	■	■	■	■	
Дроссели с подмагничиванием: ≥50 кГц, большое значение Et/N		■	■	■	■		■	■	■				■
Корректоры коэффициента мощности: <50 кГц						■	■	■	■		■		
Корректоры коэффициента мощности: ≥50 кГц	■	■	■	■	■		■	■	■				■
Дроссели в резонансных преобразователях: ≥50 кГц	■		■										

при меньших (по сравнению с другими материалами) значениях переменной индукции. Смесь -14 имеет немного большую проницаемость, чем -2.

- Смесь -8 – наилучший, но самый дорогой из высокочастотных материалов. Имеет наименьшие потери и нелинейность проницаемости при значительных токах смещения/подмагничивания.
- Смесь -18 имеет сравнимые со смесью -8 низкие потери при несколько более высокой проницаемости и меньшую стоимость. Прекрасные характеристики при значительных токах смещения/подмагничивания.
- Смесь -19 – недорогая альтернатива смеси -18. Имеет такую же проницаемость при незначительно больших потерях.
- Смесь -26 – широко применяемый материал. Экономически наиболее эффективен в разнообразных импульсных источниках питания и фильтрах электромагнитных помех. В последние годы заменяется улучшенной смесью -52.
- Смесь -30: малая нелинейность проницаемости, низкая цена и относительно невысокая проницаемость сделали этот материал наиболее популярным при создании мощных источников бесперебойного питания (UPS).
- Смеси -34 и -35 – недорогая альтернатива смеси -8 для применений, некритичных к уровню потерь на высоких частотах. Имеют малую нелинейность проницаемости при значительных токах смещения/подмагничивания.
- Смесь -40 – самый дешёвый материал. Характеристики подобны характеристикам популярной смеси -26. Чаще всего применяются кольца больших размеров.
- Смесь -45 имеет самую высокую проницаемость. Заменяет смесь -52 при более высоком уровне потерь.
- Смесь -52 имеет меньшие потери на высоких частотах и такую же проницаемость, что и другой популярный материал -26. Широко используется при изготовлении дросселей фильтров, работающих на высоких частотах.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сердечники из расплывённого железа содержат органический компонент, поэтому подвержены т.н. тер-

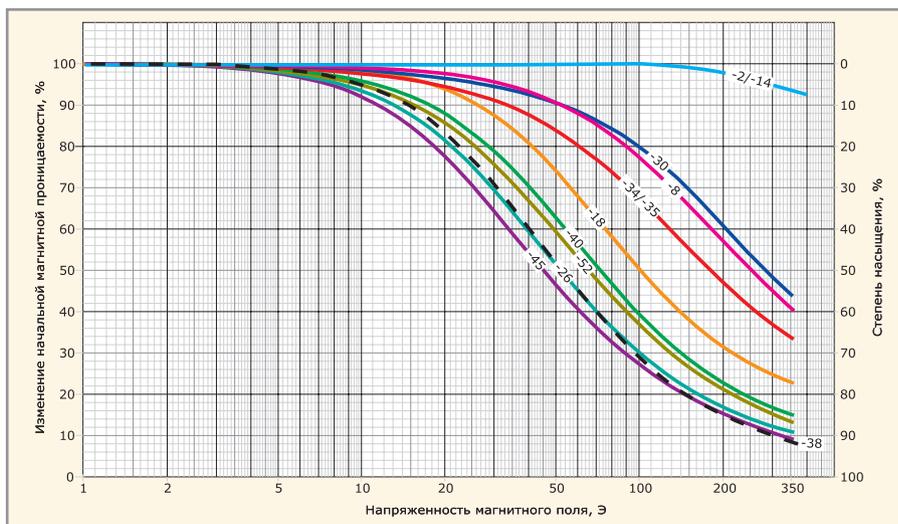


Рис. 1. Зависимость степени насыщения от напряжённости постоянного магнитного поля для различных материалов

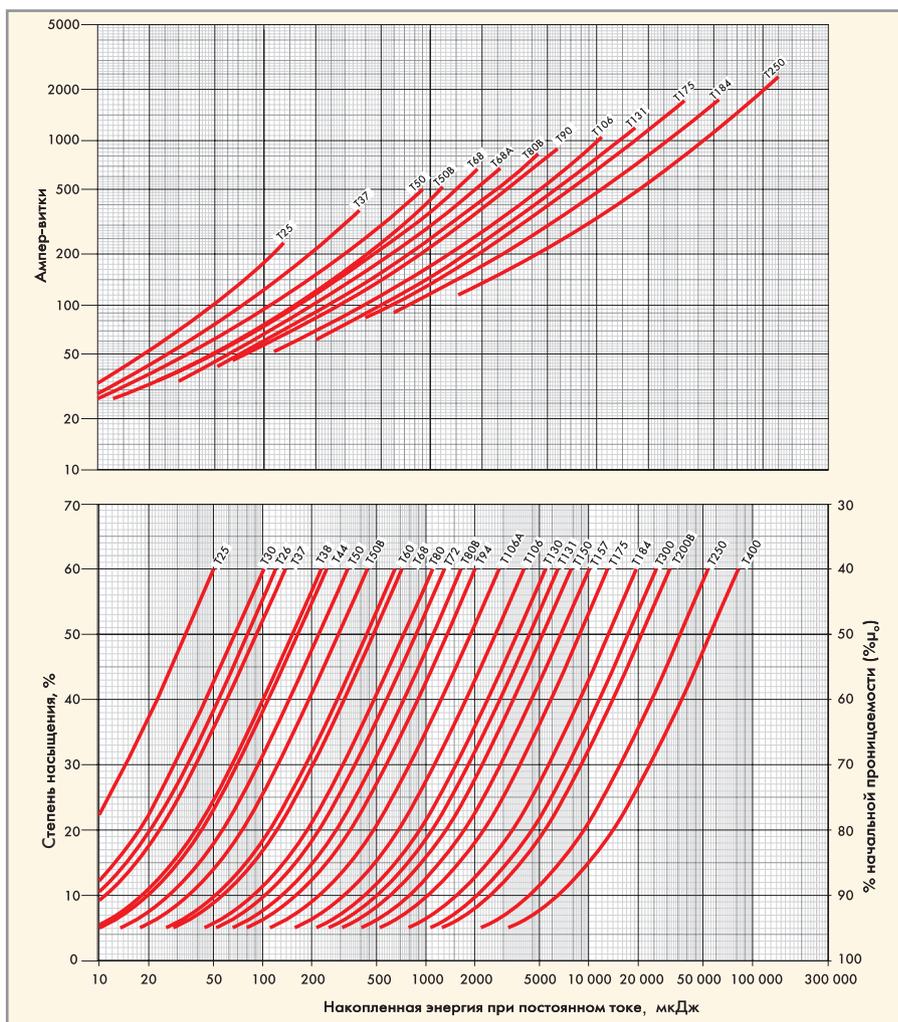


Рис. 2. Соотношение числа ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -52

мическому старению. При работе в условиях повышенной температуры окружающей среды или вследствие высоких потерь в сердечнике постепенно происходит уменьшение проницаемости и снижение добротности. Масштабы этих изменений в зна-

чительной степени зависят от времени, температуры, размеров сердечника, рабочей частоты и плотности магнитного потока. Данные факторы обязательно следует учитывать при рабочих температурах, превышающих 75°C. Снижение температуры до

-65°C не вызывает необратимых изменений параметров.

В мощных устройствах потери в сердечнике вносят заметный вклад в повышение рабочей температуры всего устройства. При этом снижение добротности увеличивает потери на вихревые токи, что является причиной дополнительного разогрева сердечника и может вызвать необратимые изменения, вследствие чего сердечник из магнетодиелектрика превращается в проводник. Следует избегать разработок, в которых потери в сердечнике превышают потери в меди. Потери на гистерезис не изменяются вследствие термического старения.

Подробно термическое старение будет рассмотрено в одной из последующих статей этого цикла.

Таблица 3. Накапливаемая в сердечнике энергия при различных температурах перегрева для материала -52

Кольцо	Пульсации < 1%, $B_{pk} = 1$ мТл					
	«полная» намотка			однослойная намотка		
	10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C
T25	4,0	10	16	2,1	5,6	9,2
T26	7,4	19	30	3,8	10	17
T30	10	25	38	5,3	14	22
T37	19	46	68	10	26	41
T38	25	65	96	13	35	56
T44	36	87	125	19	50	78
T50	67	155	255	37	94	138
T50B	89	200	295	48	120	180
T60	135	310	450	75	185	280
T68	155	350	510	88	210	320
T68A	210	470	700	115	300	430
T72	190	450	680	100	260	400
T80	330	720	1040	190	440	650
T80B	500	1080	1550	280	650	970
T94	660	1400	2000	349	860	1250
T106	1250	2650	3800	710	1650	2400
T106A	880	1850	2700	500	1150	1700
T130	2240	4650	6650	1300	2900	4250
T131	2050	4450	6450	1150	2750	4000
T150	3350	6850	9900	2000	4300	6250
T157	4700	9800	13 900	2800	6150	8900
T1 75	6800	14 100	19 700	4100	8850	12 700
T184	8700	18 200	25 600	5250	11 200	16 400
T200B	14 900	30 500	42 600	9150	19 400	27 800
T250	28 200	57 500	81 800	17 100	36 600	52 800
T300	24 900	49 700	67 700	15 400	31 600	45 600
T400	67 800	134 000	174 000	42 300	86 000	124 000

ПОКРЫТИЕ

Тороидальные сердечники типов T14, T16 и T20 имеют париленовое покрытие (Parylene C). Сердечники больших размеров имеют двухцветное покрытие, сертифицированное Лабораторией по технике безопасности США. Все покрытия выдерживают действующее значение переменного напряжения 500 В, 60 Гц и воздействия большинства растворителей. Длительное воздействие некоторых растворителей может повредить покрытие.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Количество накапливаемой дросселем энергии вычисляется как половина произведения индуктивности на квадрат тока. Эта энергия пропорциональна квадрату действующего значения плотности магнитного потока, делённого на эффективную проницаемость сердечника в данных условиях. Для материалов, имеющих высокую начальную проницаемость (ферриты), введение воздушного зазора позволяет снизить эффективную проницаемость и увеличить количество накапливаемой в сердечнике энергии за счёт дополнительной энергии, накапливаемой в зазоре.

При разработке накопительных дросселей ограничения наступают вследствие насыщения сердечника или из-за перегрева, вызванного совокупными потерями в сердечнике и обмотке. В случае использования расплывлённого железа ограничения, определяемые допустимым перегревом, сказываются задолго до магнитного насыщения сердечника благодаря сравнительно низкой (<100) проницаемости, умеренным потерям и «мягкой» характеристике насыщения.

Зависимости изменения проницаемости от напряжённости постоянного магнитного поля для различных смесей показаны на рис. 1. Для смесей с высокой начальной проницаемостью, таких, как -26 и -52, допустимой считается эксплуатация при снижении проницаемости на 50%.

На рис. 2 показано семейство кривых, иллюстрирующих соотношение между ампер-витками и количеством накапливаемой энергии колец из смеси -52 при условии, что почти весь ток, протекающий через обмотку, является постоянным. Это означает, что переменная составляющая тока достаточно мала и не вызывает за-

метных потерь в сердечнике. Как видно из графиков, чем больше произведение IN (ампер-витки), тем больше энергии накапливает сердечник.

Например, при воздействии 150 ампер-витков кольцо T68-52 накапливает 260 мкДж. Соответственно, при 600 ампер-витках накапливаемая энергия составляет 1400 мкДж. Эти результаты определяются начальной индуктивностью A_L (нГн/вит²) и характеристикой насыщения материала.

Как было замечено выше, в большинстве случаев допустимый температурный перегрев ограничивает количество накапливаемой в сердечнике энергии ещё до достижения магнитного насыщения материала. В таблице 3 приведены максимальные значения накапливаемой энергии при заданном превышении температуры для двух способов намотки. Из этой таблицы видно, что при однослойной намотке (80% внутреннего диаметра кольца остаётся незаполненным) кольцо T68-52 может накопить 245 мкДж при перегреве на 40°C. Следовательно, в приведённом выше примере значении 150 ампер-витков для накопления 260 мкДж приведёт к разогреву немного более чем 40°C. При заполнении внутреннего диаметра на 55% накопленная в сердечнике энергия 260 мкДж вызовет повышение температуры менее чем на 25°C. Такая разница в значениях температуры определяется диаметром используемых проводов.

Информация, приведённая в таблице 3, получена экспериментально при длительной работе дросселя без воздушного обдува. При этих условиях, как видно из примера выше, для накопления 1400 мкДж кольцо T68-52 «потребует» 600 ампер-витков, что вызовет недопустимый перегрев из-за повышенных потерь в обмотке.

ПОТЕРИ В ОБМОТКЕ

Обычный метод выбора диаметра провода, основанный на способности провода определённого сечения пропустить через себя ток определённой силы, даёт некорректный результат. Повышение температуры дросселя, вызванное потерями в обмотке, напрямую связано с размерами кольца, диаметром провода и способом намотки. Например, температура дросселя постоянного тока, имеющего незначительный скин-эффект, намотанного в один слой проводом 0,404 мм для тока 1 А, повысит-

ся всего на 10°C. Тот же метод порекомендует провод 2,05 мм для тока 25 А, что повлечёт повышение температуры на 40°C.

При намотке в один слой повышение температуры зависит от плотности тока в обмотке и не зависит от размеров кольца. С учётом этой особенности была получена табл. 4, в которой опре-

делены значения тока и диаметры проводов для допустимого повышения температуры на 10, 25 и 40°C.

Например, как следует из этой таблицы, для тока 3 А при однослойной обмотке и допустимом нагреве на 10°C следует использовать провод диаметром 0,912 мм. Если допустимый нагрев из-за потерь в меди не бо-

лее 25°C, этот же диаметр может пропустить ток до 5,26 А. При повышении температуры на 40°C ток может достигать 6,81 А.

Подобная таблица разработана для «полной» намотки (незаполненными остаются 45% внутреннего диаметра кольца). При постоянном коэффициенте заполнения медью становится

Таблица 4. Зависимость числа витков от диаметра провода при однослойной намотке

Намотка в один слой																				
Диаметр провода, мм		0,32	0,404	0,511	0,643	0,813	0,912	1,02	1,15	1,29	1,45	1,63	1,83	2,05	2,30	2,60	Общая рассеиваемая мощность, Вт, при температуре			
R/l, МОм/см		2,13	1,34	0,842	0,53	0,33	0,64	0,21	0,166	0,132	0,104	0,0828	0,0651	0,0521	0,0413	0,0328				
Максимальный ток, А, при дополнительном разогреве	10°C	0,64	0,90	1,29	1,83	2,62	3,12	3,72	4,45	5,33	6,35	7,60	9,03	10,60	12,90	15,40				
	25°C	1,07	1,52	2,17	3,09	4,41	5,26	6,27	7,50	8,97	10,70	12,80	15,20	18,20	21,70	26,00				
		40°C	1,38	1,97	2,81	4,00	5,70	6,81	8,11	9,70	11,60	13,80	16,80	19,70	23,50	28,10	33,60			
Тип	Средняя длина, см/вит.	Площадь поверхности, см ²	Число витков														10°C	25°C	40°C	
T16	0,80	0,80	9	6	4	2	1											0,013	0,038	0,067
T20	0,96	1,16	11	8	5	3	2	1										0,016	0,055	0,097
T25	1,19	1,88	18	14	10	7	5	4	3	2	1							0,03	0,089	0,157
T30	1,44	2,79	25	20	15	11	7	6	5	4	3	2	1	1				0,044	0,133	0,233
T37	1,53	4,77	37	29	22	17	12	11	9	7	6	5	4	3	2	1	1	0,06	0,18	0,316
T44	1,84	5,23	43	34	26	20	15	13	11	9	7	6	5	4	3	2	1	0,083	0,249	0,437
T50	2,01	6,86	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	0,109	0,326	0,574
T50B	2,32	7,83	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	0,125	0,373	0,659
T50D	2,95	9,87	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	0,157	0,47	0,826
T60	2,48	9,84	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	0,156	0,468	0,824
T60D	3,68	14,3	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	0,228	0,681	1,2
T68	2,47	11,2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	0,178	0,533	0,936
T68D	3,41	15,2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	0,241	0,722	1,27
T80	2,8	15,5	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	7	0,246	0,736	1,3
T80D	4,07	22	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	7	0,35	1,05	1,84
T90	3,64	22,4	115	92	72	57	44	39	34	30	26	23	20	17	15	13	11	0,356	1,07	1,88
T94	3,44	22	117	94	74	58	45	40	35	31	27	24	21	18	15	13	11	0,35	1,05	1,85
T106	4,49	31	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	0,492	1,47	2,59
T106A	3,86	26,8	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	0,427	1,28	2,25
T130	4,75	42,2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20	17	0,671	2,01	3,53
T131	5,11	42,1	134	107	85	67	52	46	41	36	32	28	24	21	18	16	13	0,669	2	3,52
T141	4,75	46,8	188	151	119	95	75	66	59	52	46	40	35	31	27	24	20	0,744	2,23	3,92
T150	5,28	53,2	180	145	114	91	71	63	56	49	44	34	38	29	26	22	19	0,846	2,53	4,45
T157	5,89	63,2	204	164	129	103	81	72	64	56	50	44	39	34	30	26	23	1,01	3,01	5,29
T175	6,58	79,1	230	186	147	117	92	82	73	64	57	50	44	39	34	30	26	1,26	3,76	6,16
T184	7,54	89,2	202	63	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1,42	4,25	7,47
T200	6,5	90,9	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1,45	4,33	7,61
T225	6,93	109	305	245	195	155	123	109	97	86	76	68	60	53	46	41	36	1,74	5,21	9,16
T250	10,4	166	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	2,63	7,68	13,9
T300	7,95	173	422	341	271	216	171	153	131	121	108	96	85	75	66	58	52	2,75	8,23	14,5
T300D	10,5	223	422	341	271	216	171	153	131	121	108	96	85	75	66	58	52	3,55	10,6	18,7
T400	11,1	301	494	399	317	254	201	179	160	142	136	113	100	88	78	69	61	4,79	14,3	25,2
T400D	14,4	384	494	399	317	254	201	179	160	142	136	113	100	88	78	69	61	6,1	18,2	32,1
T520	13,7	496	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	7,88	23,6	41,5
T650	23,1	986	769	621	494	395	315	281	250	223	199	177	158	139	124	110	98	15,7	46,9	82,5

возможным определить значения ампер-витков как функцию допустимого повышения температуры для различных типоразмеров колец. В табл. 5 приведены максимальные допустимые значения ампер-витков при заданном нагреве 10, 25 и 40°C соответственно, возникающем из-за потерь в обмотке, для некоторых типоразмеров колец.

В таблицах 4 и 5 приведены значения удельного сопротивления (мОм/см) проводов различного диаметра, а также средняя длина витка для колец различного диаметра. Благодаря этому сопротивление обмотки может быть определено простым перемножением удельного сопротивления провода на среднюю длину витка и на количество витков. Также приведены значения эффективной площади поверхности (см²) типичных точных изделий на основе колец различного диаметра. Эта информация полезна при определении температуры нагрева как функции рассеиваемой

мощности. При получении данных обеих таблиц использовалась следующая формула:

$$T = \left[\frac{\text{Суммарная рассеиваемая мощность, мВт}}{\text{Площадь поверхности, см}^2} \right]^{0,833}$$

Во многих устройствах переменная составляющая тока, протекающего через дроссель, достаточно мала, чтобы вызвать заметные потери, однако в случаях, когда пульсации имеют высокую частоту повторения, при разработке дросселей корректоров коэффициента мощности и высоковольтных устройств потери должны приниматься во внимание. Конструкции дросселей сетевых (50...60 Гц) фильтров дифференциальных помех и преобразователей напряжения резонансного типа в значительной степени определяются уровнем потерь в сердечнике.

ПОТЕРИ В СЕРДЕЧНИКЕ

Потери в сердечнике возникают вследствие переменного магнитно-

го поля в сердечнике. Потери для конкретного материала зависят от рабочей частоты и размаха магнитной индукции (ΔB) и пропорциональны площади петли гистерезиса. Они имеют три составляющие: потери на перемагничивание (гистерезис), вихревые токи и остаточные потери.

Распылённое железо имеет более высокие потери по сравнению с другими материалами с высокой индукцией насыщения (Мо-пермаллой, альсифер), что может ограничить его применение при относительно большом токе пульсаций на высоких частотах. Следовательно, важно уметь правильно определять реальные потери в сердечнике.

Зависимость мощности рассеивания от амплитуды размаха магнитной индукции для материала -52 показана на рис. 3. Информация получена экспериментальным путём при помощи ваттметра фирмы Clarke-Hesse.

Таблица 5. Зависимость числа витков от диаметра провода при многослойной намотке

«Полная» намотка (заполнение внутреннего диаметра 55%)																							
Диаметр провода, мм		0,32	0,404	0,511	0,643	0,813	0,912	1,02	1,15	1,29	1,45	1,63	1,83	2,05	2,3	2,6	Ампер-витки при температуре нагрева из-за потерь в обмотке			Общая рассеиваемая мощность, Вт, при температуре нагрева			
Удельное сопротивление, мОм/см		2,13	1,34	0,842	0,53	0,33	0,264	0,21	0,166	0,132	0,104	0,0828	0,0651	0,0521	0,0413	0,0328	10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C	
Тип	Средняя длина, см/вит.	Площадь поверхности, см ²	Число витков														10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C	
T16	0,80	0,80	13	8	5	3	2	1	1	1							10	17	23	0,013	0,038	0,067	
T20	0,96	1,16	16	6	4	2	2	1	1	1	1						12	21	29	0,016	0,055	0,097	
T25	1,19	1,88	30	20	12	8	5	4	3	2	2	1	1	1			19	34	45	0,03	0,089	0,157	
T30	1,44	2,79	48	32	20	13	8	6	5	4	3	2	2	1	1		27	47	62	0,044	0,133	0,233	
T37	1,53	3,77	90	59	37	24	15	12	9	7	6	5	4	3	2	1	42	72	96	0,06	0,18	0,316	
T44	1,84	5,23	112	73	46	30	19	15	12	9	7	6	5	3	3	2	2	50	87	110	0,083	0,249	0,437
T50	2,01	6,86	196	128	81	52	33	26	21	17	13	10	8	6	5	4	3	73	120	160	0,109	0,326	0,574
T60	2,48	9,84	241	158	100	65	41	33	26	21	16	13	10	8	6	5	4	87	150	200	0,156	0,468	0,824
T68	2,47	11,2	293	192	122	78	50	40	32	25	20	16	13	10	8	6	5	100	170	230	0,178	0,533	0,936
T72	3,15	13,3	168	110	69	45	28	22	18	14	11	9	7	5	4	3	3	75	130	170	0,212	0,634	1,11
T132	4,95	42,2	1050	687	437	282	179	143	114	91	73	58	46	36	29	23	18	260	460	610	0,671	2,01	3,53
T157	5,89	63,2	1933	1266	805	520	329	263	210	168	134	107	85	67	53	42	34	400	700	930	1,01	3,01	5,29
T175	6,58	79,1	2453	1605	1021	659	418	334	267	213	170	136	108	85	68	54	43	480	830	1110	1,26	3,76	6,16
T184	7,54	89,2	1933	1256	805	520	329	263	210	168	134	107	85	67	53	42	34	420	730	970	1,42	4,25	7,47
T200	6,5	90,9	3348	2192	1393	933	571	456	365	290	232	186	148	116	93	74	59	510	1050	1400	1,45	4,33	7,61
T225	6,93	109	4230	2770	1760	1137	721	577	461	367	294	235	186	147	117	93	74	720	1260	1670	1,74	5,21	9,16
T250	10,4	166	3348	2192	1393	900	571	456	365	290	232	186	148	116	93	74	59	650	1120	1490	2,63	7,68	139
T300	7,95	173	7981	5277	3322	2146	1361	1089	870	693	554	443	352	278	221	176	140	1170	2030	2690	2,75	8,23	14,5
T400	11,1	301	10800	7104	4515	2916	1850	1480	1162	942	754	602	479	376	301	240	191	1530	2650	3510	4,79	14,3	25,2
T520	13,7	496	20300	13300	8461	5465	3467	2773	2261	1765	1413	1129	898	708	564	450	358	2420	4180	5550	7,88	23,6	41,5
T650	23,1	986	26200	17200	10900	7057	4477	3581	2861	2280	1824	1458	1159	914	729	581	463	2980	5170	6850	15,7	46,9	82,5

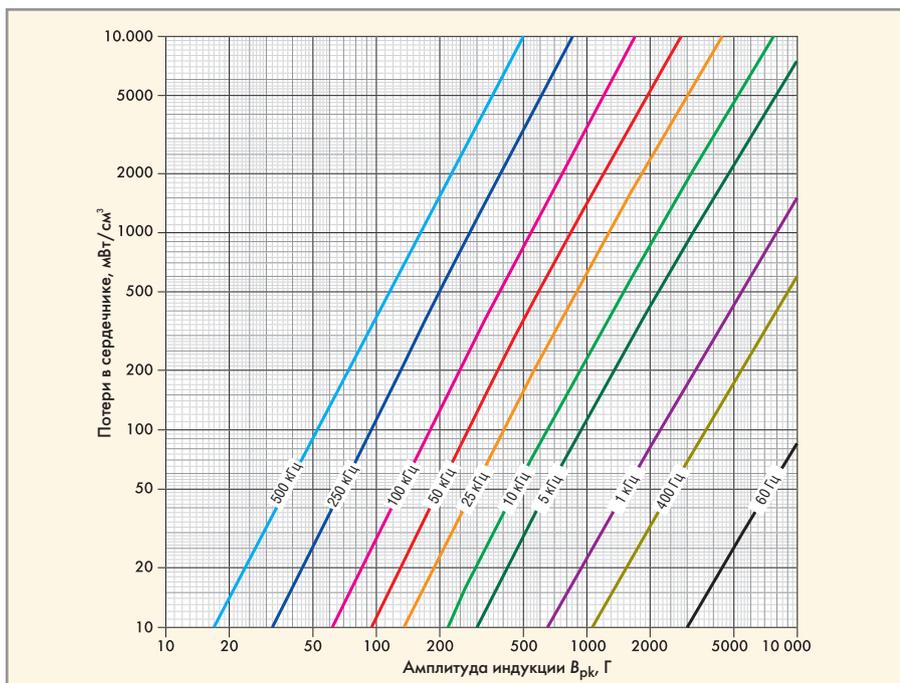


Рис. 3. Зависимость потерь материала -52 от амплитуды индукции переменного поля

Для описания амплитуды магнитной индукции используется следующая формула:

$$B_{pk} = \frac{E_{RMS} \times 10^8}{4,44ANf}$$

где B_{pk} – амплитудное значение магнитной индукции (Г), E_{RMS} – действующее значение напряжения (В), A – площадь эффективного сечения сердечника ($см^2$), N – число витков, f – частота (Гц).

Эта формула применима для вычисления амплитудного значения индукции, из которого определяется уровень потерь по рис. 3, при синусоидальной форме тока в обмотке. При этом в сердечнике возникает магнитная индукция, размах которой (ΔB) вдвое превышает полученное по формуле амплитудное значение (B_{pk}) (см. рис. 4).

Подмагничивание сердечника постоянным током сдвигает частную петлю гистерезиса, но не вызывает заметных дополнительных потерь в сердечнике. Потери зависят только от размаха переменной магнитной индукции (ΔB).

На рис. 5 изображена типичная форма прямоугольного сигнала, воздействующего на дроссель в импульсном источнике питания.

Так как произведения Et (вольт-секунд) во время включенного и выключенного полупериодов должны быть равны при неизменной скважности, размах индукции ΔB для прямоугольного сигнала (не обязательно

симметричного) описывается следующей формулой в системе СГС:

$$\Delta B = \frac{E_{pk} t \times 10^8}{AN}$$

где ΔB – размах индукции (Г), E_{pk} – амплитуда напряжения на дросселе

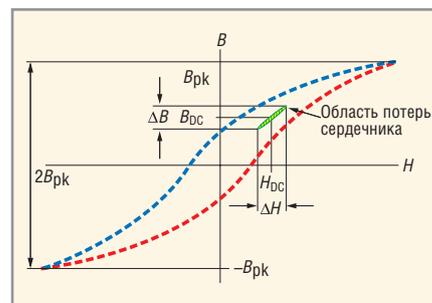


Рис. 4. Потери в сердечнике при подмагничивании постоянным током

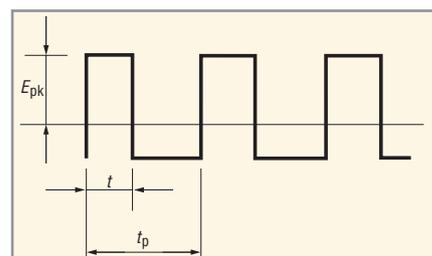


Рис. 5. Типичная форма напряжения на дросселе импульсного преобразователя

(В) за время t , t – продолжительность замкнутого состояния ключа (с), A – эффективная площадь сечения сердечника ($см^2$), N – число витков.

В однополярных применениях, например, обратных источников питания, приведённые выше

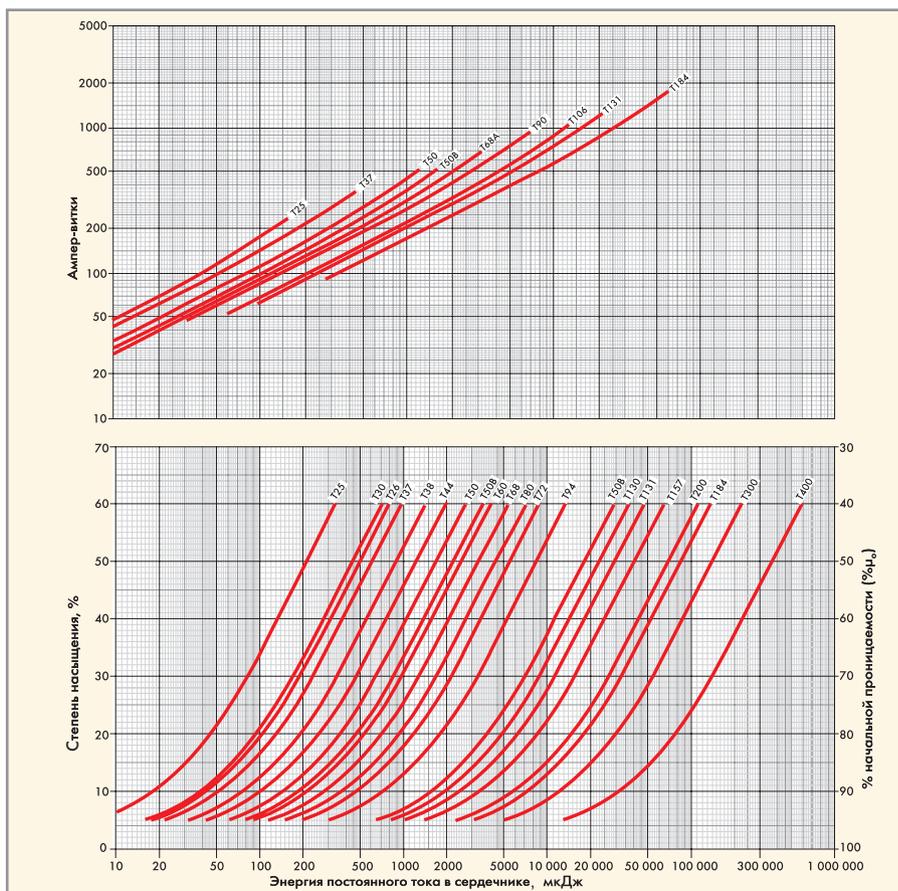


Рис. 6. Соотношение числа ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -8

формулы следует использовать для проверки превышения допустимого для сердечника размаха индукции.

В связи с тем, что на практике принято описание потерь сердечника как функции амплитудного значения магнитной индукции при симметричной форме сигнала, приведённые кривые потерь подразумевают амплитудное значение индукции B_{pk} , равное половине размаха ΔB . Частота пульсаций, соответственно, равна $1/tp$.

Таблица 6. Рассеиваемая мощность при допустимом перегреве

Кольцо	10°C	25°C	40°C
T30	400	1148	2026
T50	307	874	1535
T80	212	602	1056
T94	160	454	802
T130	117	331	582
T200	87	260	436
T400	43	130	228

Таблица 7. Накапливаемая в сердечнике энергия при различных температурах перегрева для материала -8

Кольцо	Пульсации < 1%, $B_{pk} = 1$ мТл					
	«полная» намотка			однослойная намотка		
	10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C
T25	1,9	5,6	9,6	1,0	2,8	4,8
T26	3,4	10	17	1,7	5,0	8,6
T30	5,1	15	25	2,5	7,5	12
T37	10	29	50	5,1	14	25
T38	11	34	58	5,9	17	29
T44	22	63	105	10	32	54
T50	44	125	210	22	64	110
T50B	59	160	270	29	84	140
T60	68	190	320	34	99	170
T68	98	277	460	49	140	240
T80	190	530	880	98	270	470
T90	440	1200	2000	220	630	1060
T94	400	1080	1800	200	570	960
T106	800	2150	3660	400	1150	1930
T130	1450	3950	6400	750	2050	3400
T131	1400	3850	6350	700	2000	3350
T1S7	3100	8350	13 400	1550	4400	7300
T184	5900	16 100	25 700	3040	8500	14 100
T200	6950	18 100	28 400	3550	9800	16 000
T300	21 300	53 600	82 600	11 200	30 000	47 700
T400	58 500	144 000	223 000	29 400	81 600	130 000

В большинстве случаев для расчёта амплитудного значения индукции в дросселе с постоянным током подмагничивания используются следующая формула:

$$B_{pk} = \frac{E_{pk} t \times 10^8}{2AN},$$

где $B_{pk} = \Delta B/2$ – амплитуда переменной индукции (Г), E_{pk} – амплитуда напряжения на дросселе (В) за время t , t – продолжительность замкнутого состояния ключа (с), A – эффективная площадь сечения сердечника (см²), N – число витков.

Для расчётов дросселей со связанными обмотками используются те же формулы при допущении, что дроссель имеет одну обмотку, так как все обмотки работают согласованно и значения вольт-секунд на виток для них одинаковы.

В некоторых применениях, например, корректорах коэффициента мощности, форма сигнала не является симметричной, так как соотношение времени включенного и выключенного состояния ключа непрерывно меняется в течение периода основной частоты (50 или 60 Гц). В этом случае потери в сердечнике определяются как усреднённые во времени потери от каждого воздействующего импульса. Возбуждаемая магнитная индукция пропорциональна произведению Et , в то время как потери в сердечнике приблизительно пропорциональны квадрату индукции. Для оценки потерь на высоких частотах в подобных устройствах рекомендуется использовать предыдущую формулу, в которую подставляется усреднённое действующее значение напряжения за период рабочей частоты корректора ($1/tp$).

Помимо рабочей частоты, основная частота (50 или 60 Гц) также вызывает потери в сердечнике, которые следует учитывать при определении совокупных потерь.

Так как теплоотдача кольца пропорциональна площади поверхности, т.е. находится в квадратичной зависимости от линейных размеров, а выделение тепла пропорционально объёму (кубическая зависимость), маленькие кольца лучше рассеивают тепло по сравнению с кольцами больших размеров. В таблице 6 приведена зависимость рассеиваемой мощности от допустимого нагрева для разных типоразмеров колец.

Кольцо T30 имеет наружный диаметр 0,30 дюйма, кольцо T400 соответственно 4 дюйма.

Дроссели с постоянным подмагничиванием

Поскольку постоянный ток в обмотке не вызывает потерь в сердечнике, в большинстве случаев основными критериями, определяющими работу дросселей с постоянным током подмагничивания при малых напряжениях и частотах до 50 кГц, становятся насыщение сердечника и потери в обмотке. Приведённые на рис. 2 кривые получены из потерь в обмотке и характеристик насыщения материала постоянным током с уровнем пульсаций до 1%, при котором влиянием переменной составляющей можно пренебречь.

На рис. 2 изображены два семейства кривых. В верхней части показана связь накапливаемой энергии и ампер-витков для материала -52. Графики в нижней части – связь накапливаемой энергии и степени насыщения.

Понятие «степень насыщения» зачастую вызывает вопросы. Например, если проницаемость сердечника составляет 90% от начальной (индуктивность дросселя равна 90% от минимального значения без нагрузки), то сердечник насыщен на 10%. Аналогично, проницаемость насыщенного на 30% сердечника составит 70% от начальной величины.

Использование обоих семейств кривых позволит без труда определить требуемое количество витков для заданного объёма накапливаемой энергии и изменение индуктивности дросселя, возникающее как следствие изменения рабочего тока.

Воспользуемся этими графиками для определения параметров дросселя, имеющего индуктивность 30 мкГн при токе подмагничивания 10 А. При этих условиях накапливаемая дросселем энергия составит 1500 мкДж. Из таблицы 3 следует, что кольцо T106 способно накопить 1500 мкДж при намотке в один слой и допустимом нагреве 25°C. Кривая для кольца T106 показывает, что для этого потребуется около 250 ампер-витков. Так как величина тока в обмотке составляет 10 А, число витков принимаем равным 25. Далее, кривая в нижней части рисунка показывает, что для накопления 1500 мкДж кольцо T106 должно будет работать при степени

насыщения 49%. Это означает, что при небольшом токе индуктивность дросселя будет достигать 59 мкГн. Из таблицы диаметров для однослойной намотки получаем подходящий диаметр провода, равный 1,29 мм.

Если рассматривать в качестве материала сердечника смесь -8, с помощью таблицы 7 приходим к выводу, что в этом случае также подходит кольцо Т106. Для этого потребуется 270 ампер-витков, или 27 витков провода 1,29 мм. Анализируя семейство кривых для смеси -8, получаем, что кольцо Т106-8 будет функционировать при степени насыщения всего 10%. Это означает, что при малых токах индуктивность дросселя увеличится всего на 3 мкГн, т.е. смесь -8 имеет значительно меньшую нелинейность магнитной проницаемости.

Дроссели со связанными обмотками обычно используют на выходе преобразователей с несколькими выходными напряжениями для улучшения характеристики регулирования. В этом случае также могут быть использованы кривые зависимости на-

капливаемой энергии. Типичная схема показана на рис. 7.

Для нормальной работы дросселя со связанными обмотками необходимо, чтобы отношения витков обмоток трансформатора и дросселя были одинаковыми:

$$\frac{N_1}{N_A} = \frac{N_2}{N_B} = \frac{N_3}{N_C}$$

Если рассматривать ампер-витки обмоток N_2 и N_3 так, как будто они все включены в N_1 , то данный дроссель можно рассматривать как однообмоточный:

$$I_X = I_1 + I_2 \frac{N_2}{N_1} + I_3 \frac{N_3}{N_1}$$

Поскольку все ампер-витки считаются включенными в обмотку N_1 , общая накапливаемая дросселем энергия определяется исходя из эквивалентной индуктивности обмотки 1 и эффективного тока I_X :

$$\frac{1}{2} L I_X^2$$

Полученное количество энергии используется для последующего

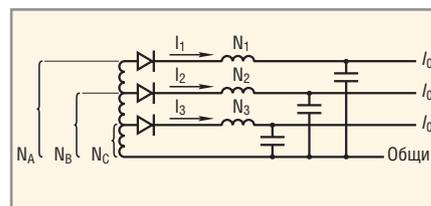


Рис. 7. Примерная схема ИВЭП с тремя выходными напряжениями

определения требуемого размера E-образного или тороидального сердечника. По кривым накапливаемой энергии определяется значение ампер-витков ($N_1 I_X$), из которого легко вычисляется количество витков N_1 . Витки N_2 и N_3 вычисляются из известных соотношений между обмотками.

В рассмотренных выше примерах переменная составляющая тока в обмотке полагалась достаточно малой и не учитывалась при расчётах. Такой подход значительно упрощает расчёты, однако при возрастании рабочей частоты следует учитывать все составляющие потерь.

Продолжение следует.



Магнитоэлектрики MICROMETALS

Снижение габаритов и потерь энергии



Высокоэффективные магнитоэлектрические сердечники Micrometals для силовой электроники и ВЧ-техники

Micrometals наносит на свои изделия запатентованную цветовую маркировку в качестве защиты от подделок. Оригинальная продукция Micrometals в компании ПРОСОФТ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДОСТОИНСТВА

- Большая номенклатура типоразмеров – от 3,4 мм до 165 мм
- Токоизолирующее полимерное покрытие до 3 слоёв
- Тороидальные, Ш- и U-образные, трубчатые, низкопрофильные сердечники, стержни, шайбы, бусины и др.
- Силовые магнитопроводы до 5 МГц
- ВЧ-сердечники для частот от 0,01 до 500 МГц
- Рабочая температура до 2000°C
- Высокая стабильность параметров

Применение сердечников MICROMETALS позволяет:

- Снизить стоимость индуктивных компонентов в 3...5 раз
- Снизить потери на 30...50% по сравнению с ферритами
- Оптимально распределить потери между сердечником и обмоткой
- Повысить надёжность аппаратуры
- Оптимизировать конструкцию и уменьшить габариты индуктивных компонентов

PROSOFT®

ПРОСОФТ – АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (495) 234-0636 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.prochip.ru

Сердечники из расплётённого железа в импульсных источниках питания

(часть 2)

Печатается с разрешения журнала CHIP NEWS Украина (<http://chipnews.com.ua>)

Джим Кокс (Великобритания)

Перевод Артёма Терейковского

В продолжении статьи (начало см. СЭ № 1, 2006) описываются магнитные свойства различных марок расплётённого железа фирмы Micrometals и особенности использования сердечников из расплётённого железа в сглаживающих дросселях, сетевых фильтрах и индуктивных элементах резонансных преобразователей.

Специально для дросселей с высокими частотами пульсаций были разработаны два новых материала: -18 и -52. В табл. 8 приведены сравнительные характеристики различных материалов (смесей).

Смесь -52 при такой же, как у материала -26, проницаемости имеет на 40% меньшие потери на частотах выше 100 кГц при той же цене. Смесь -18 имеет более высокую проницаемость, чем -8, такой же уровень потерь и меньшую стоимость.

При разработке дросселей с повышенной переменной составляющей индукции следует учитывать не только возрастающий уровень потерь, но и влияние переменной составляющей на индуктивность. На рис. 8 показана зависимость изменения начальной проницаемости различных материалов от амплитудного значения магнитной индукции (B_{pk}). Последняя

определяется по формуле: $B_{pk} = E_{rms} \times 10^8 / 4,44ANf$, где B_{pk} вычисляется в гауссах, E_{rms} – действующее напряжение, В, A – площадь сечения сердечника, см², N – число витков, f – частота переключения, Гц.

При повышении уровня постоянной и переменной составляющих их влияние взаимно компенсируется. Этот эффект на примере материала -26 показан на рис. 9 при разных уровнях пульсации. В то время как возрастание постоянной составляющей магнитной индукции в сердечнике вызывает уменьшение магнитной проницаемости, увеличение переменной составляющей способствует увеличению проницаемости. Это означает, что дроссели, работающие при повышенной переменной составляющей, должны иметь меньшее количество витков, чем получается при расчёте, учитывающем только постоянный ток в обмотке.

Возьмём те же исходные данные, что и в предыдущем примере – индуктивность дросселя 30 мкГн, ток в обмотке 10 А. На этот раз дроссель будет работать при напряжении 12,7 В на частоте 100 кГц, скважность 50%. Определим характеристики дросселя при использовании кольца Т106 из разных смесей. В каждом случае количество витков определяется по кривым зависимостей накапливаемой энергии. Поскольку эти зависимости определены при постоянном токе в обмотке, при наличии переменной составляющей результаты будут отличаться.

Индуктивность дросселя определена при напряжении 12,7 В на частоте 100 кГц и при постоянном токе 10 А. Это позволяет оценить изменение индуктивности дросселя для каждого из материалов. Потери в меди (I^2R) и сердечнике, зависящие от амплитудного значения магнитной индукции (B_{pk}), представлены в табл. 9. Во всех случаях индуктивность дросселя при 10 А постоянного тока в обмотке превысила 30 мкГн. Материалы -18 и -8 обеспечивают минимальные совокупные потери, но являются наиболее дорогими (см. табл. 1). Смесь -52 по уровню потерь занимает следующее место, но стоит она значительно дешевле.

Материалы с более высокой начальной проницаемостью, такие как -26 и -52, имеют наибольшую амплитудную нелинейность проницаемости при изменении рабочего тока от нуля до максимального значения. При таком «качании» дроссель обладает большей проводимостью при малых токах, чем в случае, если бы это «качание» отсутствовало. Для устройств, работающих в широком диапазоне токов нагрузок, может быть необходимо увеличение индуктивности при очень малых токах в 10...20 раз от номинального значения при максимальной нагрузке.

Этого можно добиться, используя гибридный сердечник, составленный из ферритового кольца с высокой начальной проницаемостью и кольца из

Таблица 8. Сравнительные характеристики потерь материалов

Материал, № смеси	Сравнительные характеристики потерь, мВт/см ³						Проницаемость при постоянном токе	
	60 Гц	1 кГц	10 кГц	50 кГц	100 кГц	500 кГц	$H_{DC} = 62,83 \text{ А/см}$	
	0,5 мТл	0,15 мТл	50 мТл	22,5 мТл	14 мТл	5 мТл	% μ_0	$\mu_{\text{эффективное}}$
-2	19*	32*	32*	28	19	12	100	10
-8	45	64	59	50	35	28	91	31,9
-14	19*	32*	32*	29	21	17	100	14
-18	48	72	70	63	46	37	74	40,7
-26	32	60	75	89	83	139	51	38,3
-30	37	80	120	149	129	129	91	20
-34	29	61	87	100	82	78	84	27,7
-35	33	71	109	137	119	123	84	27,7
-38	31	57	72	99	103	217	51	43,4
-40	29	62	93	130	127	223	62	37,2
-45	26	49	60	69	61	92	46	46
-52	30	56	68	72	58	63	59	44,3

распылённого железа. Феррит обеспечивает высокую индуктивность, необходимую при малых токах, а распылённое железо обеспечивает накопление необходимого количества энергии при больших токах нагрузки. Характеристика насыщения постоянным током гибридных сердечников из композиций -267 и -275 приведена на рис. 10, на котором показана зависимость степени насыщения гибридного сердечника от постоянного тока. Напряжённость постоянного магнитного поля H (Э) определяется по формуле: $H = 0,4\pi NI/L$, где N – число витков, I – постоянный ток в обмотке, A, L – средняя длина магнитного пути в см.

Композиция -267 состоит из 33% феррита силовой марки, аналогичной N67 (N87) фирмы Epcos, с проницаемостью 2300 и 67% распылённого железа марки -52 с проницаемостью 75. Соответственно, композиция -275 состоит из 25% феррита и 75% распылённого железа.

В дросселе традиционного корректора коэффициента мощности (ККМ) на основе повышающего преобразователя непрерывно меняется ток смещения основной частоты (50 или 60 Гц) и ток высокочастотного переключения преобразователя. Сочетание этих факторов делает расчёт дросселей ККМ более сложной задачей, чем расчёт типичного дросселя с постоянным подмагничиванием. Оценка потерь такого дросселя рассмотрена выше. В общем случае рекомендуется рассматривать ток смещения как постоянный ток подмагничивания. Такой подход позволит использовать традиционную методику расчёта.

Фильтры для сетей 50/60 Гц

На входе традиционных импульсных источников питания устанавливаются фильтры синфазных и дифференциальных высокочастотных помех. Синфазная помеха возникает симметрично между общим проводом схемы и «нулём» и «фазой» входного сетевого напряжения. Дифференциальная помеха наводится между «нулём» и «фазой».

Синфазная помеха подавляется включением конденсаторов между общим проводом схемы и входными клеммами сетевого напряжения. По соображениям безопасности ёмкость этих конденсаторов ограничивается относительно малыми значениями, поэтому для эффективного подавления синфазных помех дроссели входных фильтров должны иметь достаточ-

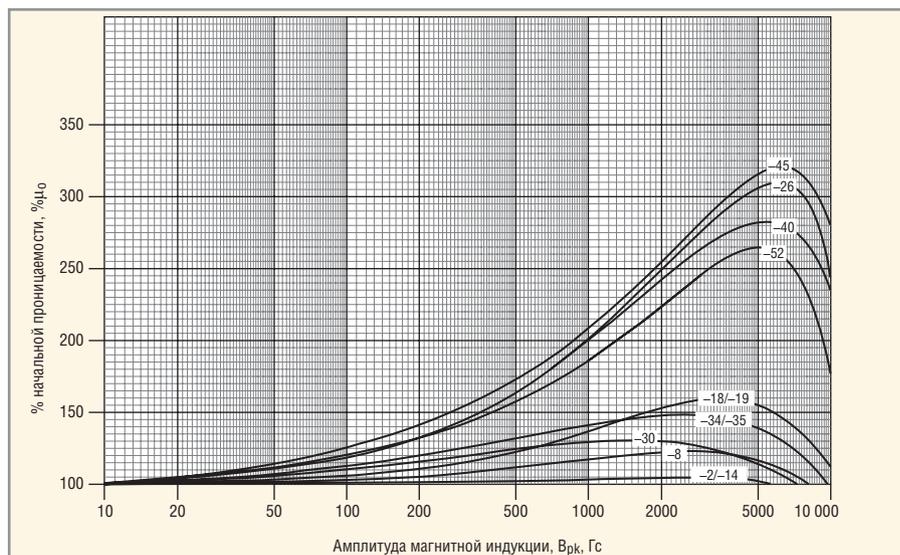


Рис. 8. Зависимость начальной проницаемости материалов от амплитудного значения магнитной индукции

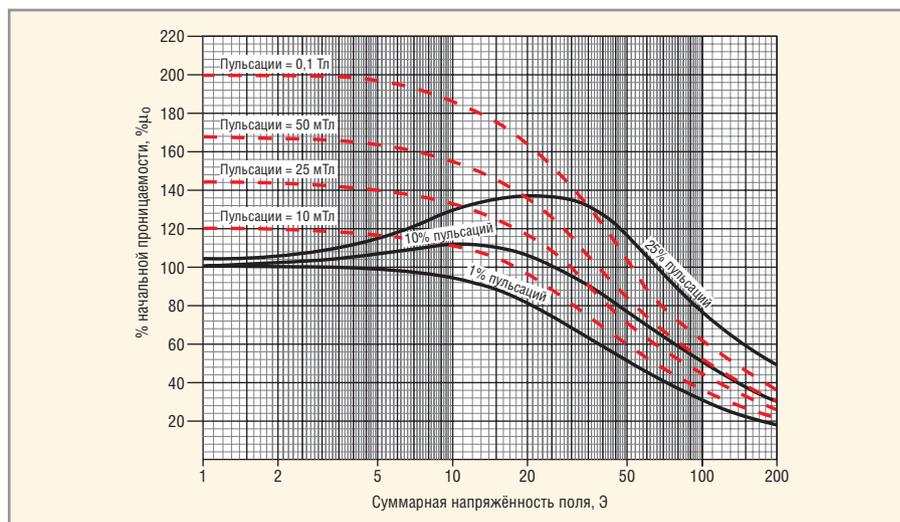


Рис. 9. Зависимость начальной проницаемости от суммарной напряжённости магнитного поля

но большую индуктивность, обычно не менее 1 мГн. Традиционно такие дроссели имеют две симметричные обмотки (см. рис. 11), намотанные на ферритовый сердечник с проницаемостью не менее 5000. Магнитная индукция, создаваемая током основной частоты (50 или 60 Гц) в каждой из обмоток, взаимно компенсируется, таким образом, кольцо не насыщается. Магнитные ма-

териалы с меньшей проницаемостью, такие как распылённое железо, также применимы, но увеличение размеров колец для размещения необходимого числа витков делает их использование малопривлекательным.

Напротив, дроссели фильтров дифференциальных помех не должны насыщаться при значительной магнитной индукции, создаваемой потребля-

Таблица 9. Характеристика насыщения постоянным током

Материал, № смеси	Витки, $d = 1,29$ мм	L , мкГн, 0 ADC	L , мкГн, 10 ADC	V_{pk} , мТл	Потери		
					в меди	в сердечнике	суммарные
-8	27	34,8	30,6	17,8	1,6	0,24	1,84
-18	24	45,2	33,4	20,1	1,42	0,34	1,76
-26	25	77,3	38,3	19,3	1,48	0,73	2,21
-28	34	39,2	33,3	14,2	2,02	0,75	2,77
-33	31	45	35,3	15,5	1,84	0,75	2,59
-40	24	63	39,7	20,1	1,42	1,01	2,43
-52	23	68,8	42,3	20,9	1,36	0,51	1,87

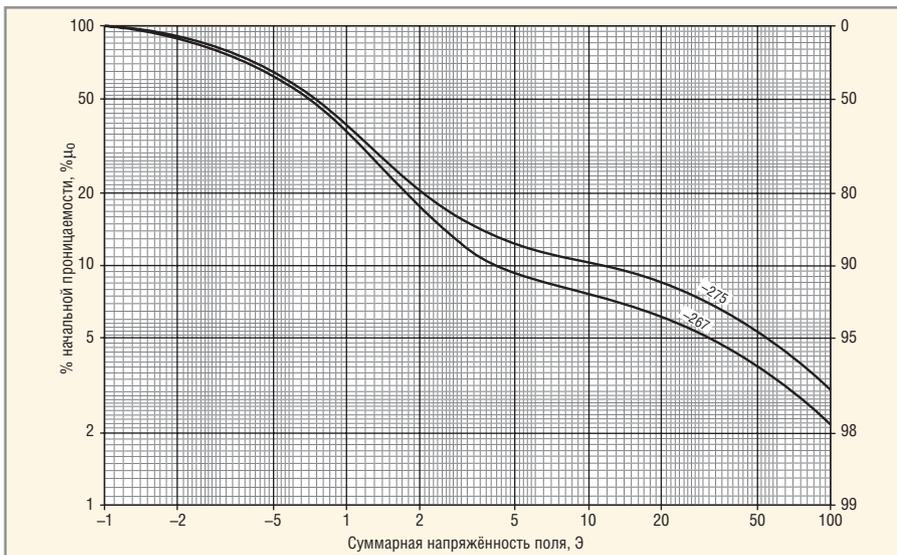


Рис. 10. Зависимость начальной проницаемости от напряженности постоянного магнитного поля

емым от сети током 50/60 Гц, и эффективно подавлять высокочастотные помехи. Распылённое железо наилучшим образом отвечает этим требованиям.

Для сердечников из распылённого железа характерно явление магнитострикции. Это означает, что под воздействием магнитного поля геометрические размеры сердечника незначительно изменяются. В устройствах, работающих на частотах более 20 кГц, магнитострикцией можно пренебречь. Дроссели, работающие на частоте 50/60 Гц, могут «жужжать» достаточно заметно, особенно если в них использованы Е-образные сердечники.

Магнитострикция зависит также от формы тока в обмотке и амплитуды индукции магнитного потока в сердечнике дросселя.

Из кривой зависимости увеличения проницаемости от амплитудного значения магнитной индукции переменного тока (см. рис. 11) следует, что индукция насыщения распылённого железа превышает 1 Тл (10 000 Гс) и достигает максимального значения 1,4 Тл (14 000 Гс). Очевидно, что материалы с высокой начальной проницаемостью, например -26, имеют более значительную амплитудную нелинейность магнитной проницаемости.

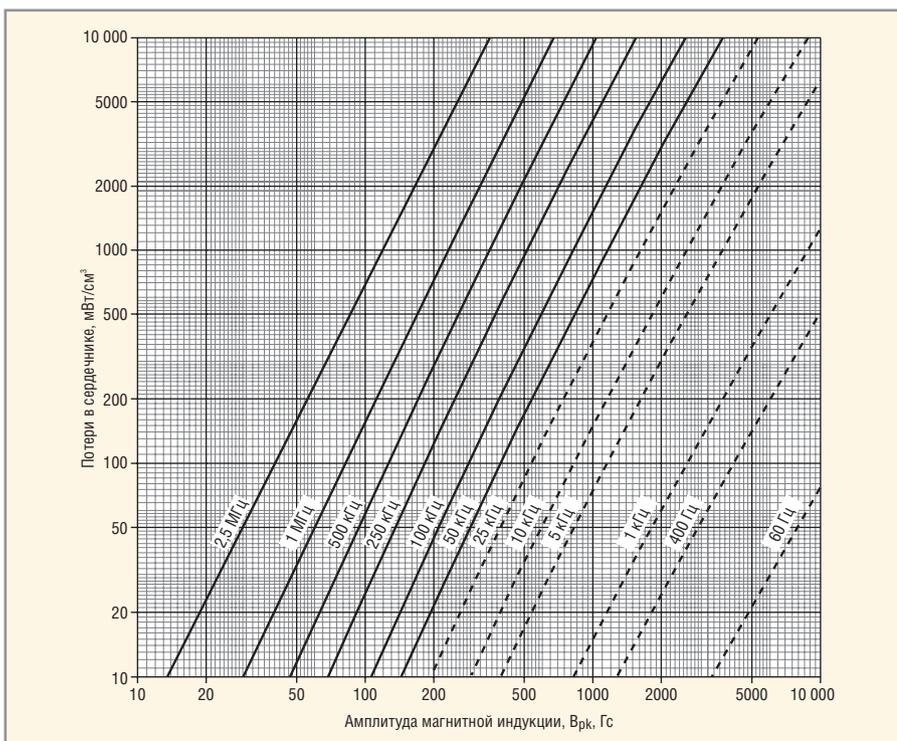


Рис. 12. Зависимость потерь в сердечнике от амплитудного значения магнитной индукции и частоты переменного поля

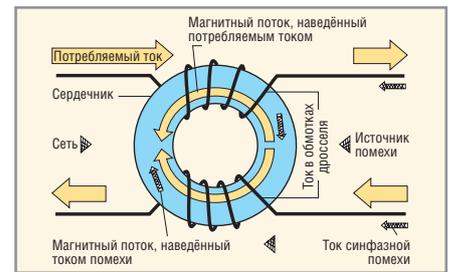


Рис. 11. Распределение магнитных потоков в сердечнике дросселя с токовой компенсацией

Из показанной на рис. 3 зависимости потерь для смеси -52 следует, что на частоте 60 Гц этот материал может функционировать при значительном размахе переменной магнитной индукции без возникновения избыточных потерь. На высоких частотах потери материала -52 значительно возрастают и снижают добротность дросселя. Такая особенность способствует лучшему подавлению нежелательных ВЧ-сигналов.

Кривые, отражающие способность сердечников накапливать энергию на частоте 60 Гц, получены как результат поведения материала при различных значениях амплитудной магнитной индукции (рис. 11). При этом неясно, как изменяется проницаемость материала вследствие слабой высокочастотной помехи. Консервативная методика расчёта предлагает считать ток основной частоты 50/60 Гц постоянным током.

ИНДУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Другим применением накопительных дросселей являются преобразователи напряжения резонансного типа. Чтобы ограничить потери в сердечнике на приемлемом уровне, необходимо минимизировать индукцию в сердечнике. При использовании материалов с меньшей начальной проницаемостью число витков обмотки увеличится, так что при том же токе в обмотке генерируется меньшая магнитная индукция.

Одним из методов снижения эффективной проницаемости и уменьшения магнитной индукции в сердечнике является введение локального воздушного зазора. На частотах свыше 100 кГц потери из-за краевого искажения поля в зазоре резко возрастают и могут вызвать существенный локальный перегрев. Во многих случаях потери в зазоре могут превышать потери в сердечнике.

В течение многих лет сердечники из распылённого железа используются в

Сердечники из расплётённого железа в импульсных источниках питания

(часть 3)

Печатается с разрешения журнала CHIP NEWS Украина (<http://chipnews.com.ua>)

Джим Кокс (Великобритания)

Перевод Артёма Терейковского

В окончании статьи (начало см. в СЭ №№ 1 и 2, 2006) описаны магнитные свойства расплётённого железа различных марок фирмы Micrometals и особенности использования сердечников из расплётённого железа в сглаживающих дросселях, сетевых фильтрах и других индуктивных элементах.

Переменная составляющая тока в обмотке дросселя постоянного тока может оказывать существенное влияние на потери в сердечнике и на индуктивность вследствие изменения начальной магнитной проницаемости материала. Кривые, представленные на рис. 2, получены при условии, что амплитудная магнитная индукция не превышает 1 мТл, что обычно соответствует менее чем 1% переменной составляющей тока в обмотке. На рис. 3 показана зависимость потерь материала -52 от амплитуды индукции переменного магнитного поля в сердечнике.

Смесь -26 наиболее широко используется при изготовлении дросселей выходных фильтров импульсных источников питания. Тем не менее, при увеличении частоты следует отдать предпочтение материалам -8, -18 и -52, имеющим меньшие потери.

Максимальные значения индукции переменного тока в сердечниках дросселей фильтров, установленных на выходе импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭП), во время работы не превышают 1000 Гс (типичное значение составляет 200 Гс). Влияние амплитуды магнитной индукции на магнитную проницаемость различных материалов показано на рис. 8. Магнитная проницаемость большинства материалов заметно увеличивается, когда амплитуда магнитной индукции становится более 100 Гс. Наибольший рост отмечен у материалов с высокой начальной проницаемостью -26, -40, -45 и -52.

На рис. 9 показана зависимость начальной магнитной проницаемости от суммарной напряжённости магнитного поля для материала -26 при различных уровнях пульсаций в обмотке. Аналогичны эти зависимости для материалов -40 и -52.

Рассмотрим несколько примеров.

ДРОССЕЛИ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Пример 1

Исходные требования. Необходимо рассчитать дроссель, индуктивность (L) которого должна составлять 45 мкГн при подмагничивании постоянным током (I) 7,5 А. При этом пульсации не должны превышать 1%. При расчёте необходимо оптимизировать конструкцию дросселя с учётом в первую очередь его стоимости, а также разогрева во время работы. Необходимо также по возможности минимизировать габариты дросселя.

Реализация задания. Сначала необходимо выбрать материал дросселя. В первую очередь рассматриваем смеси -26, -40 и -52 как наиболее дешёвые, поскольку в задании нет ограничений на изменение индуктивности дросселя при изменении тока в обмотке.

Накапливаемая в дросселе энергия составит:

$$LI^2/2 = 45 \times 7,5^2/2 = 1266 \text{ мкДж.}$$

Далее необходимо выбрать размер и форму сердечника. В данном случае

вполне подходит материал -52. Выбор кольца Т106 позволяет обойтись однослойной обмоткой при перегреве менее 25°C (рис. 2)*.

Количество витков определяется следующим образом. Согласно кривым в верхней части рис. 2 для накопления 1266 мкДж в сердечнике Т106-52 потребуется около 200 Ампер-витков. Следовательно, число витков обмотки составит:

$$N = 200/7,5 = 27.$$

По табл. 4 выбираем однослойную обмотку проводом $\varnothing 1,15$ мм. Такой выбор обеспечит перегрев менее 25°C.

Пример 2

Исходные требования. Необходимо рассчитать дроссель, индуктивность (L) которого без подмагничивания должна составлять 60 мкГн, а при подмагничивании постоянным током (I) 7,5 А – 45 мкГн. При этом степень насыщения сердечника должна быть менее 25%, а пульсации не должны превышать 1%. При расчёте необходимо оптимизировать конструкцию дросселя с учётом в первую очередь его габаритов, а также разогрева дросселя во время работы. Необходимо также по возможности минимизировать стоимость дросселя.

Реализация задания. Сначала необходимо выбрать материал дросселя. Более всего подходят смеси -8, -18, -28 и -33, т.к. они имеют наименьшую амплитудную нелинейность проницаемости. Из-за ограничения изменения индуктивности в диапазоне рабочих токов они в данном случае наиболее пригодны.

Накапливаемая в дросселе энергия, как и в примере 1, составит 1266 мкДж.

Далее выбираем размер и форму сердечника. Анализ кривых для раз-

*Рассмотрение сердечников типа E выходит за рамки данной статьи (прим. переводчика).

Таблица 10. Зависимость числа витков от диаметра провода при «полной» намотке тороидального дросселя (заполнение внутреннего диаметра 55%)

Тип	Средняя длина витка, см	Площадь поверхности, см ²	Число витков при диаметре провода, мм (удельном сопротивлении, мОм/см)															Ампер-витки при температуре нагрева из-за потерь в обмотке			Общая рассеиваемая мощность, Вт, при температуре нагрева		
			0,32 (2,13)	0,404 (1,34)	0,511 (0,842)	0,643 (0,530)	0,813 (0,330)	0,912 (0,264)	1,02 (0,210)	1,15 (0,166)	1,29 (0,132)	1,45 (0,104)	1,63 (0,0828)	1,83 (0,0651)	2,05 (0,0521)	2,30 (0,0413)	2,60 (0,0328)	10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C
																		10°C	25°C	40°C	10°C	25°C	40°C
T80	2,8	15,5	525	343	218	141	89	71	57	45	36	29	23	18	14	11	9	150	260	340	0,246	0,736	1,3
T90	3,64	22,4	648	424	269	174	110	88	70	56	45	36	28	22	18	14	11	170	300	400	0,356	1,07	1,88
T94	3,44	22	672	440	272	180	114	91	73	58	46	37	29	23	18	14	11	180	320	420	0,35	1,05	1,85
T106	4,49	31	696	455	289	187	118	95	75	60	48	38	30	24	19	15	12	190	330	440	0,492	1,47	2,59
T124	3,95	33,3	1080	707	449	290	184	147	117	93	75	60	47	37	30	23	19	260	460	610	0,529	1,58	2,79

ных материалов показывает, что смесь -8 в качестве материала сердечника позволит использовать кольцо минимальных размеров (см. рис. 6). Сердечник Т94-8 обеспечивает перегрев менее 40°C при «полной» намотке. Согласно графику в нижней части рис. 6, при накоплении 1266 мкДж сердечник Т94-8 функционирует со степенью насыщения около 15%, что полностью удовлетворяет начальным условиям.

Для определения количества витков (N) воспользуемся следующей формулой:

$$N = [L / (A_L \times \% \mu_0 / 100)]^{1/2},$$

где A_L – площадь сердечника (см²), %μ₀ – процент начальной проницаемости.

После подстановки значений получаем:

$$N = [45000 / (25 \times 0,85)]^{1/2} = 46.$$

Так как для обеспечения перегрева кольца Т94 менее 40°C требуется «полная» намотка, воспользуемся табл. 10. Рекомендуемый диаметр провода составляет 1,29 мм.

Определить количество витков в зависимости от индуктивности и максимального значения постоянного тока в обмотке для сердечников из смеси -52 можно с помощью табл. 11. Приведённые в таблице данные предполагают уровень пульсаций менее 1% и температуру перегрева 40°C вследствие потерь в обмотке и сердечнике. Значительные пульсации приведут к повышению температуры перегрева и индуктивности дросселя. Для определения диаметра провода в зависимости от максимального значения постоянного тока можно воспользоваться таблицей 12.

Таблица 11. Связь между индуктивностью, количеством витков тороидального дросселя и максимальными значениями постоянного тока при однослойной обмотке для сердечников из смеси -52

Типоразмер тороида	Индуктивность, мкГн/количество витков при постоянном токе, А							
	1	2,5	5	7,5	10	15	20	30
T50*-52**	94/59	30,7/37	10,2/22	5,0/16	2,8/12	1,3/8	0,7/6	0,2/3
T68-52A	250/74	81,6/46	27,6/28	16,7/21	8,3/16	4,4/12	2,1/8	0,8/5
T90-52	680/115	224/72	74,0/44	40,9/34	23,6/26	13/20	7,3/15	3,7/11
T106-52	1080/118	362/74	124/46	69,3/36	39,0/27	21,3/21	11,4/15	5,8/11
T131-52	1660/134	550/85	188/52	107/41	63/32	33,3/24	18,8/18	9,2/13
T157-52	3320/204	1090/129	380/81	213/64	127/50	69,3/39	40,1/30	21,5/23
T184-52	5400/202	1790/129	624/81	345/63	210/50	114/38	65/29	34/22
T250-52	14 800/270	4960/172	1720/108	978/86	591/67	332/59	195/41	102/31
T400-52	26 100/494	8690/317	3100/160	1760/157	1050/126	590/100	347/78	190/61

* Наружный диаметр тороида в дюймах × 0,01.

** Марка материала.

Таблица 12. Определения диаметра провода в зависимости от максимального значения постоянного тока

Постоянный ток, А	1,0	2,5	5,0	7,5	10	15	20	30
Диаметр провода, мм	0,32	0,511	0,813	1,02	1,45	1,83	2,30	2,91

ДРОССЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В последнее время всё более высокие требования предъявляются к минимизации гармоник тока, потребляемого блоком ИВЭП от сети 220/380 В. С этой целью в состав даже относительно маломощных источников питания включают активные корректоры коэффициента мощности (ККМ). Структурная схема типичного блока ККМ приведена на рис. 14.

Корректор коэффициента мощности отличается от обычного импульсного преобразователя тем, что на его входе присутствует выпрямленное, но не сглаженное сетевое напряжение. Задача управляющей логики ККМ (на рисунке не показана) – обеспечить такой цикл переключений ключа Q1, при котором вход преобразователя со стороны сети ведет себя как некоторое активное

сопротивление. При этом между напряжением в сети и током, отбираемым от неё, отсутствует сдвиг фаз (cos φ = 1). В то же время на выходном конденсаторе поддерживается постоянное напряжение, слабо зависящее от нагрузки и напряжения сети. Расчёты потерь в сердечнике дросселя подобного преобразователя более сложны, чем в рассмотренных выше примерах, т.к. магнитный поток в сердечнике непрерывно меняется в течение полупериода напряжения питающей сети даже при неизменном входном напряжении и стабильной нагрузке.

Рассматриваемый ниже подход предполагает синусоидальную форму входного напряжения, постоянное выходное напряжение и фиксированную частоту преобразования ККМ, которая не зависит от схемы управления ККМ.

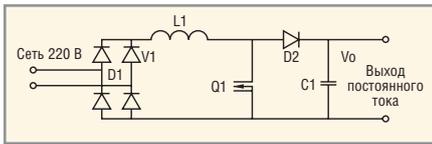


Рис. 14. Структурная схема типичного корректора коэффициента мощности

Амплитудное значение индукции в сердечнике определяется исходя из формы напряжения на дросселе по следующей формуле:

$$\hat{B} = 10^8 E \Delta T / 2NA,$$

где E – пиковое значение напряжения на дросселе (В), ΔT – интервал времени (с), N – число витков обмотки, A – сечение сердечника (см²).

Максимального значения $\hat{B}_{\text{макс}}$ достигает при $V_i = V_o/2$, где V_i – мгновенное значение входного напряжения, V_o – постоянное выходное напряжение.

Зависимость отношения $\hat{B}/\hat{B}_{\text{макс}}$ от фазы входного напряжения при разных отношениях V_i/V_o показана на рис. 15.

При фиксированной частоте преобразования потери в сердечнике пропорциональны \hat{B}^n , где значение n находится в диапазоне 1,65...3,00 для большинства порошковых материалов, включая расплывённое железо. Отношение среднего значения потерь к максимальному значению (при $V_i = V_o/2$) в течение полупериода питающего напряжения для $n = 2,0, 2,5$ и $3,0$ показано на рис. 16.

Из рисунка видно, что отношение средних потерь к максимальным достигает наибольшего значения при отношении амплитудного значения

входного напряжения к постоянно-му выходному напряжению, примерно равном 0,61. При этом отношение потерь незначительно изменяется от 0,672 при $n = 3$ до 0,725 при $n = 2$.

Поскольку большинство ККМ функционируют при отношении потерь, близком к максимальному значению, при разработке рекомендуется использовать эмпирическое правило, согласно которому в худшем случае среднее значение потерь составляет 70% значения, вычисленного при $V_i = V_o/2$. Амплитудная индукция в сердечнике определяется по следующей формуле:

$$\hat{B} = 10^8 V_o / 8NAf,$$

где f – частота переключения преобразователя.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ

Производители магнитных материалов обычно приводят уравнение Штейнмеца для определения потерь в сердечниках:

$$P_{\text{серд}} = kf^x \Delta B^y.$$

В этой формуле потери выражаются в мВт/см³, частота – в кГц, индукция в сердечнике – в теслах (Тл). Коэффициенты Штейнмеца k, x и y подбираются для наилучшего соответствия результатам измерений. К сожалению, использование этого уравнения даёт корректный результат только в ограниченных диапазонах рабочей частоты и плотности магнитного потока в сердечнике.

Поэтому производители обычно указывают несколько наборов коэффициентов для соответствующих диапазонов. Однако, как показано в статье [1], это может привести к значительным несоответствиям при определении потерь на границах диапазонов.

Совокупные потери в сердечнике равны сумме потерь на перемагничивание и на вихревые токи. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату амплитудного значения магнитного потока и квадрату рабочей частоты. Потери на перемагничивание зависят от частоты линейно, но соотношение между составляющими потерь изменяется в зависимости от плотности магнитного потока и материала сердечника.

Бозорт в работе [2] доказал, что потери на перемагничивание для расплывённого железа пропорциональны B^3 при очень малых значениях индукции и $B^{1.6}$ при больших значениях индукции. При изменении индукции экспонента плавно меняется в диапазоне 1,6...3. Эти изменения экспоненты определяются реакцией стенок магнитных доменов материала на изменение внешнего магнитного поля. При слабых магнитных полях стенки доменов постепенно смещаются, но остаются «привязанными» к различным дефектам и неоднородностям кристаллической решетки. С ростом напряжённости поля возрастает энергия домена и происходит скачкообразное преодоление дефекта решётки. В сильных магнитных полях материал достигает насыщения; диполи ориентируются вдоль силовых линий поля, и дальнейшего роста намагниченности не происходит.

Если считать, что потери на перемагничивание ограничены тремя прямыми линиями (см. верхнюю

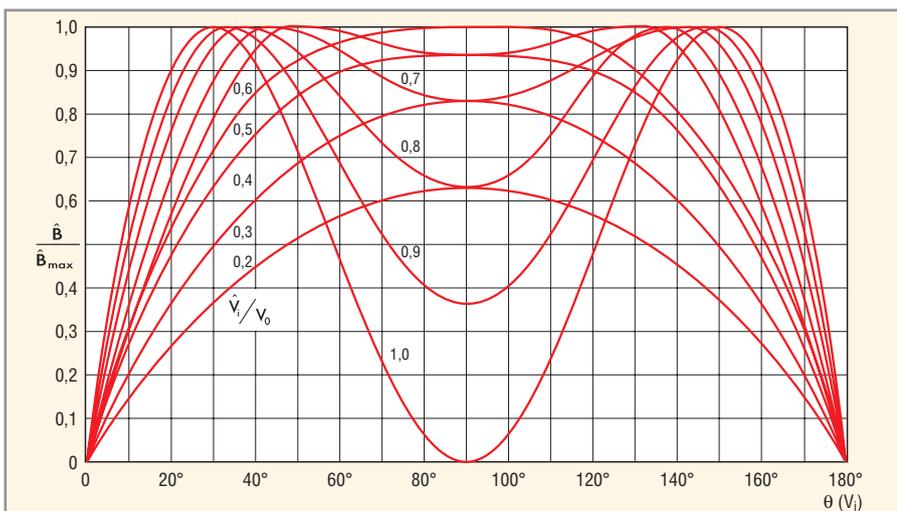


Рис. 15. Зависимость отношения индукции в сердечнике дросселя ККМ от фазы входного напряжения

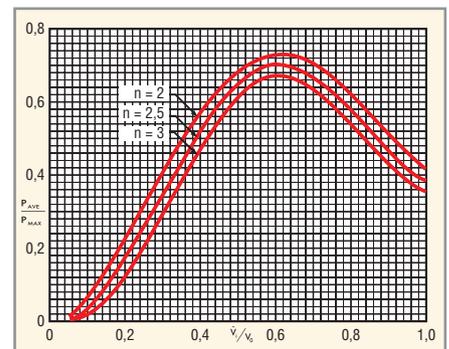


Рис. 16. Зависимость относительного уровня потерь от нормализованного входного напряжения

Снижение габаритов и потерь энергии



Высокоэффективные магнитодиэлектрические сердечники Micrometals для силовой электроники и ВЧ-техники

Применение сердечников MICROMETALS позволяет:

- Снизить стоимость индуктивных компонентов в 3...5 раз
- Снизить потери на 30...50% по сравнению с ферритами
- Оптимально распределить потери между сердечником и обмоткой
- Повысить надёжность аппаратуры
- Оптимизировать конструкцию и уменьшить габариты индуктивных компонентов

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДОСТОИНСТВА

- Большая номенклатура типоразмеров – от 3,4 мм до 165 мм
- Токоизолирующее полимерное покрытие до 3 слоёв
- Торoidalные, Ш- и U-образные, трубчатые, низкопрофильные сердечники, стержни, шайбы, бусины и др.
- Силовые магнитопроводы до 5 МГц
- ВЧ-сердечники для частот от 0,01 до 500 МГц
- Рабочая температура до 2000°C
- Высокая стабильность параметров

СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ

состоят из 4 модулей для расчёта индуктивностей:

- Фильтров постоянного тока, включая дифференциальные фильтры
- Индукторов с фиксированной зависимостью изменения индуктивности от величины тока намагничивания
- Катушек с управляемой индуктивностью 10 : 1 или 20 : 1 с использованием композиционных сердечников из феррита и магнитодиэлектрика
- Катушек индуктивности для АККМ, повышающих и понижающих DC/DC - преобразователей



CERTIFICATE OF REGISTRATION PRINCIPAL REGISTER

The Mark shown in this certificate has been registered in the United States Patent and Trademark Office to the named registrant.

The records of the United States Patent and Trademark Office show that an application for registration of the Mark shown in this Certificate was filed in the Office; that the application was examined and determined to be in compliance with the requirements of the law and with the regulations prescribed by the Director of the United States Patent and Trademark Office; and that the Applicant is entitled to registration of the Mark under the Trademark Act of 1946, as Amended.

A copy of the Mark and pertinent data from the application are part of this certificate.

This registration shall remain in force for TEN (10) years, unless terminated earlier as provided by law, and subject to compliance with the provisions of Section 8 of the Trademark Act of 1946, as Amended.



Director of the United States Patent and Trademark Office

Micrometals наносит на свои изделия запатентованную цветовую маркировку в качестве защиты от подделок. Оригинальная продукция Micrometals в компании ПРОСОФТ

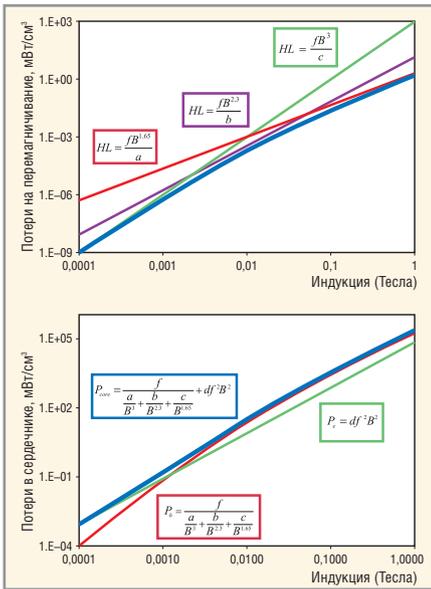


Рис. 17. Составляющие потерь распыленного железа

часть рис. 17), то кривая потерь определяется как обратное значение суммы обратных величин уравнений, описывающих данные прямые:

$$P_h = f / [(a/B^3) + (b/B^{2.3}) + (c/B^{1.65})].$$

Потери на вихревые токи определяются по формуле:

$$P_e = df^2B^2.$$

Следовательно, совокупные потери в сердечнике составят:

$$P_{\text{совокуп}} = f / [(a/B^3) + (b/B^{2.3}) + (c/B^{1.65})] + df^2B^2.$$

Модель, описываемая этим уравнением, известна как модель Оливера. Для максимальных значений индукции выбрано значение экспоненты 1,65 вместо 1,6 как наиболее точно подходящее для распыленного железа. Значения экспонент для минимальных и промежуточных значений индукции также оптимальны для всех типов распыленного железа, производимого фирмой Micrometals. Изменяются только значения коэффициентов *a*, *b* и *c*.

В нижней части рис. 17 приведены кривые потерь на перемагничивание, вихревые токи и совокупные потери смеси -52 на частоте 100 кГц.

Было проведено сравнение потерь, полученных по результатам измерений (на примере кольца Т106-52), с потерями, рассчитанными по уравнениям Штейнмеца и Оливера в диапазоне от 60 Гц до 500 кГц. Сравнение показало, что средняя погрешность модели Оливера не превышает 4,9%. При расчётах коэффициенты в уравнении Оливера были взяты из табл. 13. Средняя погрешность при использовании модели Штейнмеца достигает 20%. Наибольшую погрешность модель Штейнмеца даёт при малых значениях индукции и потерь в сердечнике, поскольку изначально она была оптимизирована для потерь, превышающих 10 мВт/см³.

Модель Оливера, будучи более точной, позволяет определить долю каждой составляющей в совокупных потерях и рассчитать индуктивные элементы, работающие в предельных режимах, с достаточной точностью.

Как видно из рис. 17, отношение между составляющими потерь меняется в зависимости от индукции в сердечнике на заданной частоте. Характерно, что при минимальных значениях индукции преобладают потери на вихревые токи. Имея возможность экстраполировать вплоть до очень малых значений индукции, мы можем определить точные значения коэффициентов модели Оливера. Для этого потребуется измерить коэффициент *Q* при помощи прецизионного LCR-измерителя. Реальные потери в сердечнике вычисляются из следующего соотношения:

$$Q = V_{\text{вх}} I_{\text{вх}} / (P_{\text{обмот}} + P_{\text{серд}}).$$

Если измерения коэффициента *Q* произведены при достаточно высоких частотах и низких значениях индукции, при которых преобладают потери на вихревые токи, можно определить значение коэффициента *d* модели Оливера.

Воспользуемся сердечником Т106-52 с обмоткой из 100 витков. Индукция в сердечнике ограничена на уровне 0,01 мТл, сопротивление об-

мотки переменному току на частоте 100 кГц составляет 0,74 Ом. При $V_{\text{вх}} = 29$ мВ, $I_{\text{вх}} = 0,049$ мА и $Q = 45,5$ потери в сердечнике составляют $2,99 \times 10^{-8}$ Вт. Пересчитав потери в удельное значение в мВт/см³, получаем коэффициент *d*, равный 6,9. Примечательно, что при этих значениях индукции и частоты потери на вихревые токи составляют до 99% совокупных потерь для смеси -52. Остальные коэффициенты могут быть получены по принципу наилучшего соответствия из результатов точных измерений на низких частотах.

Другое преимущество модели Оливера заключается в том, что для всех значений рабочих частот и индукции в сердечнике используется один и тот же набор коэффициентов.

Хотя модель Оливера разработана специально для распыленного железа, подобная методика применима для других магнитодиэлектриков, таких как альсифер (KoolMu, SuperMSS), молипермаллой (MPP), и для ферритов. В каждом случае следует уточнить формулу определения потерь на перемагничивание для наиболее полного соответствия свойствам конкретного материала.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАЗРАБОТЧИКОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Температура окружающей среды накладывает ограничения на допустимый перегрев сердечника. Проект следует начинать при одинаковых значениях потерь в обмотке и сердечнике. Желательно, чтобы расчётные потери в сердечнике оказались меньше потерь в обмотке, поскольку отвести тепло от обмотки значительно легче, чем от сердечника.

Для расчёта индуктивных элементов на сайтах имеются различные программы (например, бесплатная программа фирмы Micrometals [3]). Они позволяют оценить продолжительность безопасного функционирования сердечника в заданных условиях, учитывающих описанное выше явление термического старения.

Если устройство позволяет использовать вентилятор для отвода тепла, желательно устанавливать вентилятор с постоянной скоростью враще-

Таблица 13. Значения коэффициентов для уравнения Оливера

Материал	a	b	c	d
Micrometals -52	$1,0 \times 10^{-6}$	$6,94 \times 10^{-5}$	$5,27 \times 10^{-4}$	6,9

ния. В большинстве случаев потери в сердечнике не зависят от мощности на выходе импульсного источника питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распылённое железо в течение нескольких десятилетий используется в радиоэлектронной аппаратуре промышленного и бытового назначения. Чаще всего сердечники из распылённого железа применяются

в дросселях фильтров с большими токами смещения/подмагничивания, дросселях электронных балластов ламп дневного света, помехоподавляющих дросселях, дросселях ККМ и DC/DC-преобразователей, работающих в непрерывном режиме. Распылённое железо является самым дешёвым из порошковых материалов с высокой индукцией насыщения, благодаря чему его применение во многих случаях оказывается эко-

номически более эффективным, чем применение молипермаллоя (МПП), альсифера (KoolMu, SuperMSS) или материала HiFlux.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ridley R. and Nace A. Modeling Ferrite Core Losses. Switching Power Magazine. Winter 2002.
2. Bozorth, Richard M. Ferromagnetism. Princeton: D. Van Nostrand, 1951.
3. www.micrometals.com.



Новости мира News of the World Новости мира

Сверхминиатюрное язычковое реле

Компания Coto Technology разработала сверхминиатюрное язычковое реле 9852, занимающее на плате площадь всего лишь 0,5 см². Это устройство предназначено для использования в автоматической испытательной и контрольно-измерительной аппаратуре, а также в телекоммуникационных системах.



рудовании, где требуется высокая надёжность и недопустимо присутствие машинных масел.

www.e7e.ru

Новые приёмники и передатчики от National Semiconductor

Корпорация National Semiconductor добавила пять новых теплоустойчивых приёмников и передатчиков к своему семейству низковольтных устройств, передающих информацию низковольтными дифференциальными сигналами (LVDS). Эти универсальные устройства разработаны для передачи сигналов через кабели в системах, работающих в жёстких условиях, например, в автомобилях и военной технике.

Передатчик DS90LV011AH, приёмник DS90LT012AH, двойной передатчик DS90LV027AH, двойной приёмник DS90LV028AH и интегральный двойной передатчик DS90LV049H способны работать при температурах до 125°C. Приёмники и передатчики обеспечивают скорость передачи данных до 400 Мбит/с и обладают неплохой помехоустойчивостью.

Согласно пресс-релизу, новые передатчики и приёмники поддерживают дифференциальный интерфейс LVDS. Модель DS90LT012AH имеет входные контакты LVDS, позволяющие сохранить место на плате. Модели DS90LV027AH и DS90LV028AH отличаются конфигурацией выводов типа flow-through, что помогает упростить схему расположения компонентов на плате.

Модели DS90LV011AH и DS90LT012AH выполнены в корпусах SOT-23 с пятью выводами, модели DS90LV027AH и DS90LV028AH изготавливаются в восьмивыводных корпусах SOIC, а DS90LV049H имеет корпус TSSOP с шестнадцатью выводами.

www.e7e.ru



Реле 9852 отличается превосходной выносливостью и способно выдержать 200 млн. N/O или 100 млн. N/C переключений при напряжении 1 В и нагрузке 10 мА. Полосовая характеристика составляет -3 дБ при частоте 4 ГГц (N/O) или 3 ГГц (N/C), что является невозможным для механических реле. При частоте 1 ГГц изоляция и обратные потери составляют соответственно -10 и -20 дБ.

Кроме того, внешний магнитный экран уменьшает электромагнитное взаимодействие между тесно расположенными реле. Устройство имеет корпус с выводами в форме крыла чайки, J-образными или осевыми выводами.

Реле 9852 стоит \$10,40 за штуку при объёме закупки 5000 шт.

www.e7e.ru

Микромоторы с воздушным подшипником

Благодаря системе с воздушным подшипником, новые микромоторы корпо-

рации Sanyo обеспечивают высокую скорость и тихую работу при высоких температурах. Использование воздуха позволяет решить проблему разрушения при длительной эксплуатации и высоких температурах, которая возникает в обычных электродвигателях, где в качестве смазывающего материала используется масло.

Бесщёточные микромоторы серии PM имеют диаметр статора 20 мм и максимальный диаметр ротора 25 мм при высоте мотора 25 мм. В данный момент разрабатываются модели с высотой 14 мм. Моторы работают от постоянного напряжения 12 В при токе нагрузки около 70 мА. Среднее число оборотов в минуту 10 000. Диапазон рабочих температур от 0 до 90°C. Температура хранения от -20 до 90°C.

Схема с воздушным подшипником работает следующим образом: между втулкой и ротором имеется зазор величиной от 3 до 5 мкм. Магниты в верхней части ротора отталкивают их друг от друга, поэтому при вращении в зазоре создаётся давление воздуха, позволяющее ротору вращаться, не соприкасаясь со втулкой.

Такие моторы чрезвычайно надёжны. Они были протестированы с помощью более чем одного миллиона включений/выключений.

Моторы предназначены главным образом для применения в медицинском обо-