Сердечники из распылённого железа в импульсных источниках питания

(Автор: Джим Кокс, перевод: Терейковский А.С.)

Введение: в этой статье описываются магнитные свойства различных марок распылённого железа при использовании в качестве материала для сердечников индуктивных узлов импульсных источников питания. Ниже рассмотрены различные аспекты применения сердечников из распылённого железа в сглаживающих дросселях, дифференциальных сетевых фильтрах, корректорах коэффициента мощности и высокочастотных преобразователях резонансного типа.

Сердечники из распылённого железа являются одними из наиболее часто используемых при создании индуктивных элементов современных импульсных источников питания. Среди широко распространённых материалов с высокой индукцией насыщения, распылённое железо обладает наименьшей стоимостью. Магнитные свойства распылённого железа наилучшим образом подходят для различных типов дросселей, однако не являются оптимальными при использовании в трансформаторах.

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. Присущая железу высокая индукция насыщения в сочетании с распределённым зазором позволяет получить сердечник с невысокой (<100) магнитной проницаемостью и способностью накопления значительной энергии.

Существующие технологии позволяют получать из распылённого железа сердечники различных форм и размеров. Одна пресс-форма позволяет получать несколько отличающихся по толщине сердечников в зависимости от развиваемого прессом давления. Заказная пресс-форма относительно недорога; обычно она стоит около $1000 за каждый дюйм главного линейного размера.

Распылённое железо допускает достаточно жёсткие условия эксплуатации. Оно имеет достаточно высокую температурную стабильность и выдерживает значительные механические нагрузки без заметных изменений свойств.

Общие свойства различных марок (смесей) распылённого железа приведены в **Таблице1**:

Общие свойства материалов				
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	Салатный/красный
-19	55	6,8	1,7	Красный/салатный
-26	75	7,0	1,0	жёлтый/белый
-30*	22	6,0	1,4	салатный/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	Салатный/жёлтый
-45	100	7,2	2,6	Чёрный/чёрный
-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 1. ***Общие свойства различных марок распылённого железа***

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 **Таблице 2**:

Типичное применение	-2	-8	-14	-18	-19	-26	-30	-34	-35	-38	-40	-45	-52
Балластные дроссели 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										

Таблица 2. ***Типичные области применения различных марок распылённого железа***

Общие положения. Количество накапливаемой дросселем энергии (в микроджоулях) вычисляется как половина произведения индуктивности (в микрогенри) на квадрат тока (в Амперах). Эта энергия пропорциональна квадрату действующего значения плотности магнитного потока, делённого на эффективную проницаемость сердечника в данных условиях ($B^2/\mu_{эфф}$). 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 распылённого 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 **Рисунке 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%.

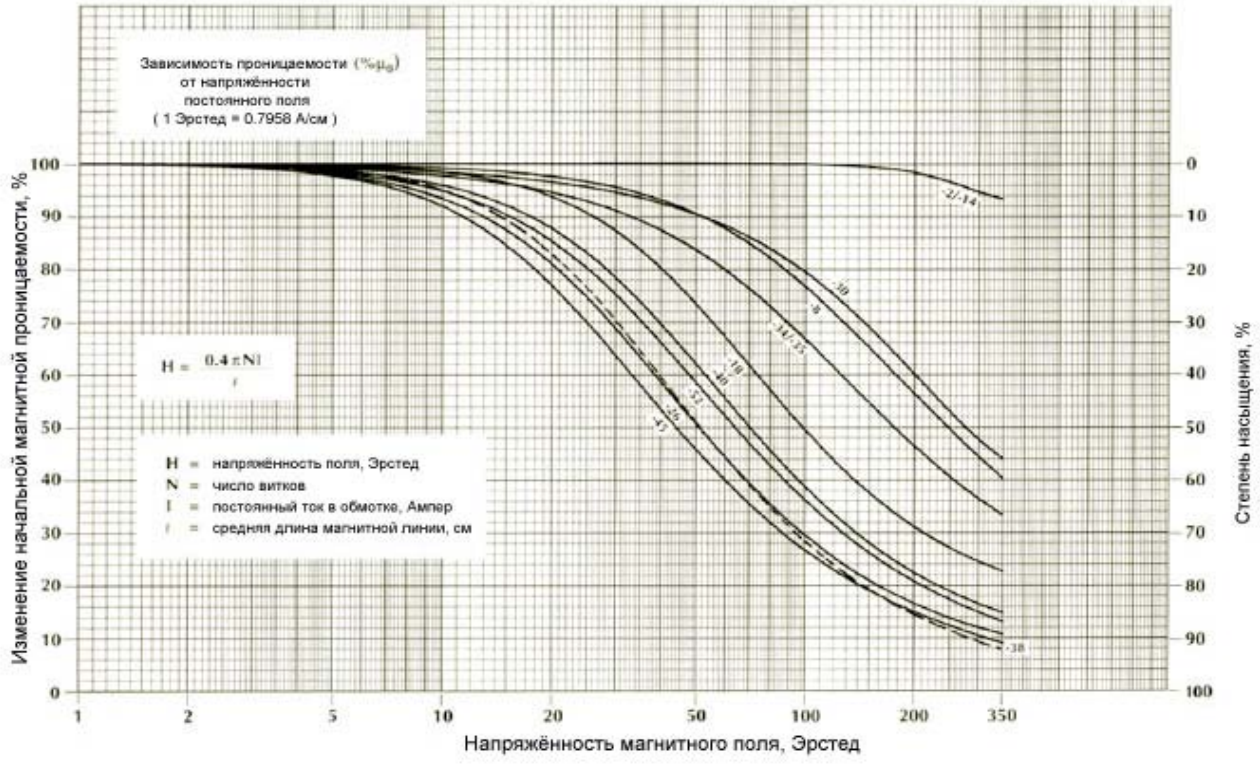


Рисунок 1. ***Зависимость степени насыщения от напряжённости постоянного магнитного поля***

На **Рисунке 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*N (ампер-витки), тем больше энергии накапливает сердечник.

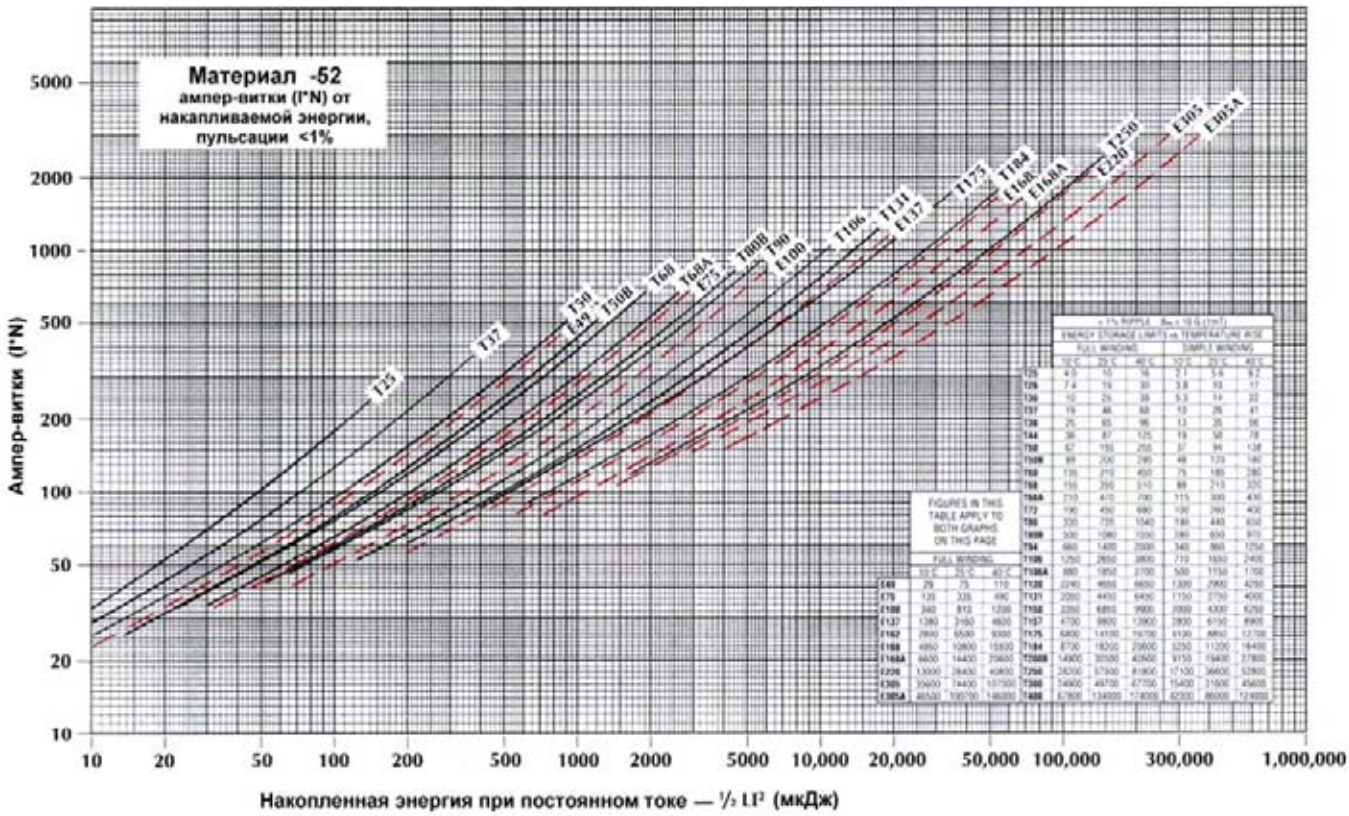


Рисунок 2. ***Зависимость числа ампер-витков от накапливаемой сердечником энергии***

Например, при воздействии150 ампер-витков кольцо Т68-52 накапливает 260 микроджоулей. Соответственно, при 600 ампер-витках накапливаемая энергия составляет 1400 мкДж. Эти результаты определяются начальной индуктивностью A_L (нГн/вит^2) 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 представленной на **Рисунке 3** таблице 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 разогреве 40 С°. Следовательно, в приведённом выше примере 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 вышеприведенного примера, 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, повысится всего на 10 С°. Тот же метод порекомендует провод 2.05 мм для тока 25А, что повлечёт 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 учётом этой особенности была получена **Таблица 3**, в которой определены значения тока и диаметры проводов для допустимого повышения температуры на 10, 25 и 40 С°.

Например, как следует из таблицы, для тока 3А 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.

Намотка в один слой																		
Д-р провода, мм			.32	.404	.511	.643	.813	.912	1.02	1.15	1.29	1.45	1.63	1.83	2.05	2.30	2.60	Общая рассеиваемая мощность, Вт от температуры
R / l, мОм/см			2.13	1.34	.842	.530	.330	.264	.210	.166	.132	.104	.0828	.0651	.0521	.0413	.0328	
Макс.ток, А при доп-м разогреве:		10C°	.64	.90	1.29	1.83	2.62	3.12	3.72	4.45	5.33	6.35	7.60	9.03	10.8	12.9	15.4	
		25C°	1.07	1.52	2.17	3.09	4.41	5.26	6.27	7.50	8.97	10.7	12.8	15.2	18.2	21.7	26.0	
		40C°	1.38	1.97	2.81	4.00	5.70	6.81	8.11	9.70	11.6	13.8	16.6	19.7	23.5	28.1	33.6	
Тип	Ср-я длина, см/вит	Пл-дь пов-ти (см²)	ЧИСЛО ВИТКОВ															10C°	25C°	40C°
T16	.80	.80	9	6	4	2	1											.013	.038	.067
T20	.96	1.16	11	8	5	3	2	1										.018	.055	.097
T25	1.19	1.88	18	14	10	7	5	4	3	2	1							.030	.089	.157
T26	1.74	2.67	15	11	8	5	3	2	1									.042	.127	.223
T30	1.44	2.79	25	20	15	11	7	6	5	4	3	2	1	1				.044	.133	.233
T37	1.53	3.77	37	29	22	17	12	11	9	7	6	5	4	3	2	1	1	.060	.180	.316
T38	1.92	4.43	31	24	18	13	10	8	7	5	4	3	2	2	1			.071	.211	.371
T44	1.84	5.23	43	34	26	20	15	13	11	9	7	6	5	4	3	2	1	.083	.249	.437
T50	2.01	6.86	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.109	.326	.574
T50B	2.32	7.83	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.125	.373	.659
T50D	2.95	9.87	59	47	37	28	22	19	16	14	12	10	8	7	6	4	3	.157	.470	.826
T51C	2.58	7.56	36	28	22	16	12	10	9	7	6	5	4	3	2	1		.120	.360	.633
T60	2.48	9.84	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.156	.468	.824
T60D	3.68	14.3	67	53	41	32	25	21	19	16	14	12	10	8	7	6	4	.228	.681	1.20
T68	2.47	11.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.178	.533	.936
T68A	2.77	12.5	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.198	.594	1.04
T68D	3.41	15.2	74	59	46	36	28	24	21	18	16	14	12	10	8	7	5	.241	.722	1.27
T72	3.15	13.3	54	43	33	26	19	17	14	12	11	9	7	6	5	4	3	.212	.634	1.11
T80	2.80	15.5	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.246	.736	1.30
T80B	3.44	18.7	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.298	.892	1.57
T80D	4.07	22.0	103	82	64	51	39	35	30	27	23	20	17	15	13	11	9	.350	1.05	1.84
T90	3.64	22.4	115	92	72	57	44	39	34	30	26	23	20	17	15	13	11	.356	1.07	1.88
T94	3.44	22.0	117	94	74	58	45	40	35	31	27	24	21	18	15	13	11	.350	1.05	1.85
T106	4.49	31.0	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.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	.427	1.28	2.25
T106B	5.19	35.5	118	95	74	59	46	40	36	31	27	24	21	18	15	13	11	.565	1.69	2.97
T124	3.95	33.3	150	120	95	75	59	52	46	40	36	31	27	24	21	18	15	.529	1.58	2.79
T130	4.75	42.2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.671	2.01	3.53
T130A	3.67	33.2	165	133	105	83	65	58	51	45	40	35	31	27	23	20	17	.529	1.58	2.78
T131	5.11	42.1	134	107	85	67	52	46	41	36	32	28	24	21	18	16	13	.669	2.00	3.52
T132	4.95	42.2	147	118	93	74	58	51	45	40	35	31	27	23	20	18	15	.671	2.01	3.53
T141	4.75	46.8	188	151	119	95	75	66	59	52	46	40	35	31	27	24	20	.744	2.23	3.92
T150	5.28	53.2	180	145	114	91	71	63	56	49	44	38	34	29	26	22	19	.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	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.42	4.25	7.47
T200	6.50	90.9	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.45	4.33	7.61
T200B	8.78	120	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	1.91	5.74	10.1
T201	8.90	111	202	163	129	102	81	72	63	56	50	44	38	34	29	26	22	1.76	5.28	9.28
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
T225B	9.21	143	305	245	195	155	123	109	97	86	76	68	60	53	46	41	36	2.27	6.79	11.9
T250	10.4	166	270	217	172	137	108	96	86	76	67	60	53	46	41	36	31	2.63	7.88	13.9
T300	7.95	173	422	341	271	216	171	153	136	121	108	96	85	75	66	58	52	2.75	8.23	14.5
T300D	10.5	223	422	341	271	216	171	153	136	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	126	113	100	88	78	69	61	4.79	14.3	25.2
T400D	14.4	384	494	399	317	254	201	179	160	142	126	113	100	88	78	69	61	6.10	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
T520D	17.7	629	680	550	437	350	278	248	221	197	176	156	139	123	109	97	86	10.0	30.0	52.7
T650	23.1	986	769	621	494	396	315	281	250	223	199	177	158	139	124	110	98	15.7	46.9	82.5

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

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 **Таблице 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 и Е-сердечников.

"ПОЛНАЯ" НАМОТКА (заполнение внутреннего диаметра 55%)																								
Д-р провода, мм			.32	.404	.511	.643	.813	.912	1.02	1.15	1.29	1.45	1.63	1.83	2.05	2.30	2.60	АМПЕР-ВИТКИ ОТ НАГРЕВА ИЗ-ЗА ПОТЕРЬ В ОБМОТКЕ			ОБЩАЯ РАССЕИВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ, Вт ОТ НАГРЕВА		
Уд.сопр., мОм/см			2.13	1.34	.842	.530	.330	.264	.210	.166	.132	.104	.0828	.0651	.0521	.0413	.0328						
ТИП	Ср-я длина см/вит	П-дь пов-ти см²	ЧИСЛО ВИТКОВ															10C°	25C°	40C°	10C°	25C°	40C°
T16	.80	.80	13	8	5	3	2	1	1	1								10	17	23	.013	.038	.067
T20	.96	1.16	16	6	4	2	2	1	1	1	1							12	21	29	.018	.055	.097
T25	1.19	1.88	30	20	12	8	5	4	3	2	2	1	1	1				19	34	45	.030	.089	.157
T26	1.74	2.67	23	15	9	6	4	3	2	2	1	1	1					16	29	39	.042	.127	.223
T30	1.44	2.79	48	32	20	13	8	6	5	4	3	2	2	1	1	1		27	47	62	.044	.133	.233
T37	1.53	3.77	90	59	37	24	15	12	9	7	6	5	4	3	2	2	1	42	72	96	.060	.180	.316
T38	1.92	4.43	65	43	27	17	11	9	7	5	4	3	2	2	1	1	1	34	60	79	.071	.211	371
T44	1.84	5.23	112	73	46	30	19	15	12	9	7	6	5	3	3	2	2	50	87	110	.083	.249	.437
T50	2.01	6.86	196	128	81	52	33	26	21	17	13	10	8	6	5	4	3	73	120	160	.109	.326	.574
T51C	2.58	7.56	85	56	35	23	14	11	9	7	6	4	3	3	2	1	1	44	77	100	.120	.360	.633
T60	2.48	9.84	241	158	100	65	41	33	26	21	16	13	10	8	6	5	4	87	150	200	.156	.468	.824
T68	2.47	11.2	293	192	122	78	50	40	32	25	20	16	13	10	8	6	5	100	170	230	.178	.533	.936
T72	3.15	13.3	168	110	69	45	28	22	18	14	11	9	7	5	4	3	3	75	130	170	.212	.634	1.11
T80	2.80	15.5	525	343	218	141	89	71	57	45	36	29	23	18	14	11	9	150	260	340	.246	.736	1.30
T90	3.64	22.4	648	424	269	174	110	88	70	56	45	36	28	22	18	14	11	170	300	400	.356	1.07	1.88
T94	3.44	22.0	672	440	279	180	114	91	73	58	46	37	29	23	18	14	11	180	320	420	.350	1.05	1.85
T106	4.49	31.0	696	455	289	187	118	95	75	60	48	38	30	24	19	15	12	190	330	440	.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	.529	1.58	2.79
T130	4.75	42.2	1303	853	542	350	222	177	142	113	90	72	57	45	36	28	23	300	520	690	.671	2.01	3.53
T131	5.11	42.1	877	574	365	236	149	119	95	76	61	48	38	30	24	19	15	240	410	550	.669	2.00	3.52
T132	4.95	42.2	1050	687	437	282	179	143	114	91	73	58	46	36	29	23	18	260	460	610	.671	2.01	3.53
T141	4.75	46.8	1659	1086	690	446	283	226	180	144	115	92	73	57	46	36	29	360	620	820	.744	2.23	3.92
T150	5.28	53.2	1530	1002	636	411	261	208	166	132	106	85	67	53	42	33	27	350	600	800	.846	2.53	4.45
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	1606	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	1266	805	520	329	263	210	168	134	107	85	67	53	42	34	420	730	970	1.42	4.25	7.47
T200	6.50	90.9	3348	2192	1393	933	571	456	365	290	232	186	148	116	93	74	59	610	1050	1400	1.45	4.33	7.61
T201	8.90	111	1933	1266	805	520	329	263	210	168	134	107	85	67	53	42	34	430	750	1000	1.76	5.28	9.28
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	7.88	13.9
T300	7.95	173	7981	5227	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	10.8K	7104	4515	2916	1850	1480	1182	942	754	602	479	378	301	240	191	1530	2650	3510	4.79	14.3	25.2
T520	13.7	496	20.3K	13.3K	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	26.2K	17.2K	10.9K	7057	4477	3581	2861	2280	1824	1458	1159	914	729	581	463	2980	5170	6850	15.7	46.9	82.5
Е-сердечники																								
E49	2.54	5.09	96	48	30	21	12	10	8	4	3	3	2	2	1	0	0	41	72	96	.081	.242	.426
E75	3.81	11.2	250	160	96	60	40	24	21	18	12	10	8	4	3	3	2	74	120	170	.178	.532	.936
E100	5.08	18.1	351	242	136	98	55	45	32	28	18	15	10	8	8	6	3	100	170	220	.289	.864	1.52
E118	5.38	29.6	598	370	232	161	90	80	56	52	33	30	18	16	14	12	5	150	270	360	.470	1.41	2.48
E125	6.42	34.4	637	390	248	175	100	90	64	56	36	33	18	16	14	12	6	150	270	360	.547	1.64	2.88
E137	6.99	36.4	731	442	297	176	119	90	65	60	44	36	24	21	12	10	10	160	280	370	.579	1.73	3.05
E145	7.38	45.1	896	585	360	232	138	120	90	64	56	36	33	30	18	14	14	190	340	450	.717	2.15	3.77
E162	8.26	50.9	784	507	310	200	140	108	80	70	48	44	27	24	14	12	12	190	320	430	.809	2.42	4.26
E168	8.85	66.7	1460	944	564	370	240	189	144	126	95	64	60	39	33	30	18	270	470	620	1.06	3.18	5.58
E168A	9.35	73.1	1460	944	564	370	240	189	144	126	95	64	60	39	33	30	18	278	480	630	1.16	3.48	6.12
E187	9.50	67.4	952	585	396	232	161	120	90	80	56	48	33	30	18	14	14	210	370	500	1.07	3.21	5.64
E220	11.5	113	2024	1332	826	517	342	272	210	162	144	105	76	68	45	39	33	370	640	850	1.81	5.40	9.50
E225	11.4	97.6	1360	864	559	350	216	168	132	114	85	60	52	36	30	27	16	280	490	650	1.55	4.65	8.17
E305	15.5	208	3999	2600	1660	1072	689	564	420	342	272	210	162	144	105	76	68	610	1060	1400	3.30	9.88	17.4
E305A	16.3	226	3999	2600	1660	1072	689	564	420	342	272	210	162	144	105	76	68	620	1070	1400	3.59	10.8	18.9
E450	22.8	384	6298	4104	2580	1725	1100	833	704	546	420	341	280	225	176	133	102	850	1480	1970	6.10	18.3	32.1
E450H	21.1	328	6298	4104	2580	1725	1100	833	704	546	420	341	280	225	176	133	102	820	1420	1890	5.21	15.6	27.4

Таблица 4. ***Зависимость числа витков от диаметра провода при многослойной намотке***

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 ($см^2$) 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:

$$\text{Нагрев (C°)} = \left[\frac{\text{Суммарная рассеиваемая мощность, мВт}}{\text{Площадь поверхности, см}^2}\right]^{0,833}$$

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 (ΔB), и пропорциональны площади петли гистерезиса. Они имеют три составляющих: потери на перемагничивание (гистерезис), вихревые токи и остаточные потери.

Распылённое железо имеет более высокие потери по сравнению с другими материалами с высокой индукцией насыщения (Mo-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 **Рисунке 3**, в виде зависимости мощности рассеяния ($мВт/см^3$) от амплитуды размаха магнитной индукции (гаусс). Информация получена экспериментальным путём при помощи ваттметра фирмы Clarke-Hesse.

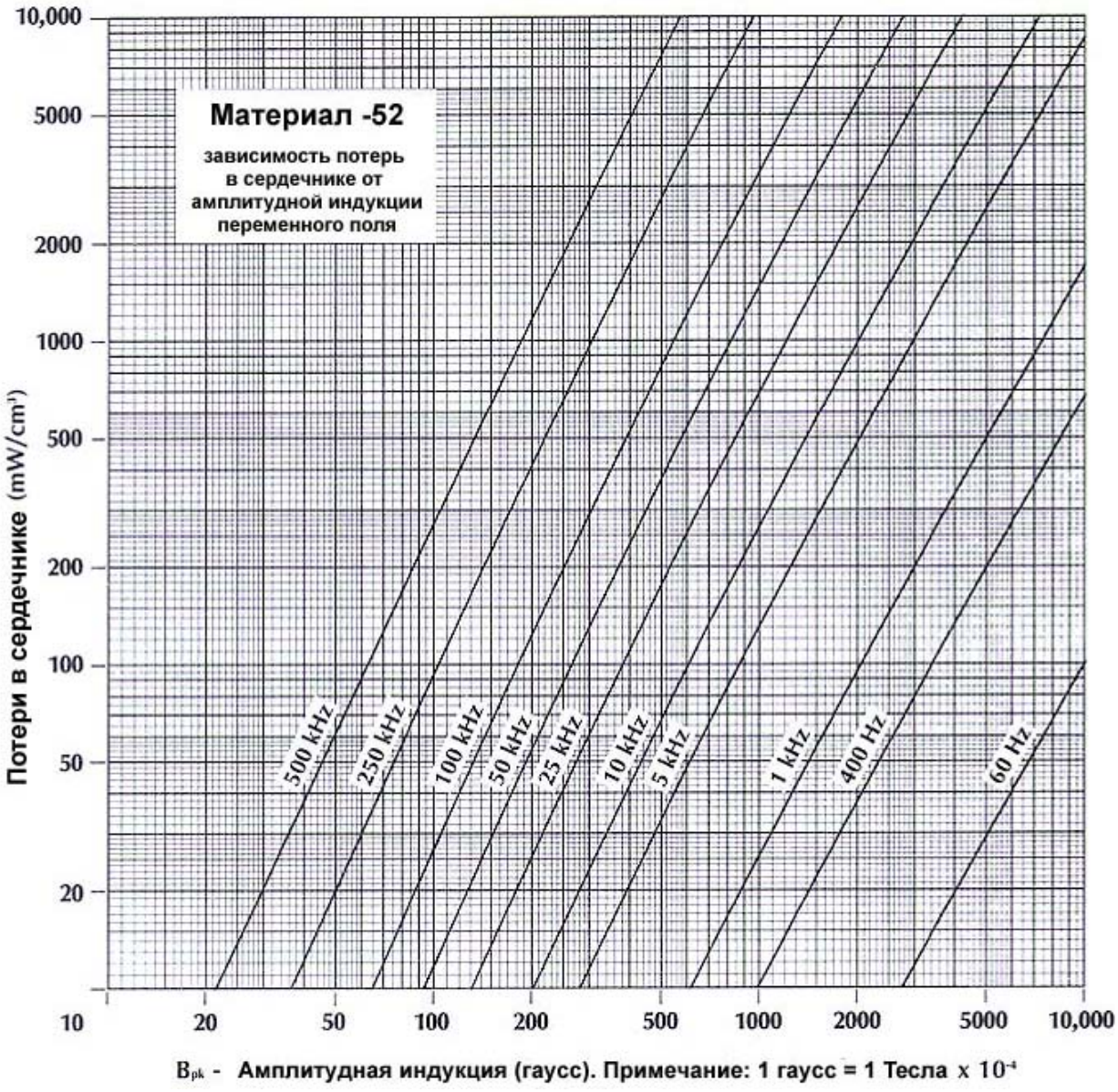


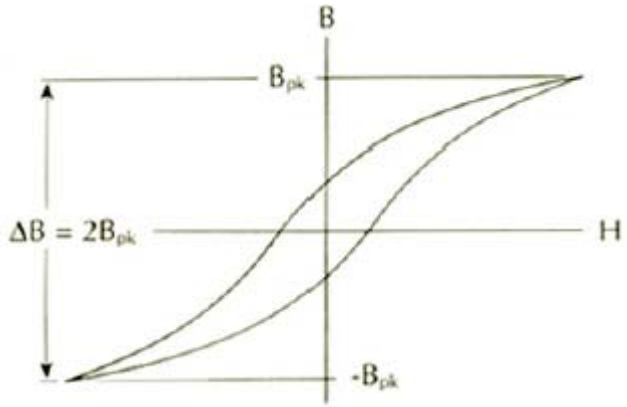
Рисунок 3. ***Зависимость потерь материала –52 от амплитудной индукции переменного поля***

Для описания амплитуды магнитной индукции используется следующая формула:

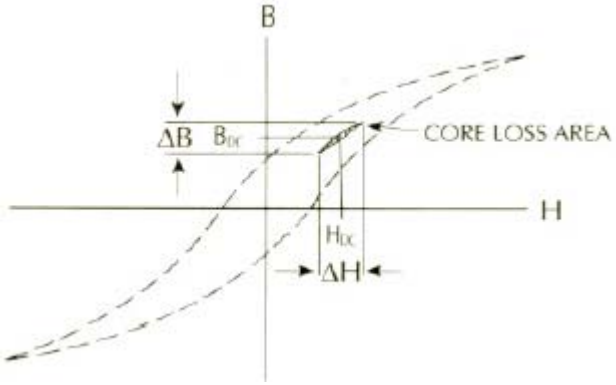
$$B_{pk} = \frac{E_{RMS} * 10^8}{4{,}44 * A * N * f}$$, где:

B_{pk} = амплитудное значение магнитной индукции (гаусс),
E_{RMS} = действующее значение напряжения (Вольт),
A = площадь эффективного сечения сердечника ($см^2$),
N = число витков,
f = частота (Герц).

Эта формула применима для вычисления амплитудного значения индукции, из которого определяется уровень потерь по **Рисунку 3**, при синусоидальной форме тока в обмотке. При этом в сердечнике возникает магнитная индукция, размах которой (ΔB) вдвое превышает полученное по формуле амплитудное значение (Bpk):



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 **Рисунке 4** изображена типичная форма прямоугольного сигнала, воздействующего на дроссель в импульсном источнике питания:

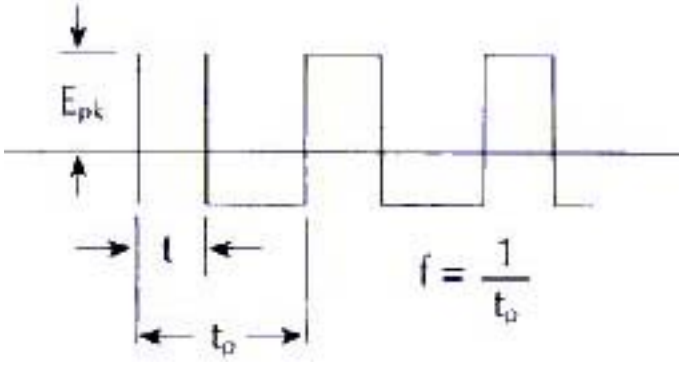


Рисунок 4. ***Типичная форма напряжения на дросселе в импульсном преобразователе***

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

$$\Delta B = \frac{E_{pk} * t * 10^8}{A * N}, \text{ где:}$$

ΔB = размах индукции (гаусс),
E_{pk} = амплитуда напряжения на дросселе (Вольт) за время t,
t = продолжительность замкнутого состояния ключа (сек),
A = эффективная площадь сечения сердечника ($см^2$),
N = число витков

В однополярных применениях, например, обратноходовых 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 функции амплитудного значения магнитной индукции при симметричной форме сигнала, приведенные кривые потерь подразумевают амплитудное значение индукции Bpk , равное половине размаха ΔB. Частота пульсаций, соответственно, равна $1/t_p$ (**Рисунок 4**).

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

$$B_{pk} = \frac{E_{pk} * t * 10^8}{2 * A * N}, \text{ где:}$$

B_{pk} = ΔB/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 ($см^2$),
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 включённого 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 E * t, 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 ($1/t_p$).

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), следовательно, кольца меньших размеров лучше рассеивают тепло по сравнению с более крупными. Ниже приведена **Таблица 5**, иллюстрирующая зависимость рассеиваемой мощности от допустимого нагрева для разных типоразмеров колец. Кольцо T30 имеет наружный диаметр 0.30 дюйма; кольцо T400 соответственно 4 дюйма:

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 5. ***Рассеиваемая мощность (мВт/см^3) при допустимом нагреве***

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. Приведенные на **Рисунке 5** 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 **Рисунке 5** изображены два семейства кривых. В верхней части приведены 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).

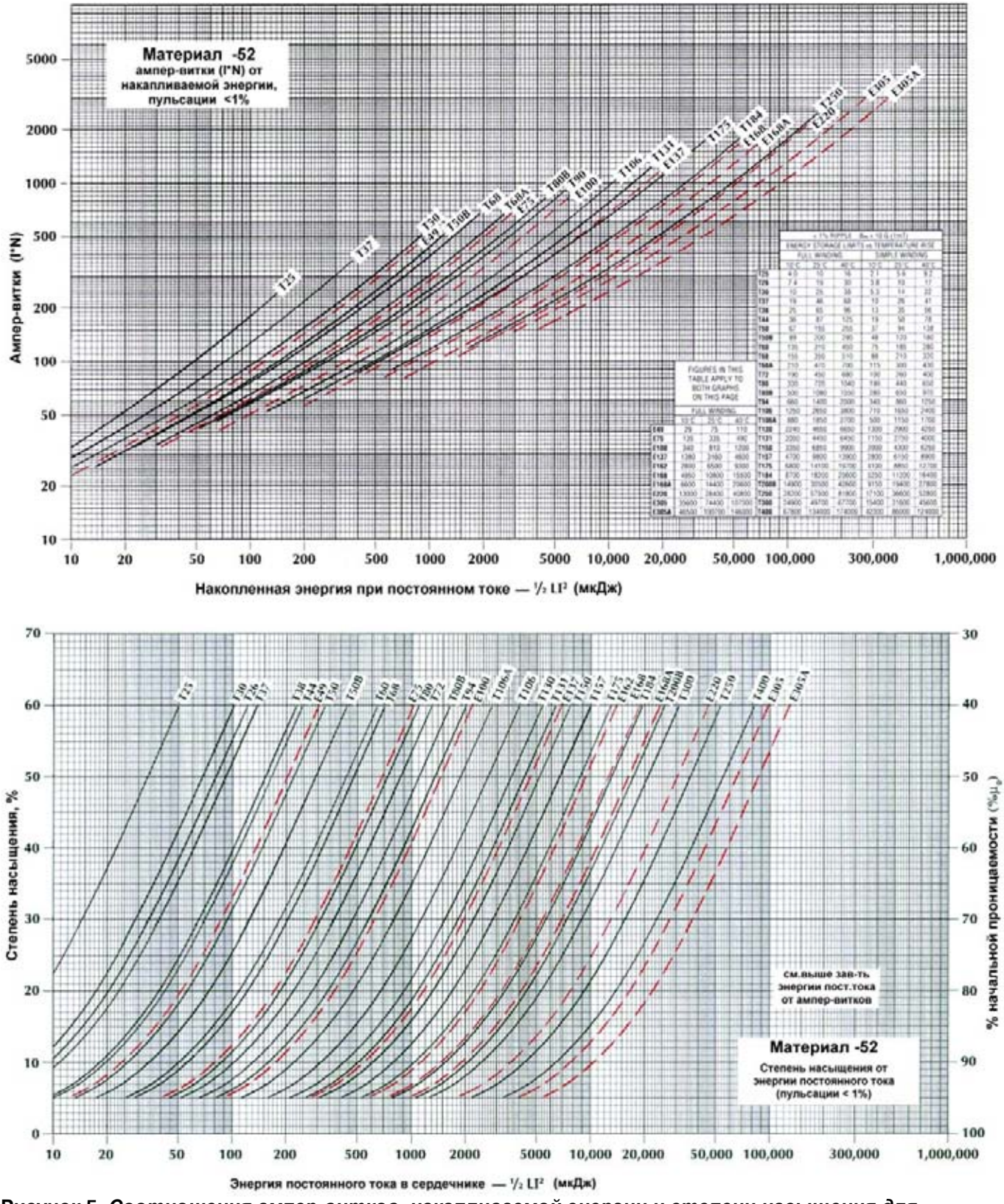


Рисунок 5. ***Соотношения ампер-витков, накапливаемой энергии и степени насыщения для материала -52***

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 10А. При этих условиях накапливаемая дросселем энергия составит 1500 мкДж. Из таблицы в верхней части **Рисунка 5** следует, что кольцо Т106 способно накопить 1500 мкДж при намотке в один слой и допустимом нагреве 25 С°. Кривая для кольца Т106 показывает, для этого потребуется около 250 ампер-витков. Так как величина тока в обмотке составляет 10А, 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 1.29мм.

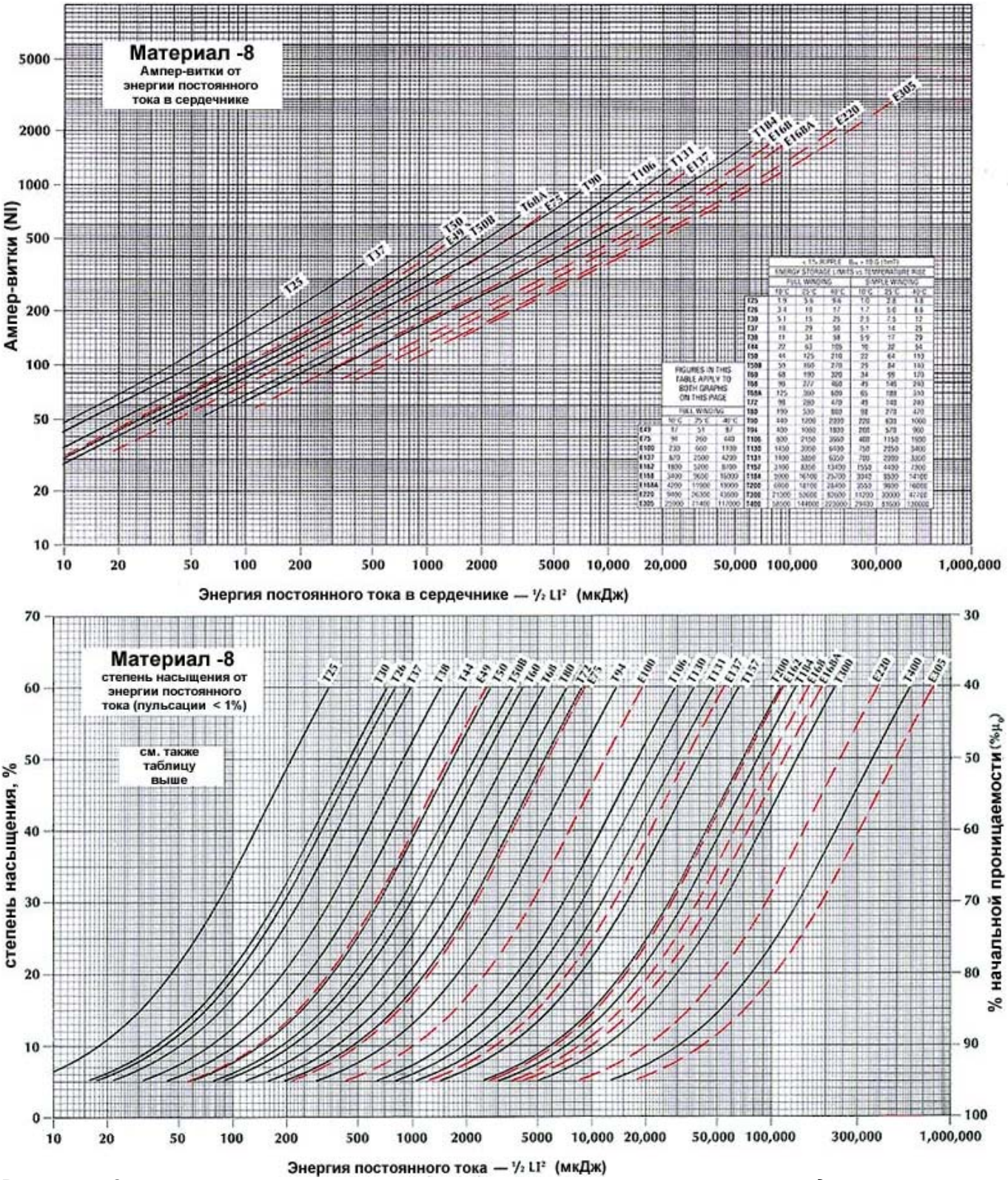
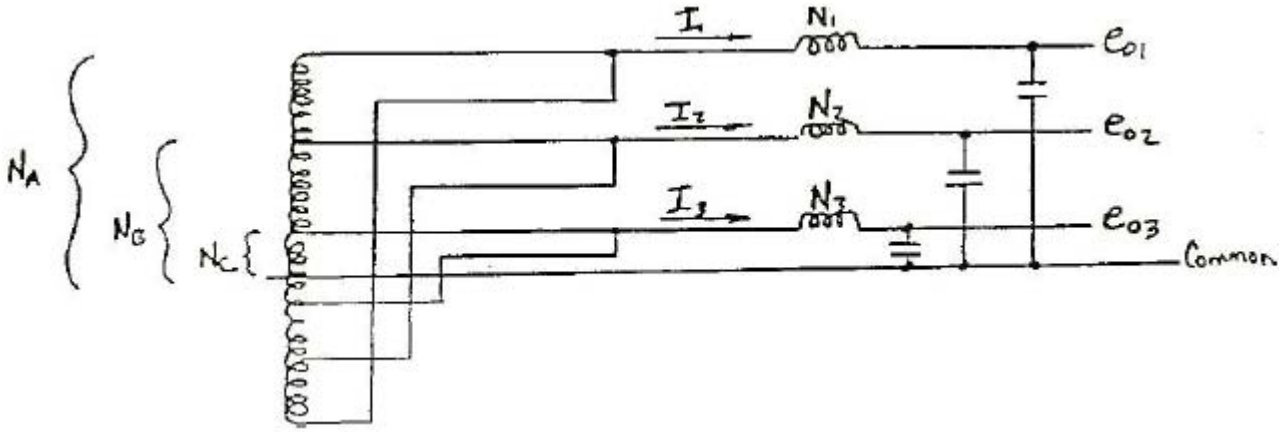


Рисунок 6. ***Зависимость значения ампер-витков от энергии постоянного тока для материала -8***

Если рассматривать в качестве материала сердечника смесь –8, с помощью таблицы на **Рисунке 6** 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.

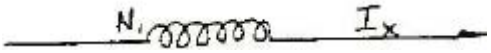
Дроссели со связанными обмотками обычно используют на выходе преобразователей с несколькими выходными напряжениями для улучшения характеристики регулирования. В этом случае также могут быть использованы кривые зависимости накапливаемой энергии. Типичная ситуация показана ниже:



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 амепр-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 включёнными в обмотку N_1, общая накапливаемая дросселем энергия определяется исходя из эквивалентной индуктивности обмотки 1 и эффективного тока I_X:

$$\frac{1}{2}LI_X^2$$

Полученное количество энергии используется для последующего определения требуемого размера Е-образного или тороидального сердечника. По кривым накапливаемой энергии определяется значение ампер-витков (N_1I_X), из которого легко вычисляется количество витков N_1. Витки N_2 и N_3 вычисляются из известных соотношений между обмотками.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТЕРЬ (мВт/см^3) — **Проницаемость при пост. токе**

Материал № смеси	60 Гц 0.5Тл	1кГц 0.15Тл	10кГц 50мТл	50 кГц 22.5мТл	100 кГц 14мТл	500 кГц 5мТл	HDC = 62.83 А/см %μ_0	HDC = 62.83 А/см μ эффективная
-2	19 **	32**	32**	28	19	12	100	10.0
-8	45	64	59	50	35	28	91	31.9
-14	19 **	32**	32**	29	21	17	100	14.0
-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	20.0
-34	29	61	87	100	82	78	84	27.7
-35	33	73	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	46.0
-52	30	56	68	72	58	63	59	44.3

** Потери на низких частотах экстраполированы из результатов измерений потерь на высоких частотах

Рисунок 7. ***Сравнительные характеристики потерь материалов***

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.

Специально для дросселей с высокими частотами пульсаций несколько лет назад были разработаны два новых материала: -18 и –52. На **Рисунке 7** приведены сравнительные характеристики различных 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 **Рисунке 8** показана зависимость изменения начальной проницаемости различных материалов от амплитудного значения магнитной индукции.

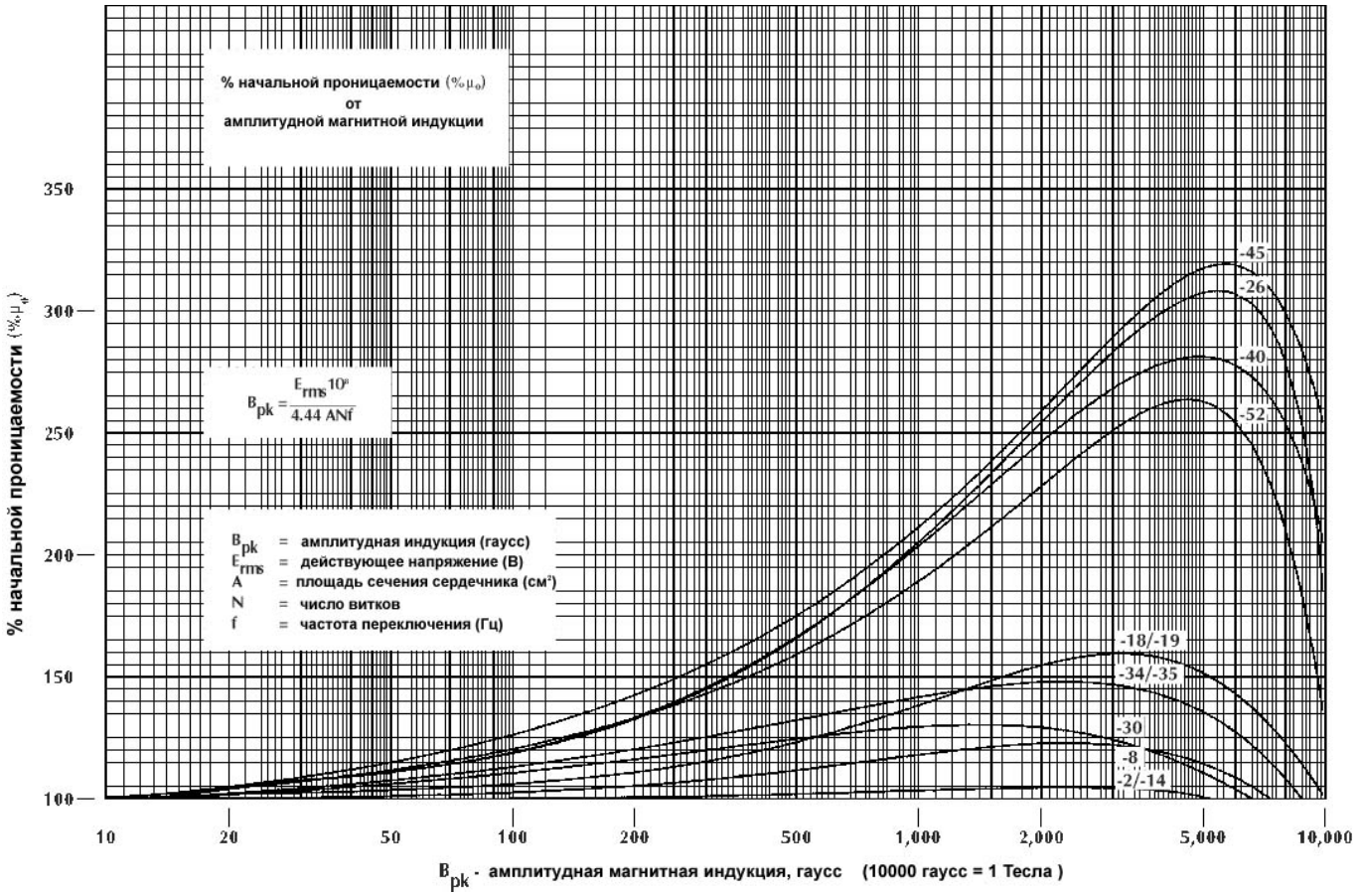


Рисунок 8. ***Зависимость изменения проницаемости материалов от амплитудной магнитной индукции***

При повышении уровня постоянной и переменной составляющей их влияние взаимно компенсируется. Этот эффект на примере материала –26 показан на **Рисунке 9**. В то время как возрастание постоянной составляющей магнитной индукции в сердечнике вызывает уменьшение проницаемости, увеличение переменной составляющей способствует её увеличению. 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 10А. На этот раз дроссель будет работать при напряжении 12,7 Вольт на частоте 100 кГц, скважность 50%. Определим характеристики дросселя при использовании кольца Т106 из разных смесей.

В каждом случае количество витков определяется из кривых зависимостей накапливаемой энергии. Поскольку эти зависимости определены при постоянном токе в обмотке, при наличии переменной составляющей результаты будут отличаться.

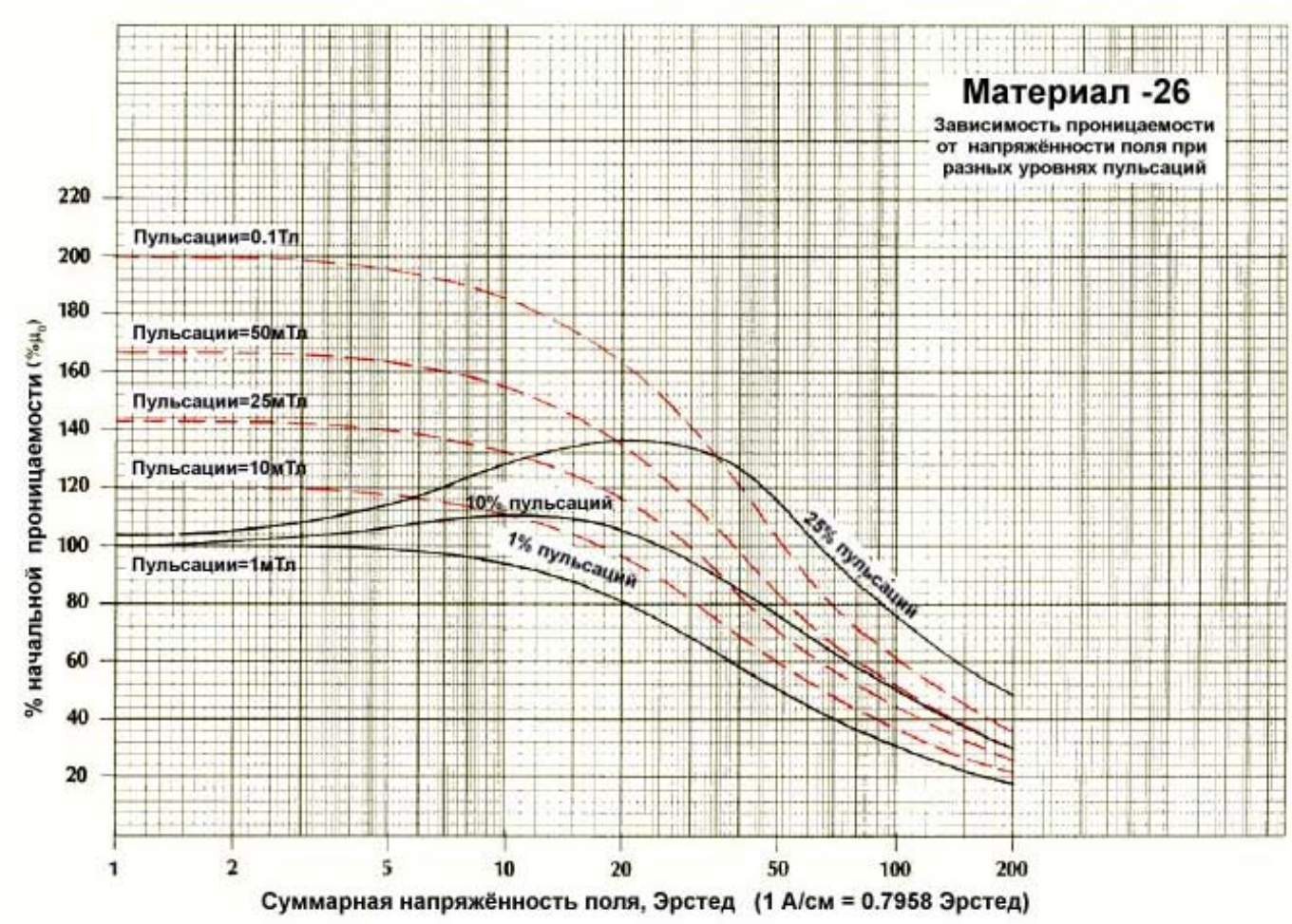


Рисунок 9. ***Изменение начальной проницаемости от суммарной напряжённости поля***

Индуктивность дросселя определена при напряжении 12,7 В на частоте 100 кГц и при постоянном токе 10А. 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}), также представлены:

№ смеси	Витки d=1.29 мм	L, мкГн @ 0 ADC	L, мкГн @ 10 ADC	B_{pk} мТл	Потери: в меди	в сердечнике	суммарные
-8	27	34.8	30.6	17.8	1.60	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	45.0	35.3	15.5	1.84	0.75	2.59
-40	24	63.0	39.7	20.1	1.42	1.01	2.43
-52	23	68.8	42.3	20.9	1.36	0.51	1.87

Во всех случаях индуктивность дросселя при 10А постоянного тока в обмотке превысила 30 мкГн. В большинстве случаев это положительный эффект. Материалы –18 и –8 обеспечивают минимальные совокупные потери, но являются наиболее дорогими (относительная стоимость 2.8 и 4.0). Смесь –52 по уровню потерь занимает следующее место, но имеет значительно меньшую относительную стоимость (1.4)

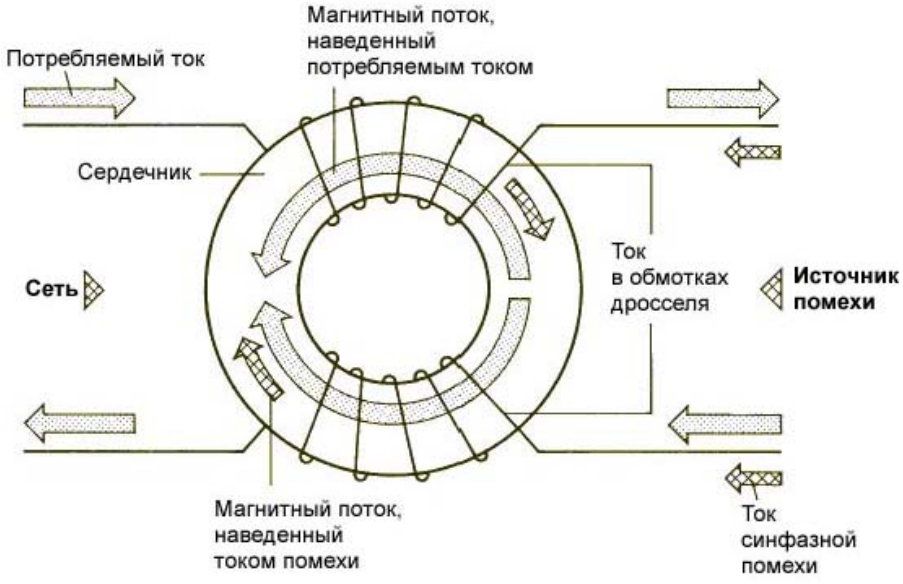
Материалы с более высокой начальной проницаемостью, такие, как –26 и –52, имеют наибольшую (около 2 раз) амплитудную нелинейность проницаемости при изменении рабочего тока от 0 до максимального значения. При таком «качании» дроссель обладает большей проводимостью при малых токах, чем в случае, если бы это «качание» отсутствовало. Для устройств, работающих в широком диапазоне токов нагрузок, может быть необходимо увеличение индуктивности при очень малых токах до 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 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 приведена на **Рисунке 10**:

Рисунок 10. ***Зависимость степени насыщения гибридного сердечника от постоянного тока***

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.

50/60 Гц сетевые фильтры: традиционные импульсные источники питания требуют установки на входе фильтров высокочастотных помех. Эти помехи делятся на две категории: синфазные и дифференциальные. 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 достаточно большую индуктивность, обычно не менее 1

мГн. Традиционно такие дроссели имеют две симметричных обмотки, намотанных на ферритовом кольце 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 материалы 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 током, потребляемым от сети 50/60 Гц, и эффективно подавлять высокочастотные помехи. Распылённое железо наилучшим образом отвечает этим требованиям.

Зависимость увеличения проницаемости от амплитудного значения магнитной индукции переменного тока показана выше на **Рисунке 8**. Из кривой следует, что индукция насыщения распылённого железа превышает 1Тл (10000 гаусс) и достигает максимального значения 1.4Тл (14000 гаусс). Очевидно, что материалы с высокой начальной проницаемостью, например, -26, имеют более значительную амплитудную нелинейность магнитной проницаемости.

Из показанной на **Рисунке 3** зависимости потерь для смеси –52 очевидно, 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. Эти потери снижают добротность дросселя на высоких частотах. 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, показанного на **Рисунке 8**. При этом неясно, как изменяется проницаемость материала вследствие слабой высокочастотной помехи. Консервативная методика расчёта предлагает считать ток основной частоты 50 Гц постоянным током.

Индуктивности для 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.

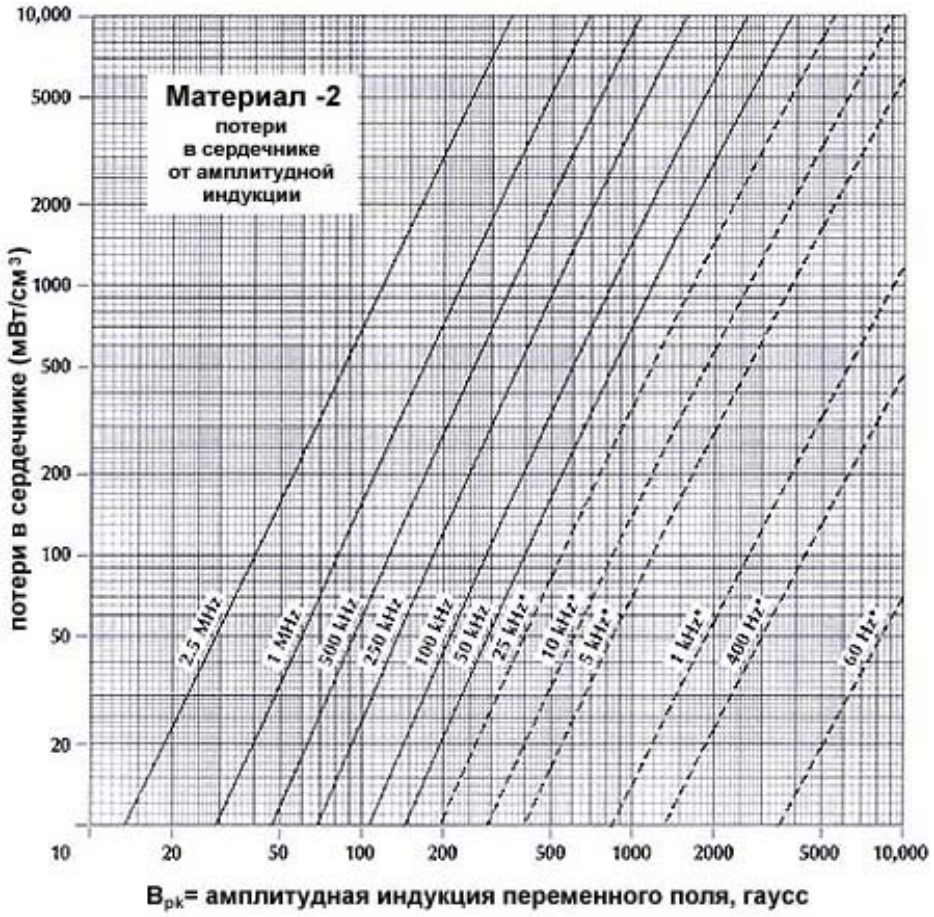


Рисунок 11. ***Зависимость потерь в сердечнике от амплитудной индукции для материала –2***

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 источниках питания с высокой удельной мощностью, работающих на частотах от 500 кГц до нескольких мегагерц. Одним из материалов, всё чаще используемых в преобразователях резонансного типа, является смесь –2. Этот материал имеет проницаемость около 10, что позволяет работать с низкой индукцией в сердечнике без возникновения зон локального перегрева. При таких высоких рабочих частотах для минимизации потерь в меди весьма существенным является использование лицендрата. На **Рисунке 11** показана зависимость потерь смеси –2 на частотах до 2.5 МГц (зависимости потерь на низких частотах экстраполированы из значений, получены на высоких частотах). На основе этой информации получены зависимости, приведенные ниже на **Рисунке 12**.

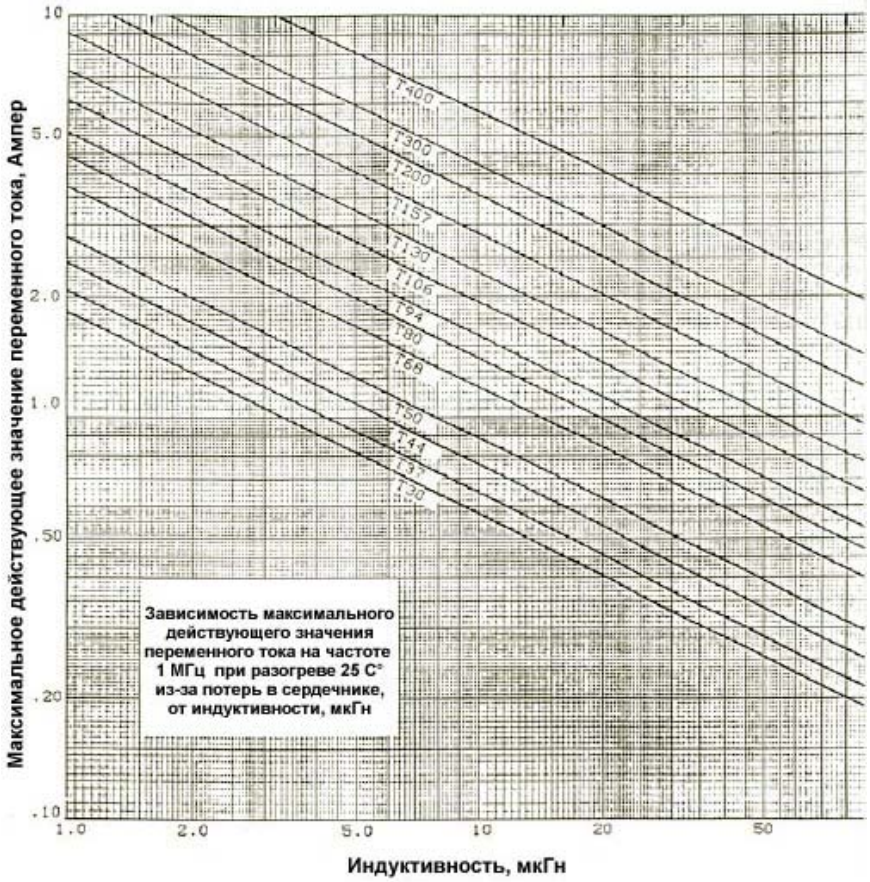


Рисунок 12. ***Зависимость действующего значения тока в обмотке от индуктивности при частоте 1 МГц и нагреве 25 С°***

Этот график показывает максимальное действующее значение переменного тока в обмотке как функцию индуктивности на частоте 1 МГц при допустимом повышении температуры вследствие потерь в сердечнике на 25 С°.

Если смесь –2 предназначена для резонансных цепей на частотах свыше 20 кГц, смесь –30 используется для низкочастотных дросселей переменного тока в мощных источниках бесперебойного питания большой мощности, работающих на частотах от 1 до 5 кГц. Этот материал обеспечивает хороший компромисс между начальной проницаемостью, уровнем потерь, характеристиками насыщения и ценой сердечника.

Резюме: магнитные характеристики распылённого железа подходят для различных применений в импульсных источниках питания. Распылённое железо является наименее дорогим из материалов с высокой индукцией насыщения, благодаря чему широко используется в импульсных схемах в современной промышленной и бытовой электронике.