

# Ферриты для кабелей и радиочастотных устройств

## Методы обеспечения электромагнитной совместимости радиочастотных устройств

При конструировании или модернизации аппаратуры неизбежно встает вопрос об электромагнитной совместимости различных устройств между собой. Еще более остро встает вопрос об ЭМС, если аппаратура должна отвечать российским или международным стандартам, например, стандарту МЭК 61000. Современная техника, работающая на частотах сотни и тысячи МГц, неизбежно излучает в окружающее пространство радиочастотные сигналы различной мощности на разнообразных частотах, как правило, отличных от несущих. Особенно свойствами побочного излучения страдают цифровые устройства, в которых производится многократное переключение уровней сигналов, при которых возникают все нечетные гармоники. Особенно мощными гармониками считаются, согласно разложению в ряд Фурье, третья, пятая, седьмая и девятая, мощность излучения на которых вполне соизмерима с мощностью сигнала на основной несущей частоте переключения. Естественно, информация излучение на нечетных гармониках нести не может, но очень сильно расширяет полосу исходного сигнала. Как известно, напряженность поля, создаваемая проводником с радиочастотным сигналом, пропорциональна четвертой степени частоты. Иными словами, электрическое поле от третьей гармоники существенно сильнее (в реальных значениях В/м), чем поле от основной несущей частоты. Для уменьшения паразитного излучения применяется много конструкторских и технологических решений. Одному из них посвящена эта статья.

Игорь Евсюков

eiv@techno.ru

Самыми активными излучателями на сегодняшний день являются кабели и кабельные соединения. Любой человек дома, на работе или на отдыхе неизбежно находится в окружении проводов и кабелей. Стоит заглянуть под крышку компьютера, телевизора, кухонного комбайна (кстати, в 80 процентах случаев — с микропроцессорным управлением), даже в электрический чайник — везде провода. Разница состоит только в том, какой ток там протекает и насколько он может оказать вредное воздействие на человека. Мы привыкли полагать, что сетевой кабель, включенный в розетку, несет только ток с частотой 50 Гц и напряжением 220 В. Это глубокое заблуждение, так как рядом с этим кабелем могут находиться другие потребители электроэнергии, которые излучают обратно в сеть достаточно большую мощность на самых разнообразных частотах. Например, компьютер с импульсным блоком питания, включенный в сеть в соседней комнате или в квартире у соседа, может загрязнять питающую сеть настолько, что электронные часы с синхронизацией от сети могут серьезно отставать или уходить вперед без всяких видимых причин. Мы включаем кабель в розетку — и у нас получается прекрасная передающая антенна для высокочастотного сигнала из сети, если случайно длина кабеля оказывается

кратной длине полуволны паразитного сигнала. В результате — помехи на экране телевизора, радиоприемники начинают «тарыхтеть» и т. д. Еще более вредное воздействие оказывается на самого человека, которое мы не замечаем глазом, однако чувствуем головную боль, функциональные расстройства различных органов и отправляемся к врачам за лечением. Врач лечит болезнь, но не может убрать вредное воздействие, незримо присутствующее вокруг каждого из нас. Для того чтобы оценить степень воздействия того или иного устройства, существует отдельный класс радиоэлектронных приборов — спектроанализаторы. Эти приборы позволяют оценить степень излучения от каждого из приборов в пределах спектра своей работы. Как правило, спектроанализаторы рассчитаны на работу в полосе частот от 150 кГц до 1–5 ГГц, перекрывая основные на сегодняшний день частоты передаваемых по кабелям сигналов. Они являются наиболее дешевыми средствами для оценки излучения при создании разнообразных устройств, работающих на частотах, превышающих частоту питающей сети, а значит, неизбежно излучающих радиочастотный сигнал в окружающее пространство.

Что же делать, если разрабатываемая техника не в состоянии обеспечить требуемый уровень излучения? Конечно, все начинается с разработчи-

ка — человека, непосредственно ответственного за применение в устройстве того или иного компонента, выбравшего ту или иную частоту несущего сигнала, расположившего компоненты на плате именно в таком порядке, выбравшего такой метод подключения аппаратуры к внешним соединениям. Как правило, 90% ошибок разработчика приводит не только к излучению от готового изделия, но и к преждевременному выходу техники из строя. Конструкторы и разработчики, согласные потратить средства для уточнения деталей разработки, создают гораздо более конкурентоспособную продукцию, чем люди, привыкшие надеяться на то, что их прибор «и так будет работать, никуда не денется».

Настоящий разработчик перед запуском изделия в серийное производство много раз поменяет конструктив своего устройства, доводя его до возможного совершенства. К сожалению, идеал недостижим. Даже международная Директива ЭМС признает, что аппаратура должна быть прежде всего надежной и удобной в применении, а потом уже обеспечивать требуемый уровень паразитного излучения, не более указанного для каждого конкретного класса приборов по функциональному назначению.

Для возможного приближения к идеалу в процессе создания аппаратуры могут применяться различные материалы и компоненты. Наиболее широкое применение нашли ферритовые изделия. Свойства феррита поглощать электромагнитную энергию за счет преобразования ее в тепловую известны достаточно давно. Сегодня любая вычислительная сеть снабжается ферритовыми трансформаторами для фильтрации информационных цепей (так называемые Common Mode Choke, или ферритовые бусинки). Они есть на каждом выходном разъеме сетевой карты и на каждом гнезде маршрутизатора или серверной станции. Сглаживая фронт нарастания импульса, феррит обеспечивает совместимость длинных кабелей с различными информационными сигналами, расположенных в одном коробе. Как правило, если длина кабелей не превышает 500 метров, дальнейших усилий на совместимость не требуется. Если длина кабеля существенно больше, то приходится ставить дополнительные фильтры и буферные магистральные усилители. Для фильтрации такого сигнала применимы ферриты на круглый кабель. Их реактивное сопротивление существенно увеличивается с ростом частоты. Для фильтра CF-65S на кабель диаметром до 6,5 мм реактивное сопротивление изменяется от 10 Ом на частоте 1 МГц до 325 Ом на частоте 100 МГц. Если кабель пропустить через феррит дважды, организовав петлю (так называемое расположение 1,5 витка), то сопротивление меняется от 70 Ом на частоте 1 МГц до 786 Ом на 25 МГц и 1070 Ом на 50 МГц. Таким образом, на имеющемся кабеле создается локальное сопротивление, препятствующее излучению гармонических составляющих сигнала на высоких частотах и не препятствующее прохождению полезной составляющей сигнала на несущей час-

Таблица 1

Тип феррита	A	B	C	D (L)	Типовой импеданс, Ом				Графическое изображение ферритов
					0,5 витка		1,5 витка		
					25 МГц	100 МГц	25 МГц	100 МГц	
CF-65S	17,8	19,5	6,5	32,5	171	325	786	761	
CF-100S	22,3	23,3	10,0	32,6	136	250	643	696	
CF-130S	29,6	30,5	13,0	33,0	155	257	734	734	
CF-35R	12,8	14,7	4,0	25,0	82	146	343	536	
CF-50R	14,5	15,7	5,6	29,0	85	157	364	579	
CF-80U1	21,5	8,15	16,8	23,0	42	93	166	392	
CF-80U2	21,5	8,15	19,7	25,8	50	107	199	472	
CF-115U	30,3	11,4	17,7	23,9	51	101	202	441	
CF-70A	14,2	7,0	17,6	22,0	51	107	210	440	
CF-90A	18,6	9,0	31,0	35,2	126	174	530	575	
CF-35M	11,7	13,0	3,5	25,0	139	191	594	566	
CF-50M	11,7	13,0	5,0	25,0	96	154	397	529	
CF-90M	18,0	19,7	9,0	35,0	112	172	484	576	
CF-35B	12,0	15,0	3,5	25,5	139	191	594	566	
CF-50B	12,0	15,0	5,0	25,5	96	154	397	529	

тоте. Подбор типа ферритового поглотителя осуществляется исходя из номинального диаметра кабеля, способа его размещения (на проход или с петлей) и необходимого реактивного сопротивления на высокой частоте. Диаметр может быть от 3,5 до 19,7 мм, сопротивление от 42 Ом на частоте 25 МГц до 734 Ом на 100 МГц. Для ферритов на круглый кабель нормируется реактивное сопротивление на двух частотах 25 и 100 МГц, хотя реактивное сопротивление может иметь максимальное сопротивление и ниже, и выше этих частот. Основные характеристики ферритов на круглый кабель и их внешний вид представлены в таблице 1.

Большинство межблочных соединений внутри аппаратуры выполнено с помощью гибких ленточных кабелей. Они существенно повышают плотность монтажа, более просты в установке. Например, существуют разъемные и неразъемные соединители, обеспечивающие шаг в кабеле 0,4 мм. Стандартным плоским ленточным кабелем до сих пор считается кабель с шагом между проводниками 1,27 мм. Таким кабелем соединяются жесткий диск (IDE) или дисковод гибкого

диска. Так как в одной системе может быть несколько жестких дисков, как на серверных машинах, появляется возможность паразитного переизлучения высокочастотных составляющих с одного кабеля на другой. Для снижения гармонических составляющих сигнала на высоких частотах применяются ферриты на плоский кабель. Они рассчитаны таким образом, чтобы вносить минимальные искажения на рабочих частотах и осуществлять максимальное подавление на высоких частотах. Например, неразъемный феррит для установки на 40-жильный кабель RP 57,6×6,5×12 с отверстием 52×1,4 мм имеет реактивное сопротивление 3 Ом на частоте 1 МГц, 43 Ом на частоте 25 МГц и 129 Ом на частоте 100 МГц. Максимальное реактивное сопротивление 630 Ом этот феррит имеет на частоте 340 МГц. Основные характеристики неразъемных ферритов на плоский кабель и их внешний вид представлены в таблице 2.

Исследования излучений от жидкокристаллических (TFT) мониторов убедительно доказывают, что основным источником электромагнитных помех являются толстопленочные кабели развертки. Для существенно-

Таблица 2

Тип неразъемного феррита	Материал	RP A×B×D (мм)	Прочие размеры		Типовой импеданс, Ом		Графическое изображение ферритов
			C	F	25 МГц	100 МГц	
M1	RP 15,5×4,8×11,4		12,7	0,6	39	142	
L92	RP 23,3×3×7		20	0,9	25	86	
L92	RP 23,3×3×12		20	0,9	37	113	
L92	RP 24,5×4,7×12		20	0,8	45	130	
L92	RP 28×7,8×14,6		23	1,5	52	126	
L92	RP 28,5×6,5×8		23,5	0,9	38	115	
L92	RP 28,5×6,5×18		23,5	0,9	67	180	
L92	RP 29,2×7,8×25		25,4	1,3	83	184	
L92	RP 31×5×12		27	1,0	40	120	
L92	RP 33,5×6,5×12		27	1,4	38	112	
L92	RP 33,5×6,5×20		27	1,4	55	150	
L92	RP 38,5×4×12		35	0,8	41	122	
L92	RP 40×6,5×12		35	1,4	39	114	
L92	RP 40×10×12,5		32	2,0	49	129	
L92	RP 45,2×6,5×12		40	1,4	38	114	
L92	RP 49,6×6,5×12		44	1,4	38	113	
L92	RP 57,6×6,5×12		52	1,4	43	129	
L92	RP 60×12×12,7		48	2,2	48	140	

Таблица 3

Тип разъемного феррита	Размеры, мм					Типовой импеданс, Ом		Графическое изображение ферритов
	A	C	D	E	G	25 МГц	100 МГц	
RPV 460324-4	46	42	24	3	0,4	83	210	
RPC 460324-8						61	153	
RPV 460524-4	46	42	24	5	0,4	108	275	
RPC 460524-8						80	210	
RPV 560324-4	56	52	24	3	0,4	83	210	
RPC 560324-8						61	153	
RPV 560524-4	56	52	24	5	0,4	108	275	
RPC 560524-8						80	210	

го снижения уровня излучаемых помех можно применить разъемные ферриты на плоский кабель. Конструкция самого феррита позволяет установить его в любое доступное место, не демонтируя разъемы кабеля. Реактивное сопротивление такого феррита больше, чем неразъемного, за счет чего осуществляется большее подавление высших гармоник сигнала. Например, разъемный феррит RPC 460524-8 имеет сопротивление на частоте 1 МГц не более 6 Ом, на частоте 25 МГц —

80 Ом, на частоте 100 МГц — 210 Ом и максимум на частоте 300 МГц — 420 Ом. Основные характеристики разъемных ферритов на сверхплоский кабель и их внешний вид представлены в таблице 3.

Все тесты любого феррита на кабель проводятся проводником диаметром 0,2 или 0,4 мм и длиной 10 см, подключенного к ВЧ-генератору и милливольтметру переменного тока.

Иногда возникает проблема: что делать, если одиночного феррита на кабеле не хвата-

ет? Это происходит в тех случаях, когда компоновка аппаратуры очень плотная и в непосредственной близости находятся передающая и приемная части антенн, например на самолете. В этом случае может помочь гибкая ферритовая лента. Она обладает хорошими экранирующими свойствами за счет включения в состав медно-никелевой сетки, на которую нанесен слой полимера с ферритовым наполнителем. Обеспечение экранирования в диапазоне частот от 30 МГц до 60 ГГц не хуже 50 дБ и поглощение исходящего излучения в этом же диапазоне частот от 64 до 73% при намотке вокруг кабеля подчас является единственным выходом. Как правило, в тяжелых условиях эксплуатации учитываются не только электрические, но и механические свойства материала. Объемная плотность ферритовых лент не более 3,5 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, лента, намотанная вокруг кабеля по всей его длине, обладает экранирующими и поглощающими свойствами одновременно.

Внешний вид, примеры установки и основные параметры приведены на рис. 1 и в таблице 4.

Следующим этапом после применения всех возможных приемов по снижению радиочастотного излучения от аппаратуры вместе с подключаемыми кабелями является проверка полученных результатов и определение их достоверности. Наиболее часто при сертификации норм излучения применяются безэховые камеры. Несмотря на сложное название, эти помещения обладают всего несколькими достоинствами:

1. Камера имеет металлический сварной или сборный замкнутый каркас, заземленный отдельно от питающей сети и конструкции

Таблица 4

Материал	Диапазон рабочих температур, °C	Диапазон рабочих частот	Объемное сопротивление, мин., Ом·см
FAM1	-20...+80	30 МГц - 8 ГГц	10°
FAM21	-20...+150	1 ГГц - 60 ГГц	10°
FAM3	-20...+80	80 МГц - 25 ГГц	10°
FAM4	-20...+80	500 МГц - 12 ГГц	10°

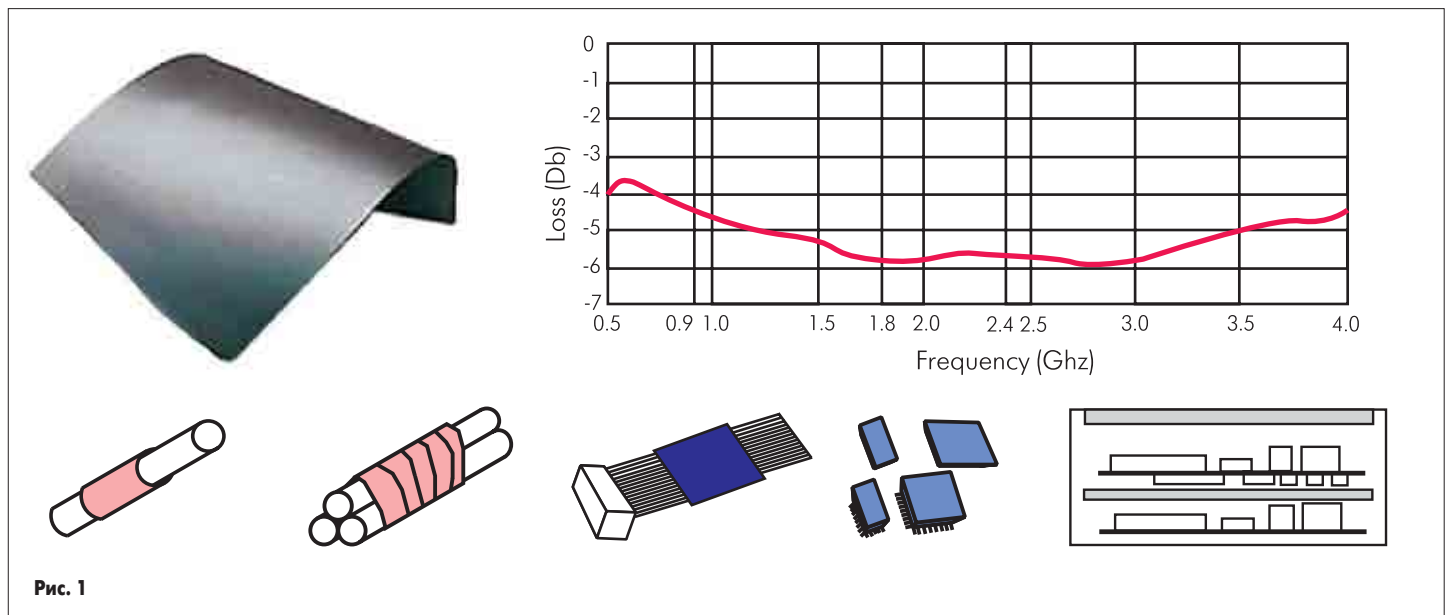


Рис. 1

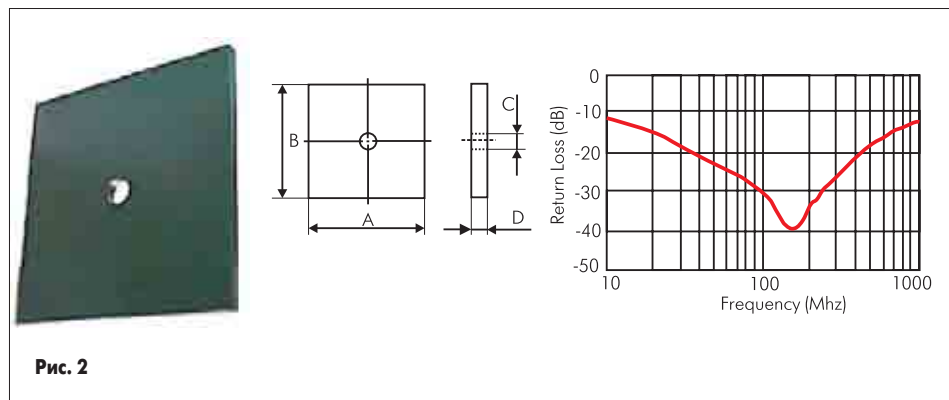


Рис. 2

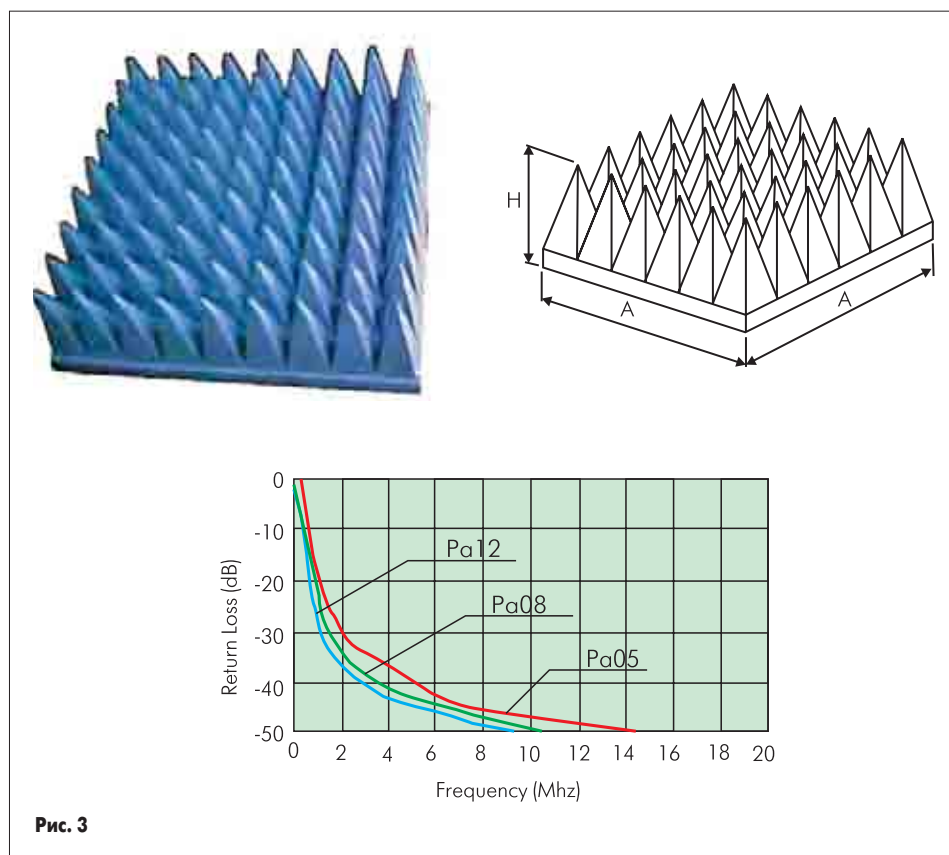


Рис. 3

Таблица 5

Наименование	Размеры		Диапазон частот, ГГц				
			1,12–1,76	2,6–3,95	3,95–5,89	8,2–12,9	12,9–18
	A	H	L-Band	S-Band	C BAND	X-Band	Ku-Band
PA05	60 см	5"	–	30 дБ	40 дБ	45 дБ	50 дБ
PA08	60 см	8"	30 дБ	40 дБ	45 дБ	50 дБ	50 дБ
PA12	60 см	12"	35 дБ	40 дБ	45 дБ	50 дБ	50 дБ
PA-3.0mm	60 см	3,0 мм	>8 дБ @ 13 ГГц				

здания. Экранирование такого помещения для проведения испытательных работ должно составлять не менее 80, а чаще 120 дБ. В этом случае считается, что внешние помехи оказывают минимально возможное влияние на результаты опытов по оценке помехоэмиссии. Экранирование производится с помощью листов стали или латуни толщиной, необходимой для обеспечения экранирования. Как правило, выбирается сталь толщиной 1–4 мм. Надежно заделываются швы и стыки между полом, стенами и потолком для получения экранированного помещения.

2. Внутри экранированного помещения на стены размещаются ферритовые погло-

тители — пластины феррита размером 10×10×6,3 мм. Они собираются в блоки по 36 пластин (6×6 штук) и наклеиваются на дерево. Как правило, основанием таких блоков является фанера. Затем эти блоки крепят встык к потолку, стенам, двери и полу экранированного помещения. Феррит, обладая хорошими поглощающими свойствами, обеспечивает отсутствие отражения от стен, пола и потолка. Это отражение принято считать эхом, откуда и название — безэховое помещение.

3. Производится оценка эффективности поглощения помещения, и при необходимости в помещении монтируются «пирамидки» — радиочастотные поглотители, рас-

считанные на подавление радиочастотного сигнала в достаточно узком диапазоне.

Россия — страна, богатая сталью. Поэтому строить экранированное помещение за счет третьих стран было бы странно. Другая проблема состоит в том, что феррит, добываемый на российских месторождениях, наша промышленность спечет в требуемую форму с требуемыми частотными параметрами не может. На это есть и объективные, и субъективные причины. На сегодняшний день лучшие производители ферритовых изделий находятся в Юго-Восточной Азии, что признается даже американцами — идеологами и первопроходцами в области электромагнитной совместимости.

При низкой цене и предельно высоком качестве ферритовые пластины обеспечивают следующие параметры: максимальный уровень поглощения — 42 дБ на частоте 170 МГц с равномерным спадом до частот 30 МГц и 350 МГц (–22 дБ). Внешний вид и частотные свойства ферритовых пластин приведены на рис. 2.

Полимерные поглощающие пирамидки работают на частотах от 1 до 18 ГГц, обеспечивая поглощение не хуже 35 дБ (стандартное значение — 50 дБ). Их расположение определяется экспериментальным путем методом наклейки пирамидок на стены, потолок и пол. При правильном расположении пирамидок они обеспечивают поглощение радиочастотного сигнала на уровне, заявленном в типовой спецификации. Как правило, эти уровни соответствуют открытой площадке, определение которой присутствует в Директиве ЭМС. Внешний вид и частотные характеристики пирамидок представлены на рис. 3, типовая спецификация — в таблице 5.

В безэховой камере удобно настраивать передающие части антенных аттенуаторов, усилители мощности ВЧ и прочие устройства, которые особо чувствительны к внешним помехам или в которых возможен антенный эффект между передающей и приемными частями.

В заключение представим еще один материал — ферритовый поглотитель серии EXSOB. Полимерный наполнитель в составе материала содержит ферритовый порошок. С одной или двух сторон нанесен термопроводящий токоизолирующий или токопроводный липкий слой, обеспечивающий крепление материала к несущей поверхности. Равномерное наполнение ферритом по объему материала обеспечивает поглощение электромагнитной энергии до –9 дБ (материал EXSOB-V2-150 толщиной 1,5 мм).

Стандартно такой материал поставляется в листах 210×300 мм, который разрезается под требуемые внутренние размеры корпуса передающей части антенного блока. Пример применения листового поглотителя представлен на рис. 4, частотные характеристики материала EXSOB-V2 представлены на рис. 5, исполнение материала — на рис. 6.

Феррит и изделия из него не в состоянии решить абсолютно всех проблем аппаратуры, но всегда могут улучшить ее характеристики при грамотном техническом применении. ■

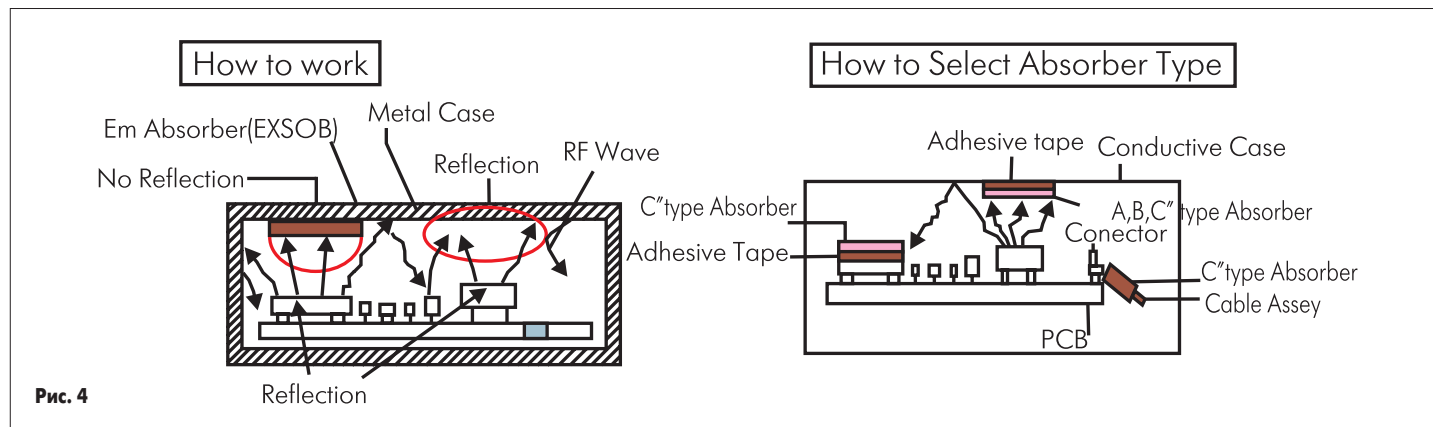


Рис. 4

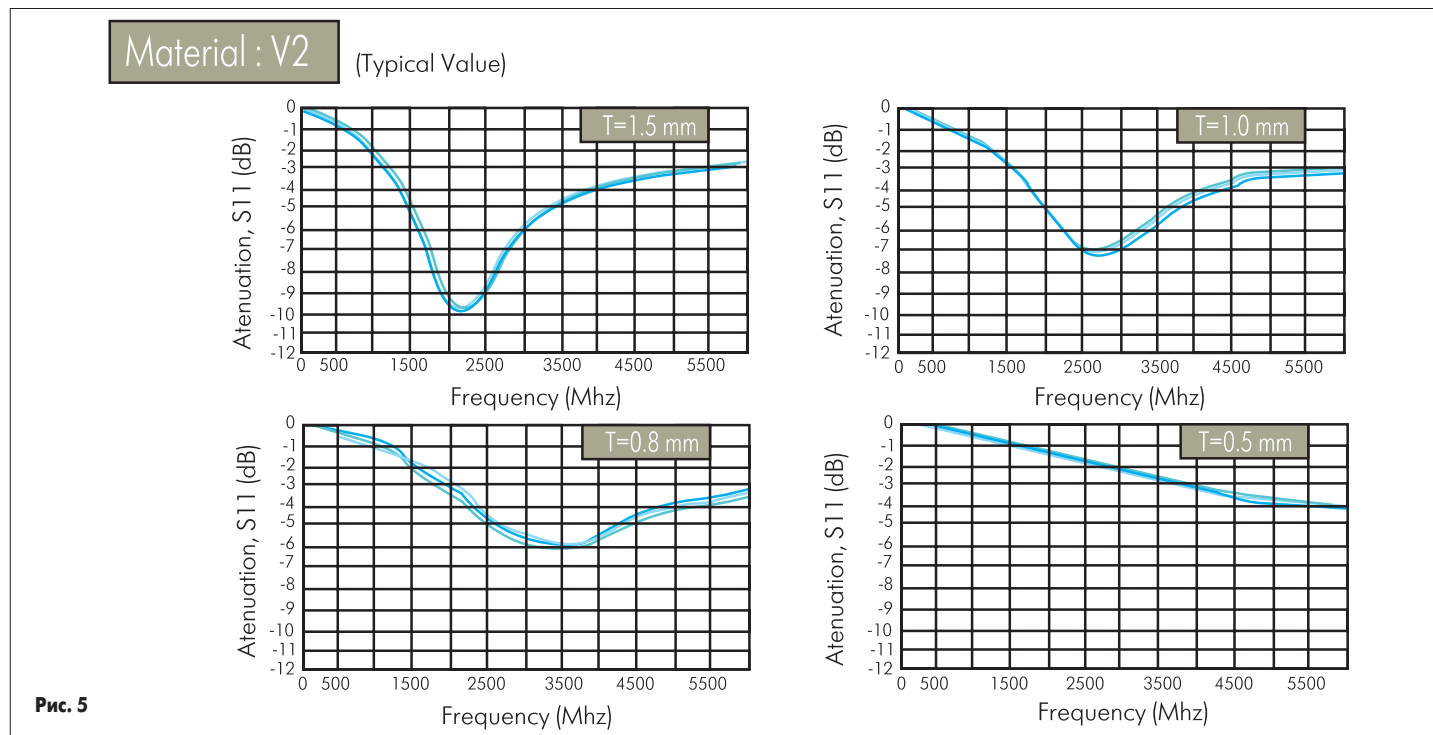


Рис. 5

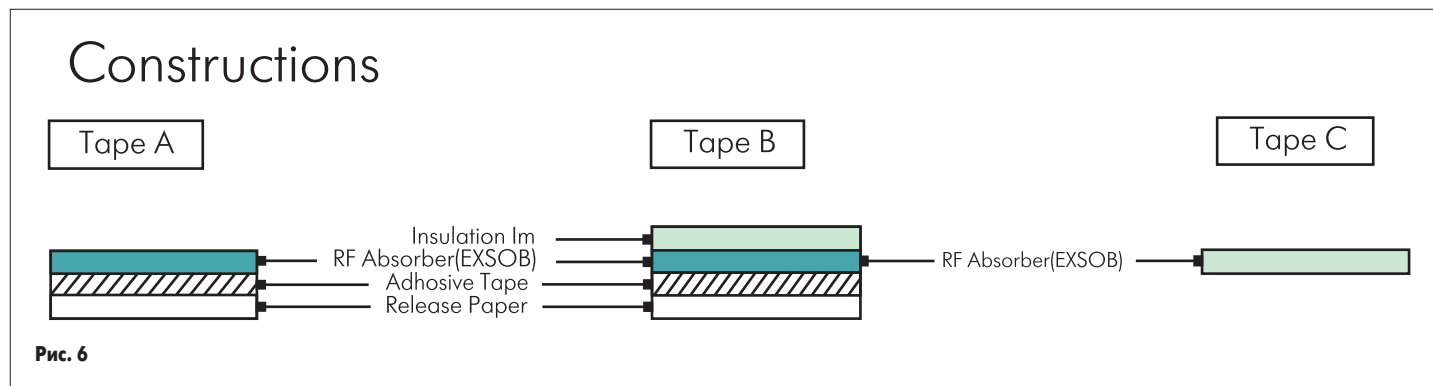


Рис. 6

**Литература**

1. Директива Совета от 3 мая 1989 г. о согласовании законодательных актов государств-участников, касающихся электромагнитной совместимости (89/336/ЕЕС). Официальный журнал Европейских сообществ. 1989. № L 139.
2. EN55011: Нормы и методы измерений характеристик радиопомех от промышленных, научных и медицинских (ПНМ) радиочастотных устройств (3-е изд.). 1998.
3. EN50065-1: Оборудование для передачи сигналов по электрическим сетям: требования к обеспечению связи, допускаемым уровням помех и методам измерений.

4. EN 50081: Электромагнитная совместимость — общий стандарт помехоэмиссии.
5. EN 50082: Электромагнитная совместимость — общий стандарт помехоустойчивости.
6. EN 50173: Информационные технологии. Общие системы прокладки кабелей. 1996.
7. EN 50147-1: Безэховые камеры. Измерение эффективности экранирования. 1997.
8. EN 50147-2: Безэховые камеры. Пригодность альтернативной испытательной площадки в отношении затухания площадки. 1997.
9. EN 50147-3: Основополагающий стандарт ЭМС. Помехоэмиссия. Измерение помехо-

- эмиссии в полностью безэховых камерах. 1999.
10. МЭК 61000, часть 5, раздел 2. Руководства по установке и помехоподавлению — заземление и прокладка кабелей. 1997.
11. МЭК 61000, часть 5, раздел 7. Степени защиты от электромагнитных помех, обеспечиваемые оболочками (EM-код). 1997.
12. Т. Уильямс. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский Дом «Технологии». 2003.
13. Т. Уильямс, К. Армстронг. ЭМС для систем и установок. М.: Издательский Дом «Технологии». 2003.
14. [www.techno.r](http://www.techno.r)