

# Современные магнитомягкие материалы для силовой электроники

Алексей Куневич, Алексей Максимов (Санкт-Петербург)

В статье анализируется состояние рынка силовых ферритовых и порошковых материалов и приводятся электромагнитные параметры наиболее известных в России зарубежных марок. Приведённые в статье таблицы соответствия импортных материалов их отечественным аналогам облегчают разработку новых изделий. Рассматриваются преимущества использования порошковых материалов на основе сплава железа и алюминия.

Сейчас рынок силовой электроники России характеризуется устойчивым ростом. Развитие полупроводниковой базы предъявляет новые, всё более жёсткие требования к качеству магнитомягких мате-

риалов, используемых в силовых модулях.

Длительное время отсутствие промышленного выпуска современных отечественных силовых материалов вынуждало разработчиков исполь-

зовать для преобразователей энергии, выпускаемых в России, устаревшие материалы M2500HMC1 и M2500HMC2, а также материалы широкого назначения M1500HM3, M2000HM, M1000HN, что отрицательно сказывалось на эффективности работы силовых устройств.

В настоящее время на небольшом по размеру, но постоянно растущем рынке силовых ферритов представлен широкий ассортимент изделий как всемирно известных брендов, так и малоизвестных даже у себя на родине китайских фирм.

К современным магнитным материалам можно отнести силовые ферриты с высоким значением индукции насыщения (до 0,5 Тл), предназначенные для работы в преобразователях с частотой до 1 МГц, а также магнитные материалы с экстремально высокой индукцией насыщения из порошковых материалов.

## ФЕРРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Эти материалы представлены большим числом конфигураций и выпускаются для мощностей от десятых долей ватта до нескольких киловатт.

Электромагнитные параметры наиболее часто используемых марок силовых ферритов приведены в таблице 1. Материалы, предлагаемые зарубежными изготовителями, отличаются высоким потребительским качеством и значительно превосходят морально устаревшие отечественные марки M2500HMC1 и M2500HMC2 по электромагнитным параметрам (так, в контрольной точке на 100 кГц при 100°C и  $B = 0,2$  Тл потери в марке N87 (Epcos) и 3C90 (Ferroxcube) составляют примерно 385 мВт/см<sup>3</sup>, что ориентировочно в 3,5 раза меньше, чем у M2500HMC1).

Характерной особенностью рынка отечественных силовых ферритовых материалов является отсутствие долгосрочного планирования у изготовителей силовой электроники, вынужденных, как правило, выполнять разовые заказы. Не многие изготовители силовой аппаратуры располагают перспективными производствен-

Таблица 1. Параметры популярных марок силовых ферритов

Фирма	Россия	Epcos	Ferroxcube	ACME	Cosmo
Марка	M2500HMC1	N87	3C90	P4	CF138
Начальная магнитная проницаемость		2200 ± 25%	2300 ± 25%	2500 ± 25%	2100 ± 25%
Индукция насыщения, мТл ( $H = 1200$ А/м, $f = 10$ кГц)	450	490/390*	430/340*	480/380*	480/380*
Коэрцитивная сила, А/м ( $f = 100$ кГц)	16	21/13*		10/6*	15
Потери, кВт/м <sup>3</sup> , при:					
25 кГц, 200 мТл, 100°C	–	57	80	55	60
100 кГц, 200 мТл, 100°C	1600	385	450	450	450
300 кГц, 100 мТл, 100°C	–	390	–	430	390
Постоянная гистерезиса, ×10 <sup>-6</sup> мТл	–	<1,0	–	<1,2	–
Температура Кюри, °C	–	>210	>220	>220	>220
Удельное сопротивление, Ом м	–	10	–	5,5	4
Плотность, г/см <sup>3</sup>	4,8	4,85	4,8	4,8	4,8

\* При температуре: 25°C/100°C

Таблица 2. Сравнительные характеристики современных материалов Epcos

Параметры	N87	N97	N92
Магнитная индукция, мТл (1200 А/м, 10 кГц)	490	510	500
Коэрцитивная сила, А/м (100 кГц)	21/13*	21/12*	24/13*
Рабочий диапазон, кГц	25...500	25...500	25...500
Температура Кюри, °C	>210	>230	>280
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4850	4920	4850
Относительные потери в сердечнике кВт/м <sup>3</sup> (100 кГц, 200 мТл, 100°C)	385	300	410

\* При температуре: 25°C/100°C

Таблица 3. Аналоги ферритовых материалов

Epcos	Россия	Ferroxcube	Samwha	Cosmo
–	M2500HMC1*	–	–	–
N27	M2500HMC2	3C80	–	CF196
N87	–	3C90	PL9	CF139
N97	–	3C94	PL11	–
N92	–	3C92	–	CF122
N49	–	3F3	–	–

\* Марка M2500HMC1 обладает ориентировочно на 25% большими потерями, чем M2500HMC2

ными планами и, вследствие этого, готовы ожидать поставки требуемых сердечников более 2 месяцев, не говоря уже о проблемах, возникающих на стадии опытно-конструкторских работ при получении опытных образцов и мелких серий. Достаточно жёсткая конкуренция на рынке не всегда позволяет изготовителям РЭА использовать лучшие по параметрам, но более дорогие сердечники.

В связи с этим наибольшую популярность у изготовителей РЭА и наибольший сегмент рынка в настоящее время смогла завоевать только фирма Ercos, предложившая не только оптимальное соотношение цена/качество, но и создавшая развитые дистрибуторские сети, позволяющие приобретать значительную часть требуемой продукции со складов в России.

Активную политику по продвижению своих материалов в России проводят также Acme (Тайвань), Cosmo (Индия), Yeng-Tat (Тайвань), Samwha (Корея), Ferroxcube, однако их продвижение сдерживается небольшим объёмом и насыщенностью российского рынка.

Значительный сегмент рынка остаётся и у изготовителей отечественных материалов: ОАО «Ферроприбор» (Санкт-Петербург) и ЗАО НПФ «Феррокерам» (Украина) занимают нишу недорогих силовых типоразмеров, не имеющих точных зарубежных аналогов (например, Ш6 × 6, Ш4 × 8, ПК40 × 18).

В последнее время на российском рынке усиливается интерес и к новейшим маркам силовых материалов, аналогичным:

- N97 (Ercos), с уровнем потерь на 20% ниже, чем у базового материала N87;
- N92 (Ercos), который насыщается при токе, на 20% большем, чем N87;
- N49 (Ercos), позволяющий создавать преобразователи на частотах до 1 МГц.

Сравнительные характеристики этих марок и заменяющие их аналоги других изготовителей перечислены в таблицах 2 и 3.

## ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Традиционно российские разработчики могли использовать только сердечники на основе Мо-пермаллоя с проницаемостью от 14 до 250 и типоразмерным рядом от K7 × 4 × 3 до K52 × 36 × 14. Материалы, аналогичные High Flux и Kool Mμ (см. табл. 4), отсутствовали, т.к. отечественная

Таблица 4. Материалы фирм High Flux и Kool Mμ

Характеристики	Мо-пермаллой	High Flux	Kool Mμ
Начальная магнитная проницаемость	14...550	14...160	26...125
Потери	Самые низкие	Умеренные	Низкие
Зависимость проницаемости от намагничивания постоянного тока	Хорошая	Наилучшая	Средняя
Индукция насыщения, Тл	0,75	1,5	1,05
Содержание никеля	80%	50%	0%
Удельная стоимость	Высокая	Средняя	Низкая

Таблица 5. Материалы фирм Magnetics и Arnold

Magnetics	Arnold	Отечественный аналог	Ближайший зарубежный аналог
77280-A7	MS-038125-8	МП140 K10 × 6 × 3	HS125 R9,65 × 4,78 × 3,18
77290-A7	-	МП140 R10 × 6 × 4,5	HS125 R9,65 × 4,78 × 3,96
77050-A7	MS-050-125-2	МП140 K13 × 7 × 5	HS125 R12,7 × 7,62 × 4,75
77120-A2	MS-065125-2	МП140 K15 × 7 × 6,7	HS125 R16,5 × 10,2 × 6,35
77380-A7	MS-068125-2	МП140 K17 × 10 × 6,5	HS125 R17,3 × 9,65 × 6,35
77206-A7	MS-080125-2	МП140 K20 × 12 × 6,35	HS125 R20,3 × 12,7 × 6,35
77350-A7	MS-092125-2	МП140 K24 × 13 × 7	HS125 R23,6 × 14,4 × 8,89
77324-A7	MS-141125-2	МП140 K36 × 25 × 9	HS125 R35,8 × 22,4 × 10,5
77254-A7	MS-157125-2	МП140 K44 × 28 × 10,3	HS125 R39,9 × 24,1 × 14,5
77715-A7	MS-200125-2	МП140 K52 × 36 × 14	HS125 R50,8 × 31,8 × 13,5

промышленность их не выпускала. В настоящее время на рынке России представлена также продукция фирм Magnetics и Arnold (см. табл. 5).

Возможность использования сердечников из данных материалов с диаметром до 78 мм открывает новые возможности для создания мощных преобразователей. Наличие диэлектрического покрытия облегчает намотку и увеличивает долговечность изделий при эксплуатации в условиях неблагоприятной климатологии.

Сердечники на основе Мо-пермаллоя характеризуются наименьшими потерями, идеальной временной и температурной стабильностью магнитной проницаемости, что делает их незаменимыми для создания высокостабильных прецизионных катушек индуктивности. Однако достаточно высокая стоимость, вызванная высоким содержанием никеля, не всегда позволяет использовать их в массовых изделиях.

С этой точки зрения особый интерес для использования в изделиях силовой электроники представляют недорогие материалы типа Kool Mμ (Sendust), представляющие собой сплав железа с алюминием.

По экономическим показателям средняя цена 1 кг ферритовых изделий в мощных преобразователях составляет около 10 долл., сердечников на основе Мо-пермаллоя – 80 долл., а сендастовых сердечников Kool Mμ – 30 долл.

Наличие типоразмеров большого диаметра, относительно низкие поте-

ри в сочетании с большой величиной индукцией насыщения и, что немало важно, доступные цены делают магнитопроводы из материала Kool Mμ перспективными для применений в моточных изделиях для силовых преобразователей энергии.



**Северо-Западная лаборатория**  
 Генеральный представитель Ercos по ферритам в России и СНГ

ЗАО "Лэпкос" СЗЛ предлагает со склада:

- Ферритовые сердечники Ercos и ЗАО НПФ Феррокерам
- Недорогие материалы с высокой индукцией насыщения (MPP, Kool M, High Flux, Iron Powder, Magnetics и Micrometals)
- Наноматитные материалы для мощной силовой электроники
- Намоточные каркасы, скелеты, материалы для намотки
- Пассивные компоненты фирмы Ercos

ЗАО "СЗЛ" является крупнейшим в СНГ изготовителем трансформаторов и дросселей мощностью от 1 Вт до 150 кВт, работающих в диапазоне от 10 Гц до 150 МГц для силовой электроники, слототехники, телекоммуникаций. Осуществляется разработка и изготовление трансформаторов по доверенности или ТЗ Потребителя.

телефон: (812) 300-11-04, 300-00-11-04  
 e-mail: lapkos@lapkos.ru, lapkos@soel.ru