

Сердечники из распылённого 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 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/см³)	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-

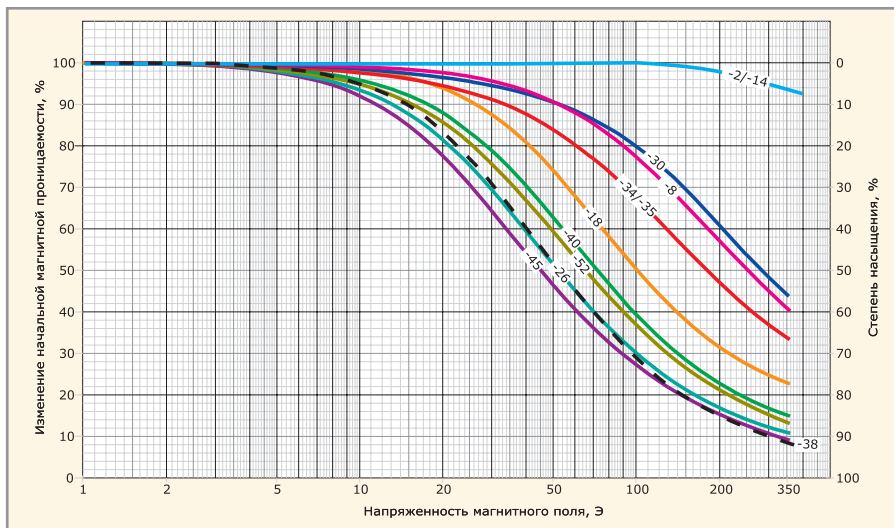


Рис. 1. Зависимость степени насыщения от напряжённости постоянного магнитного поля для различных материалов

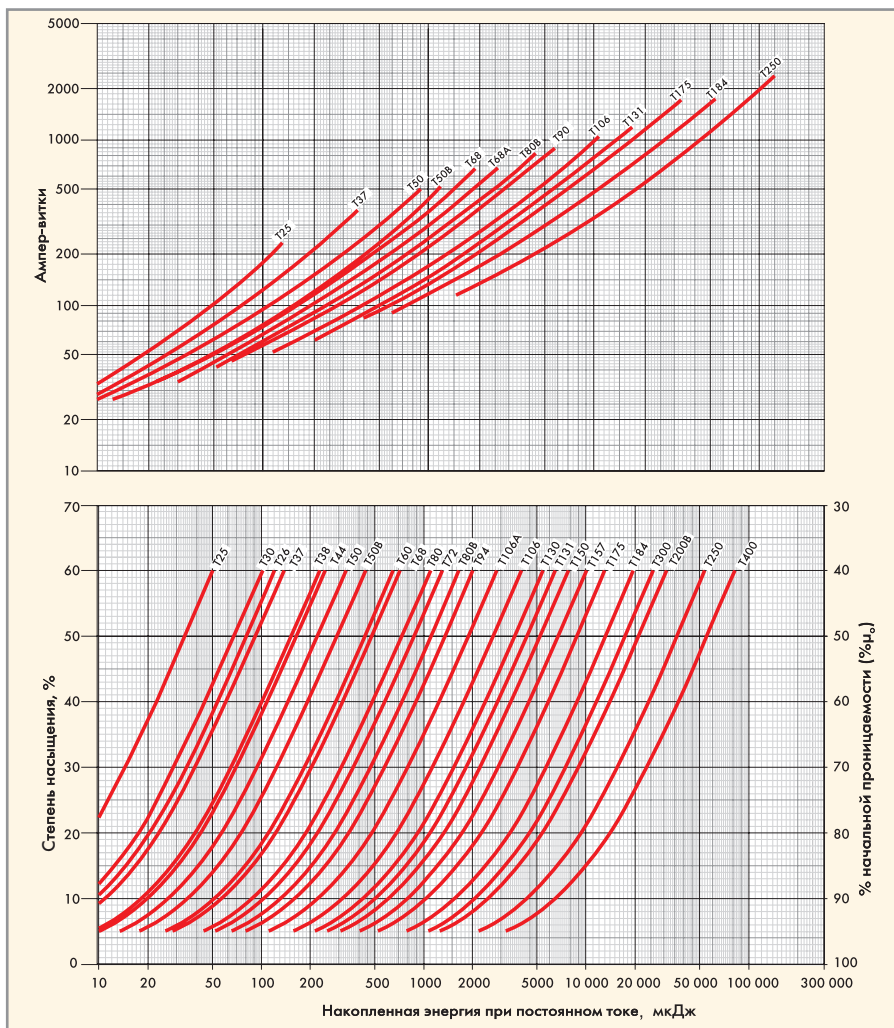


Рис. 2. Соотношение числа ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -52

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 магнитоэлектрика 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 Т14, Т16 и Т20 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 расплывённого 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 Т68-52 накапливает 260 мкДж. Соответственно, при 600 ампер-витках накапливаемая энергия составляет 1400 мкДж. Эти результаты определяются начальной индуктивностью A_L (нГн/витк²) 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 Т68-52 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 Т68-52 «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:

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

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 рассеяния 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							
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
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	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	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

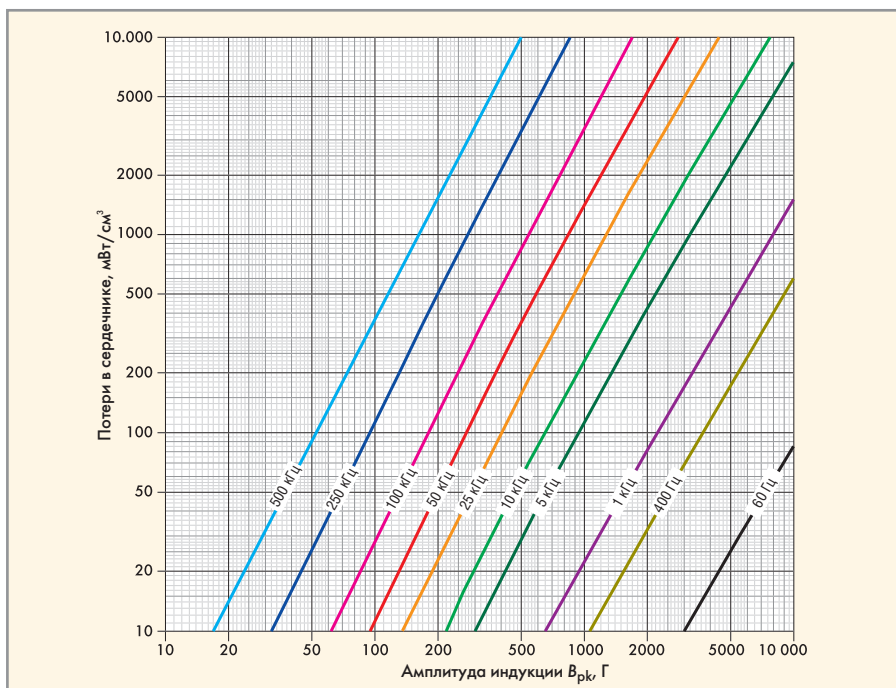


Рис. 3. Зависимость потерь материала -52 от амплитуды индукции переменного поля

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

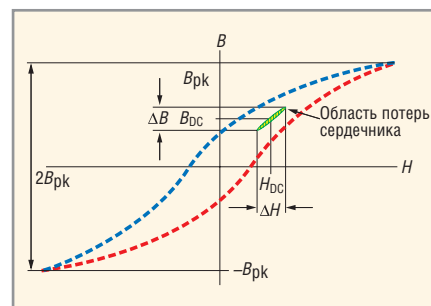


Рис. 4. Потери в сердечнике при подмагничивании постоянным током

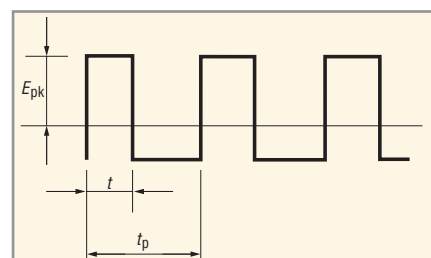


Рис. 5. Типичная форма напряжения на дросселе импульсного преобразователя

(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

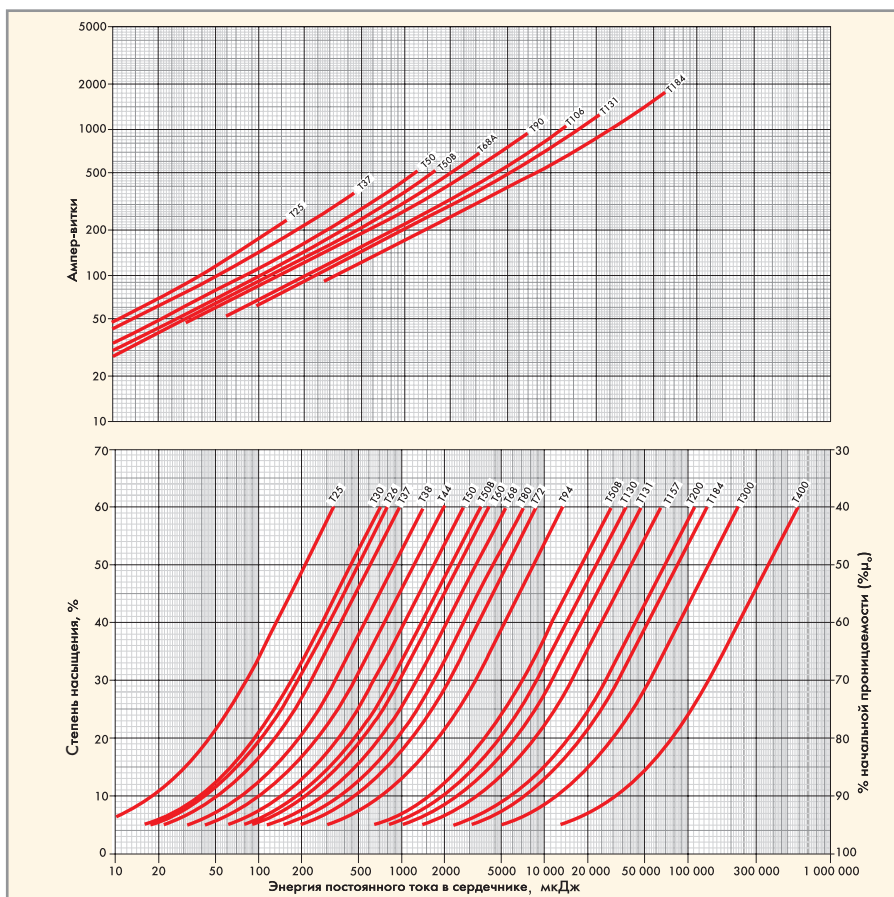


Рис. 6. Соотношение числа ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -8

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

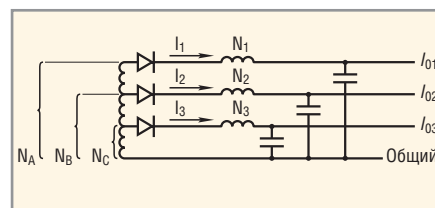


Рис. 7. Примерная схема ИВЭП с тремя выходными напряжениями

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.



Магнитодиэлектрики MICROMETALS

Снижение габаритов и потерь энергии



Высокоэффективные магнитодиэлектрические 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