

# Сердечники из распыленного железа в импульсных источниках питания



**Джим Кокс**

Перевод Артема Терейковского, [www.ferrite.com.ua](http://www.ferrite.com.ua)

## ВВЕДЕНИЕ

Распыленное железо в течение многих лет используется в качестве материала при изготовлении разнообразных сердечников для работы в широком диапазоне частот. Присущая этому материалу структура с распределенным воздушным 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 распыленного железа могут успешно заменять более дорогие из молипермаллоя, 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 распыленного 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 создается магнитная структура с распределенным воздушным зазором.

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

Распыленное железо допускает достаточно жесткие условия эксплуатации. Оно имеет относительно высокую температурную стабильность и выдерживает значительные механические нагрузки без заметных изменений

свойств, однако подвержено т.н. термическому старению, поэтому следует избегать длительной работы при высоких температурах.

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

В статьях этого цикла описываются магнитные свойства различных марок распыленного железа 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 расчетов, а также рассмотрен метод аналитического определения потерь в сердечниках.

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

- -2/-14 смеси с низкой проницаемостью предназначены для работы при меньших (по сравнению с другими материалами) значениях переменной индукции. Смесь -14 имеет немного большую проницаемость, чем -2.
- -8 наилучший, но самый дорогой из высокочастотных материалов. Имеет наименьшие потери и нелинейность проницаемости при значительных токах смещения/подмагничивания.
- -18 имеет сравнимые со смесью -8 низкие потери при несколько более высокой проницаемости и меньшей стоимости. Прекрасные характеристики при значительных токах смещения/подмагничивания.

**Таблица 1. Общие свойства различных марок распыленного железа**

Номер смеси	Начальная проницаемость	Плотность (г/см <sup>3</sup> )	Относительная стоимость	Цветная маркировка
-2	10	5.0	2.7	Красный/нет цвета
-8	35	6.5	5.0	Желтый/красный
-14	14	5.2	3.6	Черный/красный
-18	55	6.6	3.4	Салатный/красный
-19	55	6.8	1.7	Красный/салатный
-26	75	7.0	1.0	желтый/белый
-30*	22	6.0	1.4	салатный/серый
-34 *	33	6.2	1.5	Серый/голубой
-35 *	33	6.3	1.4	Желтый/серый
-38	85	7.1	1.1	Серый/черный
-40	60	6.9	1.0	Салатный/желтый
-45	100	7.2	2.6	Черный/черный
-52	75	7.0	1.4	Салатный/голубой

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

Таблица 2. Типичные области применения различных марок распыленного железа

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

- -19 недорогая альтернатива смеси -18. Имеет такую же проницаемость при незначительно больших потерях.
- -26 широко применяемый материал. Экономически наиболее эффективен в разнообразных применениях в импульсных источниках питания и фильтрах электромагнитных помех. В последние годы заменяется улучшенной смесью -52.
- -30 малая нелинейность проницаемости, низкая цена и относительно невысокая проницаемость сделали этот материал наиболее популярным при создании мощных источников бесперебойного питания (UPS).
- -34/-35 недорогая альтернатива смеси -8 для применений, не критичных к уровню потерь на высоких частотах. Имеют малую нелинейность проницаемости при значительных токах смещения/подмагничивания.
- -40 самый дешевый материал. Характеристики подобны популярной смеси -26. Чаще всего применяются кольца больших размеров.
- -45 имеет самую высокую проницаемость. Заменяет смесь -52 при более высоком уровне потерь.
- -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 распыленного железа содержат органический компонент, поэтому подвержены т.н. термическому 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 значительной степени зависят от време-

ни, 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 вызывает дополнительный разогрев сердечника и может вызвать необратимые изменения, вследствие которого сердечник из магнитодиэлектрика 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.

## ПОКРЫТИЕ

Тороидальные сердечники типоразмеров 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 500В, 60 Гц, и воздействия большинства растворителей. Длительное воздействие некоторых растворителей может повредить покрытие.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Количество накапливаемой дросселем энергии (в микроджоулях) вычисляется как половина произведения индуктивности (в микрогенри) на квадрат тока (в Амперах). Эта энергия пропорциональ-

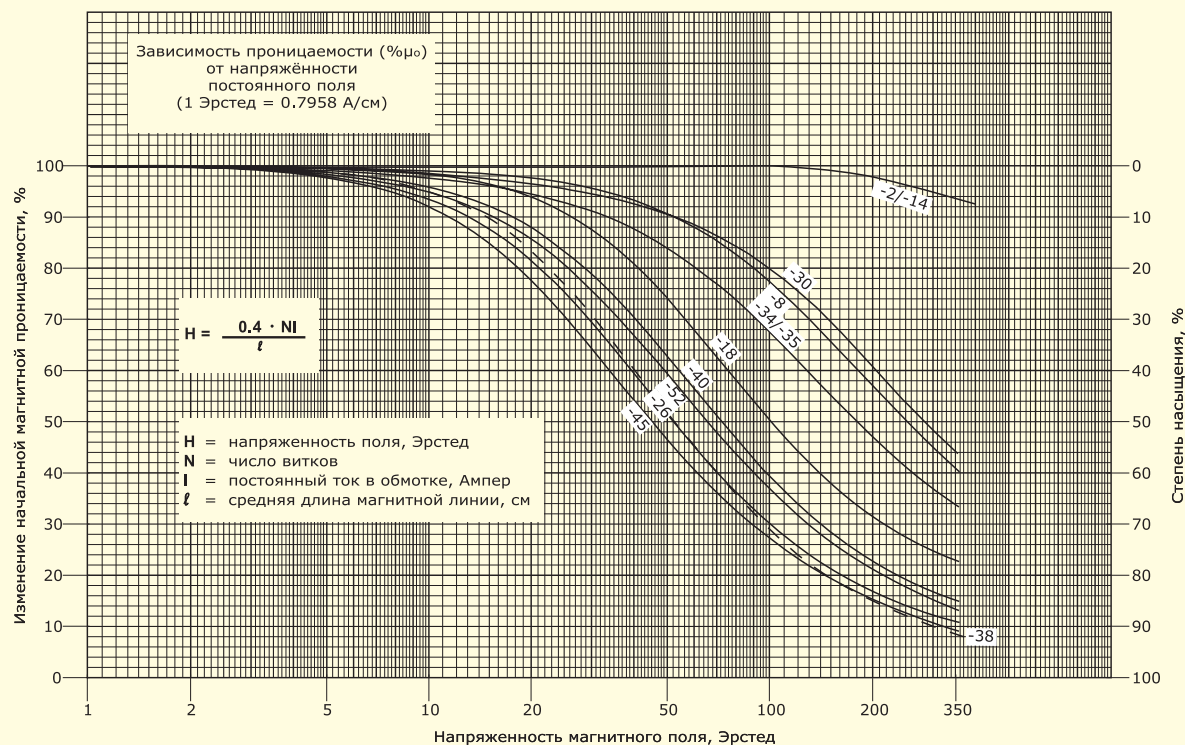
на квадрату действующего значения плотности магнитного потока, деленно-го на эффективную проницаемость сердечника в данных условиях ( $B^2/\mu_{\text{эфф}}$ ). Для материалов, имеющих высокую начальную проницаемость (ферриты), введение воздушного зазора позволяет снизить эффективную проницаемость и увеличить количество накапливаемой в сердечнике энергии за счет 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 распыленного железа ограничения, определяемые допустимым перегревом, сказываются задолго до магнитного насыщения сердечника, благодаря сравнительно низкой (<100) проницаемости, умеренным потерям и «мягкой» характеристике насыщения.

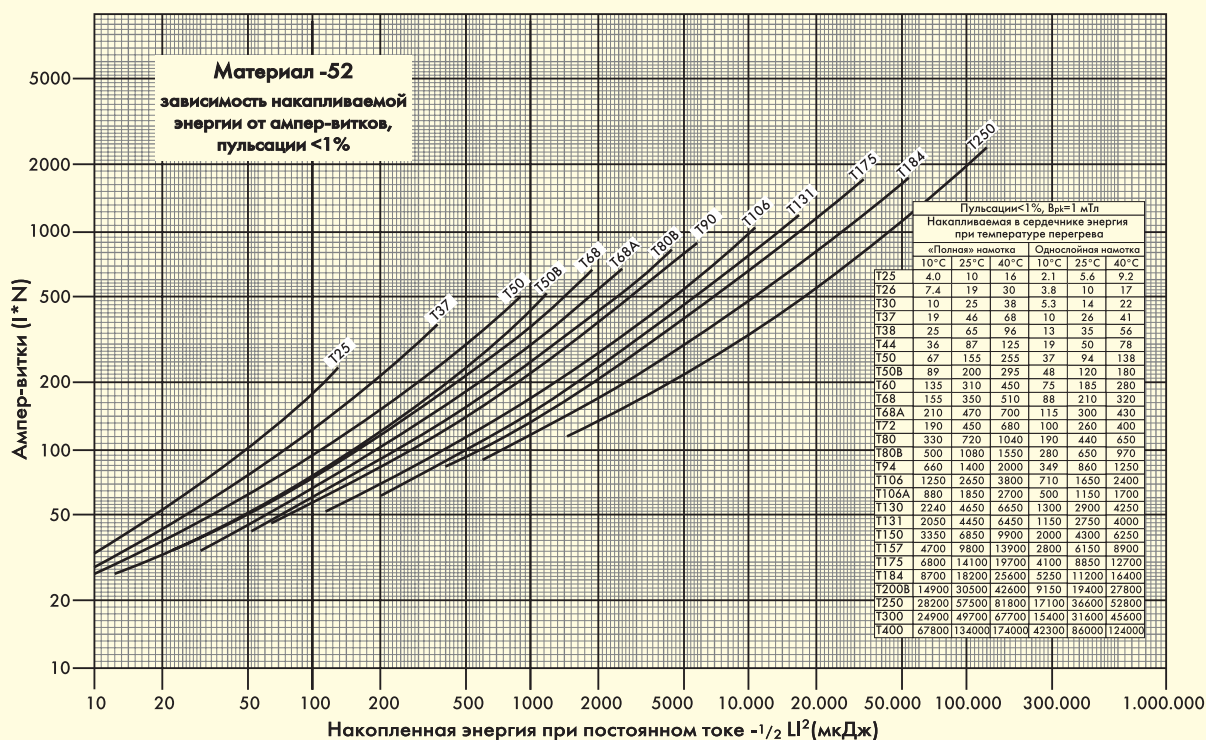
Зависимости изменения проницаемости от напряженности постоянного магнитного поля для различных смесей показаны на рис. 1. Существуют формулы, описывающие эти кривые. Для смесей с высокой начальной проницаемостью, таких, как -26 и -52, допустимой считается эксплуатация при снижении проницаемости на 50%.

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 заметных потерь в сердечнике. Как видно из графиков, чем больше произведение  $I \cdot N$  (ампер-витки), тем больше энергии накапливает сердечник.

Например, при воздействии 150 ампер-витков кольцо T68-52 накапливает 260 микроджоулей. Соответственно, при 600 ампер-витках накапливаемая энер-



**Рисунок 1** Зависимость степени насыщения от напряжённости постоянного магнитного поля

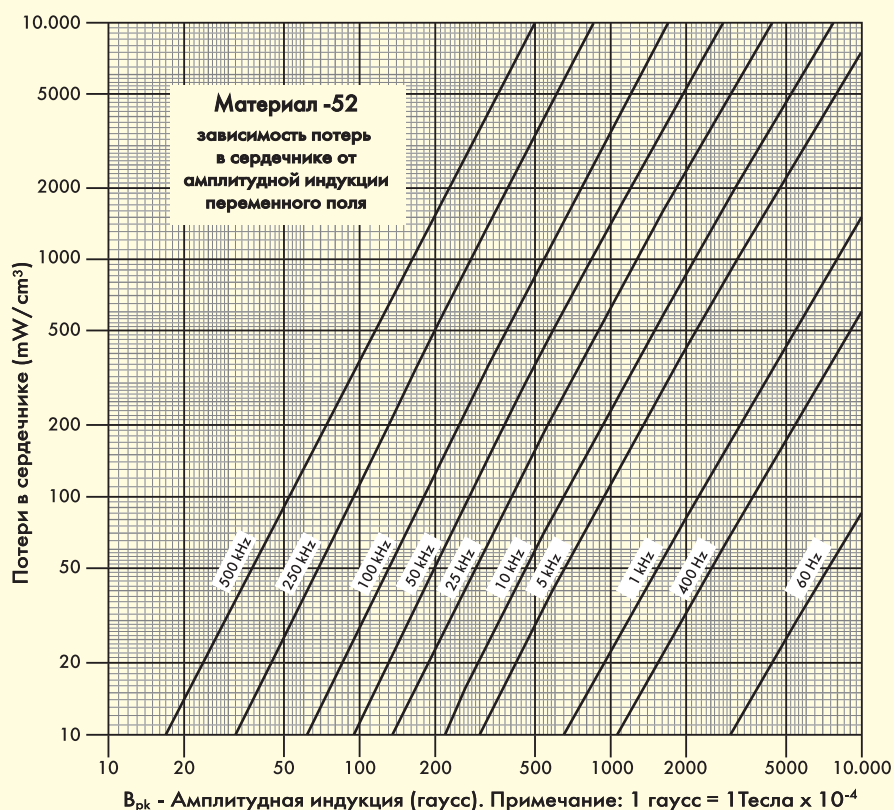


**Рисунок 2** Зависимость числа ампер-витков от накапливаемой сердечником энергии

гия составляет 1400 мкДж. Эти результаты определяются начальной индуктивностью  $A_L$  (нГн/вит<sup>2</sup>) и характеристикой насыщения материала.

Как было замечено выше, в большинстве случаев допустимый температурный перегрев ограничивает количество накапливаемой в сердечнике энергии еще до

достижения магнитного насыщения материала. В представленной на рис. 2 таблице приведены максимальные значения накапливаемой энергии при заданном пре-



**Рисунок 3** Зависимость потерь материала -52 от амплитудной индукции переменного поля

вышении температуры для двух способов намотки. Из этой таблицы видно, что при однослойной намотке (80% внутреннего диаметра кольца остается незаполненным) кольцо Т68-52 может накопить 245 мкДж при перегреве 40 °С. Следовательно, в приведенном выше примере значение 150 ампер-витков для накопления 260 мкДж приведут к разогреву немногим более 40 °С. При заполнении внутреннего диаметра на 55% накопленная в сердечнике энергия 260 мкДж вызовет повышение температуры менее 25 °С. Такая разница в значениях температуры определяется диаметром используемых проводов.

Информация, приведенная в таблице, 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 определенного сечения пропустить через себя ток определен-

ной силы, дает 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, повысится всего на 10 °С. Тот же метод порекомендует провод 2.05 мм для тока 25А, что повлечет повышение температуры на 40 °С.

При намотке в один слой, повышение температуры зависит от плотности тока в обмотке и не зависит от размеров кольца. С учетом этой особенности была получена табл. 3, в которой определены значения тока и диаметры проводов для допустимого повышения температуры на 10, 25 и 40 °С.

Например, как следует из этой таблицы, для тока 3 А при однослойной обмотке и допустимом нагреве на 10 °С, следует использовать провод диаметром 0.912 мм. Если допустимый нагрев из-за потерь в меди не более 25 °С, этот же диаметр может пропустить ток до 5.26 А. При повышении температуры на 40 °С ток может достигать 6.81 А.

Подобная таблица разработана для

«полной» намотки (незаполненными остаются 45% внутреннего диаметра кольца). При постоянном коэффициенте заполнения медью становится возможным определить значения ампер-витков как функцию допустимого повышения температуры для различных типоразмеров колец. В табл. 4 приведены максимальные допустимые значения ампер-витков при заданном нагреве 10, 25 и 40 °С соответственно, возникающем из-за потерь в обмотке, для некоторых типоразмеров колец.

В обеих таблицах 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 моточных изделий на основе колец разного диаметра. Эта информация полезна при определении температуры нагрева как функции рассеиваемой мощности. При получении данных обеих таблиц использовалась следующая формула:

Таблица 3. Зависимость числа витков от диаметра провода при однослойной намотке

Диаметр провода, мм		Намотка в один слой														
R/I, мОм/см		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
Максимальный ток, А, при доп. разогреве	10°С	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°С	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°С	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.	Число витков														
	Площадь поверх., см²															
T16	0.80	0.80	9	6	4	2	1									
T20	0.96	1.16	11	8	5	3	2	1								
T25	1.19	1.88	18	14	10	7	5	4	3	2	1					
T30	1.44	2.79	25	20	15	11	7	6	5	4	3	2	1			
T37	1.53	4.77	37	29	22	17	12	11	9	7	6	5	4	3	2	1
T44	1.84	5.23	43	34	26	20	15	13	11	9	7	6	5	4	3	2
T50	2.01	6.86	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4
T50B	2.32	7.83	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4
T50D	2.95	9.87	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4
T60	2.48	9.84	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6
T60D	3.68	14.3	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6
T68	2.47	11.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7
T68D	3.41	15.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7
T80	2.8	15.5	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11
T80D	4.07	22	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11
T90	3.64	22.4	115	92	72	57	44	39	34	30	26	23	20	17	15	13
T94	3.44	22	117	94	74	58	45	40	35	31	27	24	21	18	15	13
T106	4.49	31	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13
T106A	3.86	26.8	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13
T130	4.75	42.2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20
T131	5.11	42.1	134	107	85	67	52	46	41	36	32	28	24	21	18	16
T141	4.75	46.8	188	151	119	95	75	66	59	52	46	40	35	31	27	24
T150	5.28	53.2	180	145	114	91	71	63	56	49	44	34	38	29	26	22
T157	5.89	63.2	204	164	129	103	81	72	64	56	50	44	39	34	30	26
T175	6.58	79.1	230	186	147	117	92	82	73	64	57	50	44	39	34	30
T184	7.54	89.2	202	63	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26
T200	6.5	90.9	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36
T225	6.93	109	305	245	195	155	123	109	97	86	76	68	60	53	46	41
T250	10.4	166	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36
T300	7.95	173	422	341	271	216	171	153	131	121	108	96	85	75	66	58
T300D	10.5	223	422	341	271	216	171	153	131	121	108	96	85	75	66	58
T400	11.1	301	494	399	317	254	201	179	160	142	136	113	100	88	78	69
T400D	14.4	384	494	399	317	254	201	179	160	142	136	113	100	88	78	69
T520	13.7	496	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97
T650	23.1	986	769	621	494	395	315	281	250	223	199	177	158	139	124	110



Таблица 4. 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		
Уд. 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 поверх., см²	Число витков														10°С	25°С	40°С	10°С	25°С	40°С	
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							12	21	29	0.016	0.055	0.097	
T25	1.19	1.88	30	20	12	8	5	4	3	2	1	1	1				19	34	45	0.030	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	2	42	72	96	0.060	0.180	0.316	
T44	1.84	5.23	112	73	46	30	19	15	12	9	7	6	5	3	3	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	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	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	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	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	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	340	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	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	340	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	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	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	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	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	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	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	2980	5170	6850	15.7	46.9	82.5	

$$(C^{\circ}) = \left[ \frac{\text{Суммарная рассеиваемая мощность, мВт}}{\text{Площадь поверхности, см}^2} \right]^{0.833}$$

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

Возникают вследствие переменного магнитного поля в сердечнике. Потери для конкретного материала зависят от рабочей частоты, размаха магнитной индукции ( $\Delta B$ ), и пропорциональны площади петли гистерезиса. Они имеют три составляющих: потери на перемагничивание (гистерезис), вихревые токи и остаточные потери.

Распыленное 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.

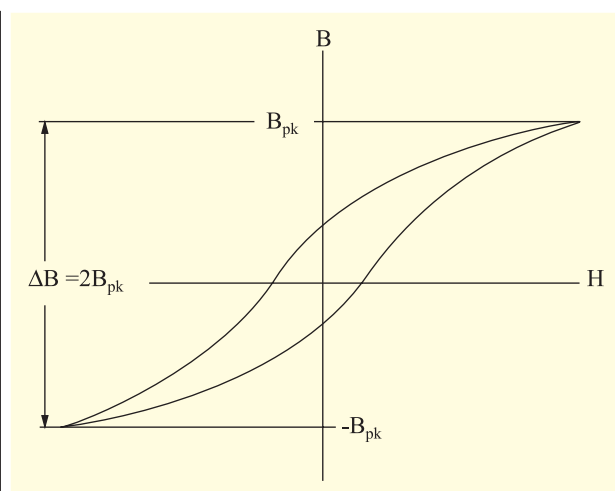
Семейство кривых, характеризующих потери для материала -52, показаны на рис. 3, в виде зависимости мощности рассеяния (мВт/см³) от амплитуды размаха магнитной индукции (гаусс). Информация получена экспериментальным путем при помощи ваттметра фирмы Clarke-Hesse.

Для описания амплитуды магнитной индукции используется следующая формула:

$$B_{pk} = \frac{E_{RMS} * 10^8}{4.44 * A * N * f'}$$

где  $B_{pk}$  – амплитудное значение магнитной индукции (гаусс),  $E_{RMS}$  – действующее значение напряжения (Вольт),  $A$  – площадь эффективного сечения сердечника (см²),  $N$  – число витков,  $f$  – частота (Герц).

Эта формула применима для вычисления амплитудного значения индукции,



**Рисунок 4** Магнитная индукция, возникающая в сердечнике

из которого определяется уровень потерь по рис. 3, при синусоидальной форме тока в обмотке. При этом в сердечнике возникает магнитная индукция, размах которой ( $\Delta B$ ) 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 ( $\Delta B$ ) (см. рис 5).

На рисунке 6 изображена типичная форма прямоугольного сигнала, воздействующего на дроссель в импульсном источнике питания:

Так как произведения  $E \cdot t$  (вольт-секунд) во время включенного и выключенного полупериодов должны быть равны при неизменной скважности, размах индукции  $\Delta B$  для прямоугольного сигнала (не обязательно симметричного) описывается следующей формулой в системе СГС:

$$\Delta B = \frac{E_{pk} \cdot t \cdot 10^8}{A \cdot N},$$

где  $\Delta B$  – размах индукции (гаусс),  $E_{pk}$  – амплитуда напряжения на дросселе (Вольт) за время  $t$ ,  $t$  – продолжительность замкнутого состояния ключа (сек),  $A$  – эффективная площадь сечения сердечника ( $\text{см}^2$ ),  $N$  – число витков.

В однополярных применениях, например, обратныхходовых источниках питания, приведенные выше формулы следует использовать для проверки превышения допустимого для сердечника размаха индукции.

В связи с тем, что на практике принято описание потерь сердечника как функ-

ции амплитудного значения магнитной индукции при симметричной форме сигнала, приведенные кривые потерь подразумевают амплитудное значение индукции  $B_{pk}$ , равное половине размаха  $\Delta B$ . Частота пульсаций, соответственно, равна  $1/t_p$  (рис. 6).

В большинстве случаев для расчета амплитудного значения индукции в дросселе с постоянным током подмагничивания используются следующие формулы:

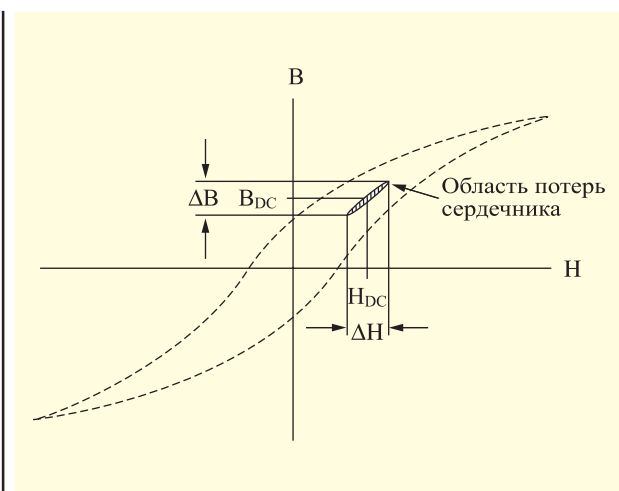
$$B_{pk} = \frac{E_{pk} \cdot t \cdot 10^8}{2 \cdot A \cdot N},$$

где  $B_{pk} = \Delta B/2$  – амплитуда переменной индукции (гаусс),  $E_{pk}$  – амплитуда напряжения на дросселе (Вольт) за время  $t$ ,  $t$  – продолжительность замкнутого состояния ключа (сек),  $A$  – эффективная площадь сечения сердечника ( $\text{см}^2$ ),  $N$  – число витков.

Для расчетов дросселей со связанными обмотками используются те же формулы при допущении, что дроссель име-

ет одну обмотку, так как все обмотки работают согласованно и значения вольт-секунд на виток для них одинаковы.

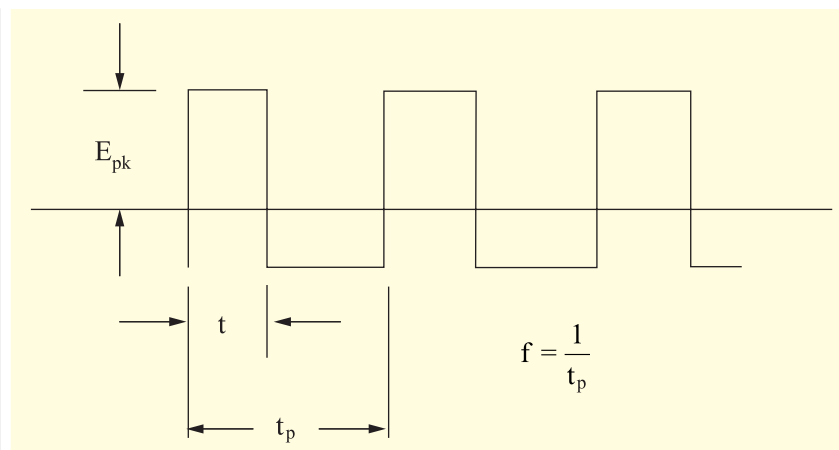
В некоторых применениях, например, корректорах коэффициента мощности, форма сигнала не является симметричной, так как соотношение времени включенного и выключенного состояния ключа непрерывно меняется в течение периода основной частоты (50 или 60 Гц). В этом случае потери в сердечнике определяются как усредненные во времени потери от каждого воздействующего импульса. Возбуждаемая магнитная индук-



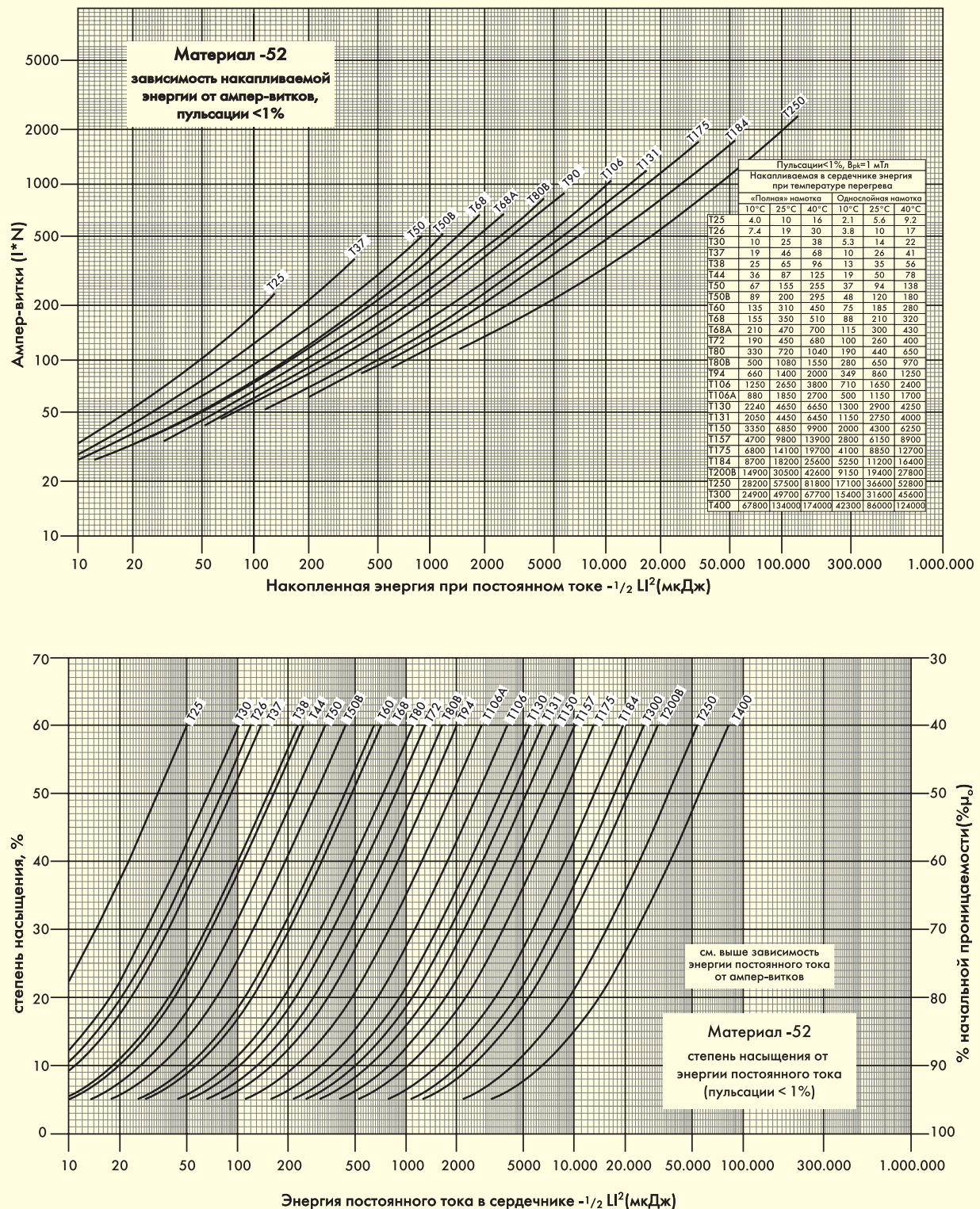
**Рисунок 5** Магнитная индукция, возникающая в сердечнике

**Таблица 5. Рассеиваемая мощность (мВт/см³) 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



**Рисунок 6** Типичная форма напряжения на дросселе в импульсном преобразователе



**Рисунок 7** Соотношение ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -52

ция пропорциональна произведению  $E \cdot t$ , в то время как потери в сердечнике приблизительно пропорциональны квадрату индукции. Для оценки потерь на высоких частотах в подобных устройствах ре-

комендуется использовать предыдущую формулу, в которую подставляется усредненное действующее значение напряжения за период рабочей частоты корректора ( $1/t_p$ ).

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



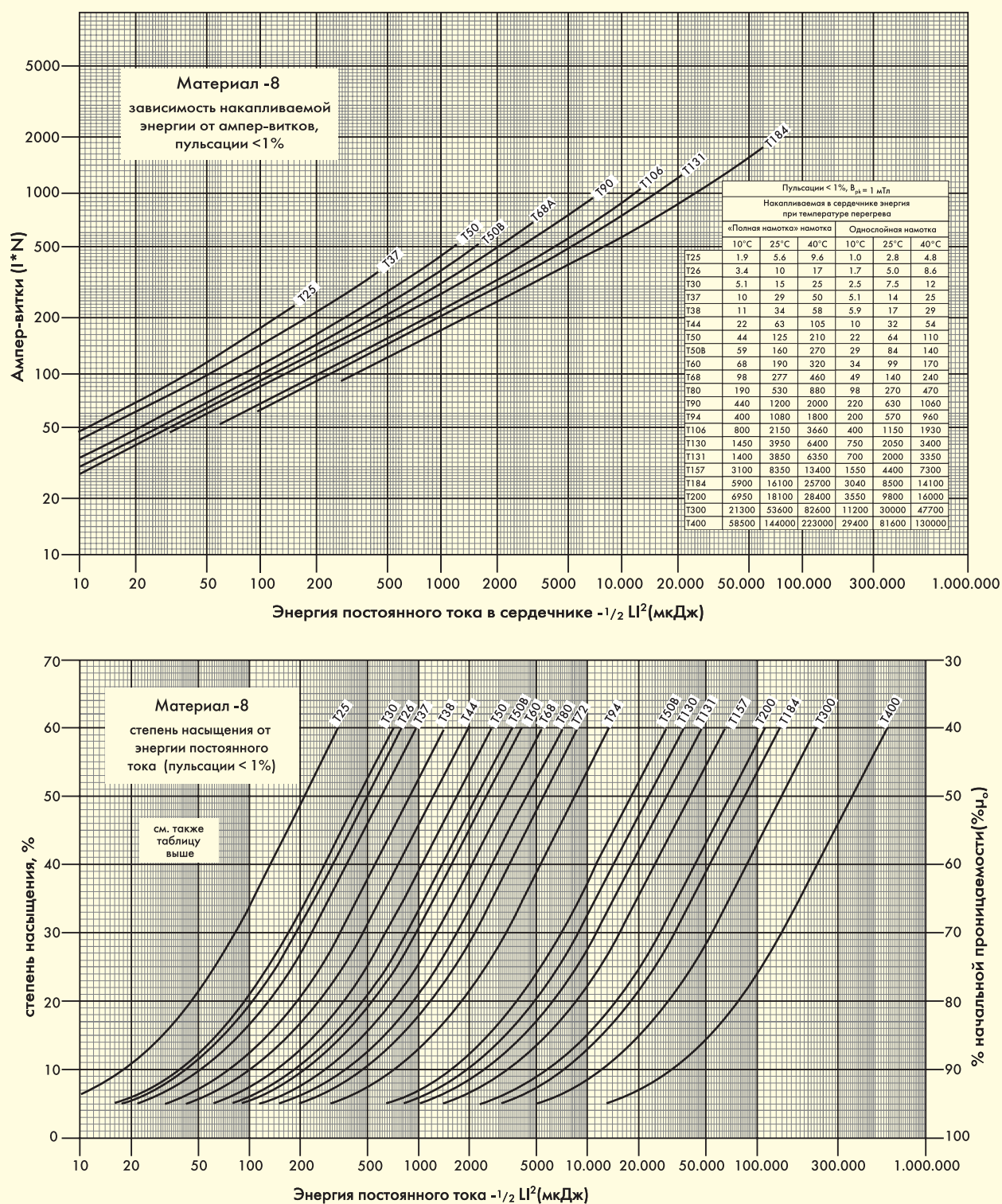


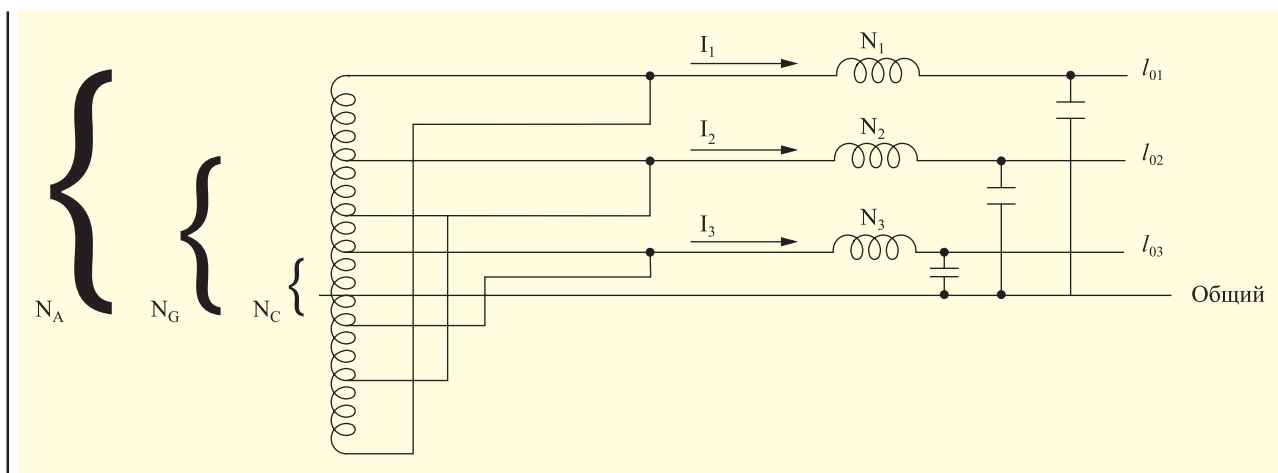
Рисунок 8

Так как теплоотдача кольца пропорциональна площади поверхности, т.е. находится в квадратичной зависимости от линейных размеров, а выделение тепла пропорционально объему (кубическая зависимость), следовательно, маленькие кольца лучше рассеивают теп-

ло по сравнению с кольцами больших размеров. В таблице 5 приведена зависимость рассеиваемой мощности от допустимого нагрева для разных типоразмеров колец. Кольцо T30 имеет наружный диаметр 0.30 дюйма; кольцо T400 соответственно 4 дюйма.

#### ДРОСЕЛИ С ПОСТОЯННЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

Поскольку постоянный ток в обмотке не вызывает потерь в сердечнике, в большинстве случаев основными критериями, определяющими работу дрос-



**Рисунок 9** Структурная схема ИВЭП с тремя выходными напряжениями

селей с постоянным током подмагничивания при малых напряжениях и частотах до 50 кГц, становятся насыщение сердечника и потери в обмотке. Приведенные на рис. 7 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. 7 изображены два семейства кривых. В верхней части показаны зависимости накапливаемой энергии как функции произведения ампер-витков для материала -52. Графики в нижней части показывают зависимость накапливаемой энергии от степени насыщения (степень насыщения = 100% - % от начальной проницаемости).

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 объема 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 в верхней части рисунка 7 следует, что кольцо Т106 способно накопить 1500 мкДж при намотке в один слой и допустимом нагреве 25 °С. Кривая для кольца Т106 пока-

зывает, что для этого потребуются 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 Т106 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 на рис. 8 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 накапливаемой энергии. Типичная ситуация показана на рис. 9.

Для нормальной работы дросселя со связанными обмотками необходимо, что-

бы 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 (см. рис. 10).

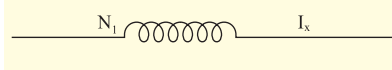
$$I_x = I_1 + I_2 \frac{N_2}{N_1} + I_3 \frac{N_3}{N_1},$$

Поскольку все ампер-витки считают 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 определения требуемого размера Е-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 расчетах. Такой подход значительно упрощает расчеты, однако при возрастании рабочей частоты следует учитывать все составляющие потерь.



**Рисунок 10** Эквивалентный дроссель

(Продолжение следует)