

Пассивная фильтрация ЭМИ.

Обзор компонентной базы.

Часть 1

Василий ГОРБАЧЕВ,
Виктор КОЧЕМАСОВ,
к.т.н.

О подобных статьях говорят: «Проблема описана от А до Я». Действительно, в этой публикации рассмотрены практически все аспекты пассивной фильтрации электромагнитных помех. Данный материал представляет интерес не только для инженеров, только начинающих знакомиться с проблемами ЭМИ, но и для специалистов, профессионально занимающихся электромагнитной совместимостью.

Введение

В понятие электромагнитной интерференции входит широчайший спектр электромагнитных помех с частотами от нулевой до гигагерц не только природного, но и искусственного происхождения. В истории науки известен случай, когда инженеры одной из лабораторий долго пытались понять происхождение импульсной радиопомехи в своем оборудовании. В результате была открыта новая галактика с мощной радиосветимостью.

Самая общая схема возникновения электромагнитной интерференции (ЭМИ) (рис. 1) содержит четыре канала проникновения помехи в оборудование, находящееся под их воздействием.

В эту схему можно уверенно добавить помехи внешнего происхождения. Заметим, что к понятиям «источник ЭМИ» и «оборудование под действием ЭМИ» следует относиться как к физическим, а не к техническим терминам. Понятно, что и источник и «приемник» ЭМИ могут «географически» располагаться в одном устройстве.

Помехи делятся на эфирные и проводные (кондуктивные). В документе CISPR 11 Международного комитета по стандартам шума определяются частотные полосы этих шумов. Считается, что кондуктивные помехи находятся в полосе 150 кГц...30 МГц, а эфирные — в полосе 30 МГц...1 ГГц. Эфирные помехи (№№2–3 на рис. 1) подавляются экранированием. Для этого используются замкнутые экранированные объемные конструкции в физике, известные как клетки Фарадея, в которые заключается защищаемое изделие. В за-

висимости от характера помеховой обстановки используются и чисто электрические экраны, и магнитные (магнитные пластины), а также электрические экраны с магнитным слоем.

Кондуктивные помехи (№№1–4 на рис.1) подавляются посредством фильтрации. Наиболее комплексным решением по улучшению помеховой ситуации является использование клетки Фарадея, на одну из экранированных поверхностей которой помещаются проходные фильтры кондуктивных помех. В этом случае все шины данных, управления и питания, находящиеся внутри экранированного объема, можно считать наиболее защищенными. Отсутствие по каким-либо причинам электрического экрана часто снижает электромагнитную совместимость (ЭМС), в том числе потому, что само устройство может в этом случае являться источником ЭМИ. Количественный пример этому можно найти в документации фирмы Syfer (рис. 2), где сравнивается монтаж фильтров двух номиналов на защищенную и незащищенную плату.

Говоря о фильтрах кондуктивных помех, необходимо заметить, что, в отличие от экранов, защитные фильтры снижают и помехи, и функциональную производительность оборудования.

Общепринятая практика подавления кондуктивных помех имеет некоторые различия в защите коммуникационных и силовых линий.

Типы фильтров кондуктивных помех для коммуникационных линий

На рис. 3 представлены основные типы фильтров: одно-, двух- и трехкомпонентные. В теории принято считать, что вносимые потери однокомпонентного фильтра составляют 20 дБ/дек, двухкомпонентных — 40 дБ/дек, а у трехкомпонентных — 60 дБ/дек. Практические результаты работы фильтров могут значительно отличаться от теоретических представлений. Об этом несколько ниже.

Основной метод выбора фильтров основан на учете импедансов источника сигналов на входе фильтра и, соответственно, нагрузки, которая подключается к его выходу. Правило предписывает соединить высокоомную часть коммуникационной линии с емкостной стороной фильтра, а низкоомную с индуктивной. Исходя из этого правила, например, С-фильтр следует включать в линию, разрыв которой имеет передающую и приемную сторону с высокими импедансами. Кроме того, из сравнения СЛ- и LC-фильтров следует, что при подавлении помех стоит задача не только очистить линию от шума, но и минимизировать снижение функциональности изделия за счет рассогласования в фильтруемых цепях.

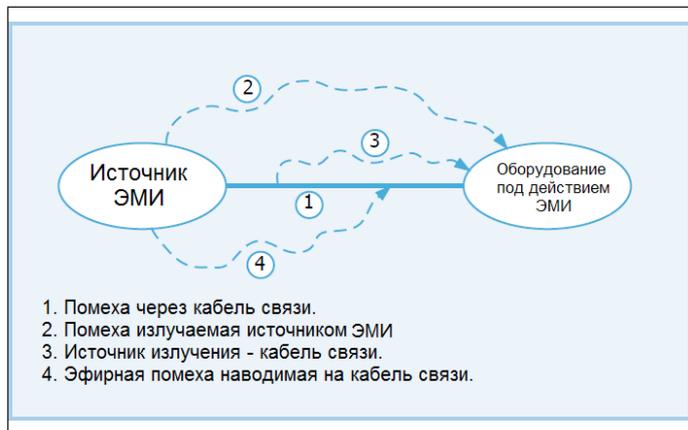


Рис. 1. Общая схема распространения электромагнитных помех

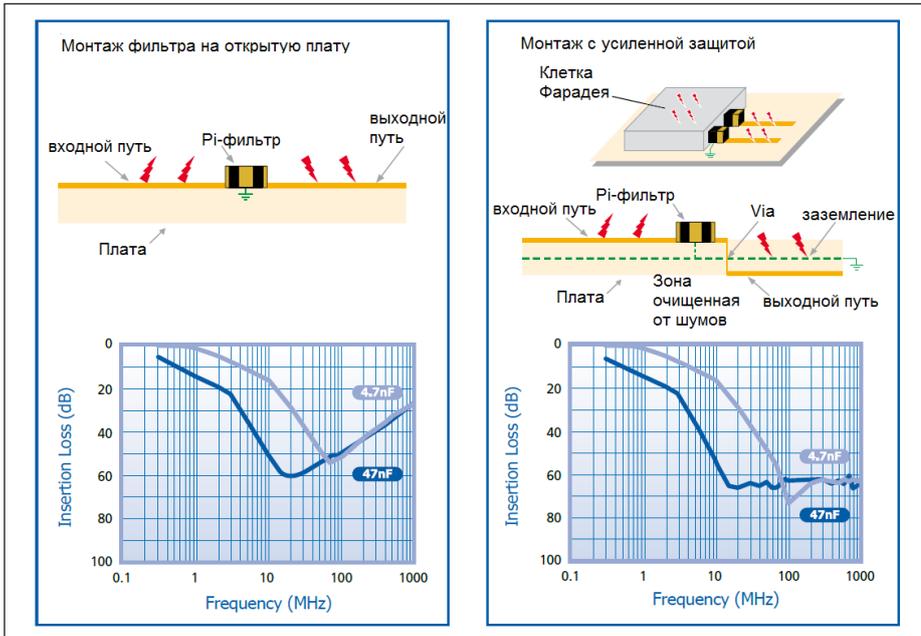


Рис. 2. Схема повышающего преобразователя с зарядным насосом

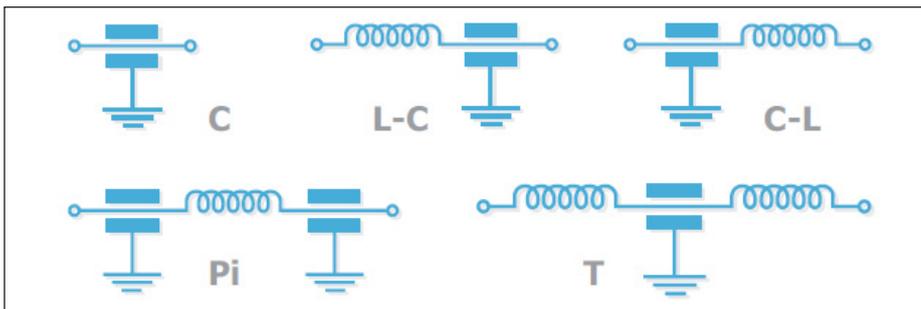


Рис. 3. Основные типы фильтров подавления помех в коммуникационных линиях

Фильтры силовых линий

Обычно помехи, порождаемые силовым оборудованием, рассматриваются на примере импульсных источников вторичного электропитания, узлы коммутации которых генерируют шум из-за больших значений dv/dt и di/dt . Кондуктивные шумы в импульсных преобразователях обычно находятся в полосе 150 кГц...30 МГц и разделяются на два типа (рис. 4).

На рис. 4 стрелками обозначен путь протекания тока помехи. При наличии дифференциального шума (normal mode noise или differential mode noise) ток помехи покидает источник по одному проводу, а возвращается по другому. В случае с синфазным шумом (common mode noise) ток помехи протекает в одну сторону в обоих проводах и через любые гальванические связи, имеющие необходимую разность потенциалов и выполняющие функцию подобную общей шине, и возвращается в источник.

Типовое решение по подавлению указанных видов шума в кабелях питания переменным током (рис. 5) содержит набор ком-

понентов, которые также в типовых случаях могут помещаться в общий корпус. В частности, компания Kemet производит серии таких фильтров FNC16 (ток до 16 А) и FNC10 (ток до 10 А).

Заметим, что разделение фильтров на конструкции для коммуникационных и силовых линий совершенно условное и связано лишь с наглядностью представления. Фильтры дифференциальных и синфазных шумов, подобные представленному на рис. 5, применяются и для защиты шин данных, в частности, например, USB, CAN, IEEE1394 и т.д. При этом специфика подавления таких шумов в шинах данных заключается в том, что при фильтрации шума ослабляется, а иногда и искажается полезный сигнал, чему практически не подвержены силовые линии. Особенно ощутимо это проявляется при передаче данных дифференциальным способом, как это происходит, например, в USB-шине. Дело в том, что при дифференциальной передаче в шине возникает более высокочастотный синфазный шум (рис. 6).

При этом в частотной области спектры сигнала и шума до ослабления и после различаются (рис. 7).

Заметим, что подавление шумов на слабых сигналах требует более тщательного учета природы сигналов.

Вносимые потери

С точки зрения физики, вносимые потери (insertion loss, IL) формируются тремя каналами потерь энергии. К ним относятся: поглощение в проводниках, поглощение в диэлектриках и та часть потерянной мощности, которая не поступила в нагрузку из-за

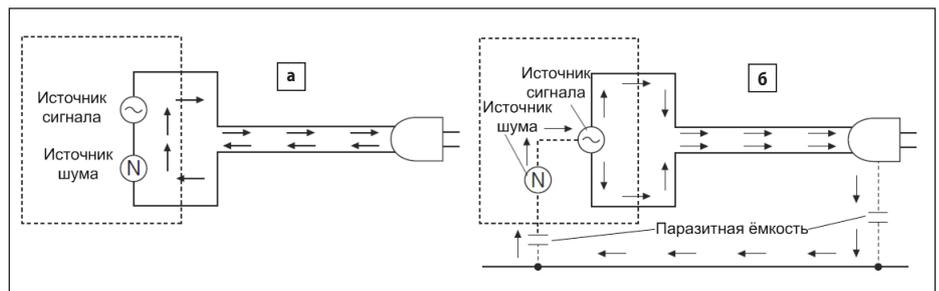


Рис. 4. Шумы в импульсных преобразователях: а) дифференциальные; б) синфазные

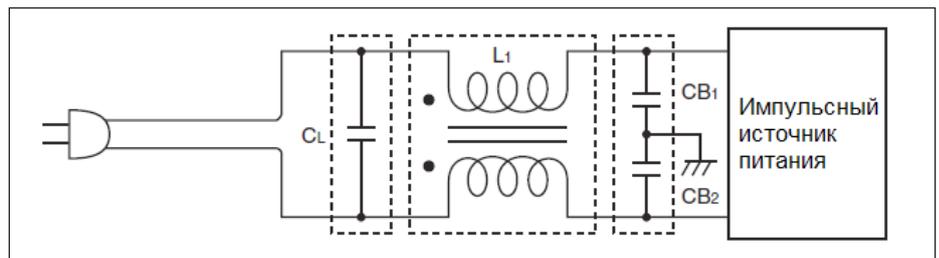


Рис. 5. Фильтр дифференциальных и синфазных помех: CL – X-конденсатор* (подавление дифференциальных шумов); L1 – дроссель синфазных шумов (повышение импеданса линии на частотах шумов); CV1, CV2 – Y-конденсаторы* (подавление синфазных и дифференциальных шумов шунтированием)

* Своё название X- и Y-конденсаторы получили из-за форм графического представления. Считается, что включение X-конденсатора в схему можно представить в виде буквы X. То же относится к включению Y-конденсаторов.

расогласования тракта передачи и связана с KCB (VSWR).

При этом в понимании вносимых потерь, например в радиотехнике, и в ЕМІ-фильтрации имеется некоторый смысловой нюанс. В предметной области, условно названной нами как «радиотехника», вносимые потери обозначают ослабление мощности полезного сигнала каким-либо элементом либо устройством, включенным в тракт прохождения. Соответственно этому вносимые потери выражаются через отношение входной и выходной мощности в тракте следующим образом (1):

$$\begin{aligned} \text{Вносимые потери} &= 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = \\ &= -10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \end{aligned} \quad (1)$$

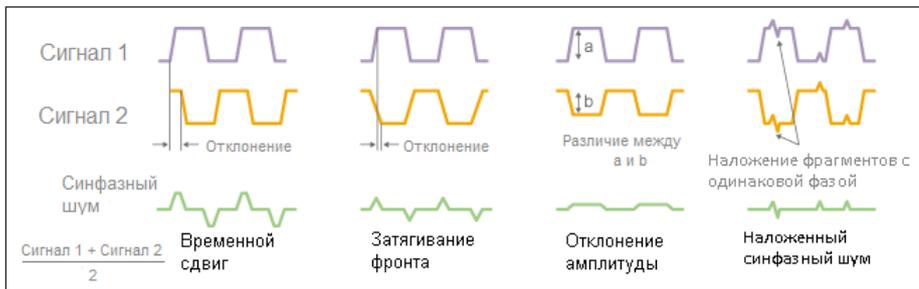


Рис. 6. Синфазный шум при дифференциальной передаче

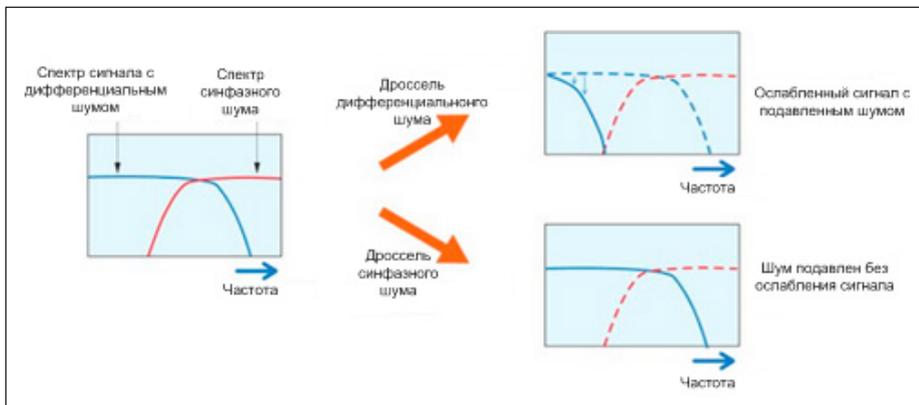


Рис. 7. Спектры сигнала и шума [2]

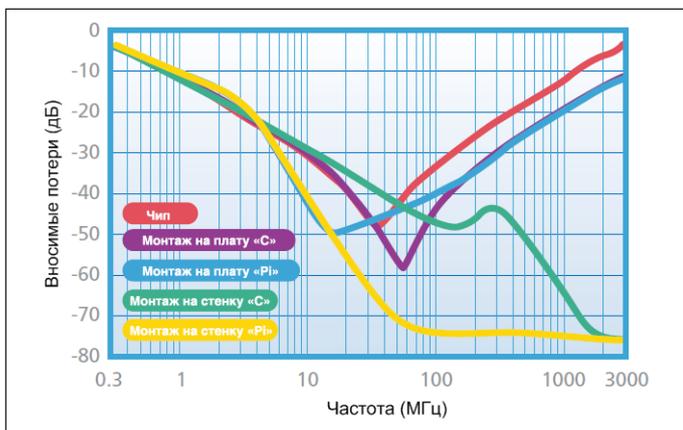


Рис. 8. Вносимые потери фильтров в полосе частот [3]

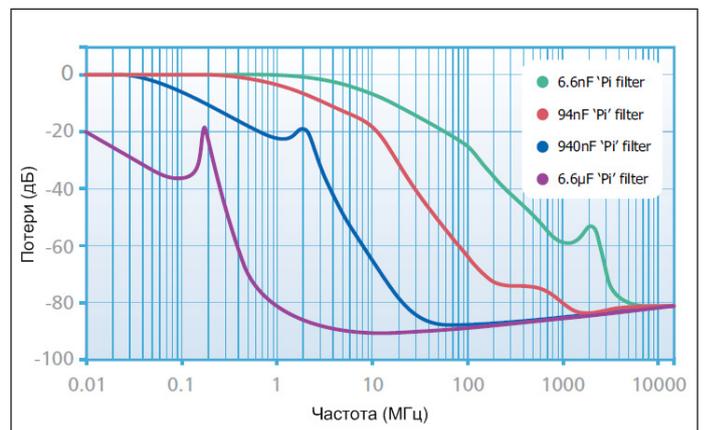


Рис. 9. Кривая подавления Pi-фильтров в конкретном дизайне [3]

Аналитический вид определения вносимых потерь при борьбе с помехами в каком-то смысле связан с тем, что подавление помех является иногда элементом технической культуры, а не обязательным этапом разработки электроники (2):

$$\text{Вносимые потери} = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

В этом определении E_1 — напряжение на входе тракта, если в нем присутствует устройство подавления помех, а E_2 — напряжение на входе тракта, когда подавление помех в тракте не осуществляется. В данном случае, как видно, приоритетом является постоянное напряжение на выходе тракта вне зависимости от наличия или отсутствия в нем устройств подавления помех.

Указанная выше разница в понимании состоит в том, что в условной «радиотехнике» потери являются «побочным продуктом» при работе некоего компонента, создающего целевой функционал изделия. Таким образом, практически никогда не стоит вопрос о применении или неприменении вносящего потери компонента — речь идет лишь о повышении его эффективности, то есть о снижении потерь. В области же подавления электромагнитной интерференции потери являются основной функцией соответствующих компонентов, и потому решение об их применении зависит в том числе от экономических параметров проекта.

В предметной области подавления ЭМИ термином «вносимые потери» характеризуется работа фильтров подавления в полосе частот. Иногда эта характеристика называется кривой ослабления (рис. 8).

Такого рода графики для отдельных типов фильтров и конкретных изделий приводятся в технических описаниях изделий. Эти зависимости получают при измерении в специальных камерах с функциональностью клетки Фарадея.

Вернемся к ранее упомянутой разнице в теории и практике применения устройств для подавления помех. При оценке применимости фильтров следует учитывать, что в конкретном проекте вид кривой потерь может отличаться от приведенного на рисунке, причем почти всегда в худшую сторону. Обратим внимание на желтый график потерь Pi-фильтра для установки на панель (рис. 8). Это типовой вид зависимости потерь от частоты шума. Фирма-производитель фильтров (например, Knowles) может по заказу покупателя провести испытание конкретных изделий в тестовой камере с соблюдением условий заказчика. На рис. 9 показано, как выглядит зависимость потерь от частоты шума в случае упомянутых панельных Pi-фильтров.

С поправкой, конечно же, на отсутствие информации о моделях сравниваемых фильтров мы, тем не менее, можем оценить влияние конструкции проектируемого устройства на частотную характеристику фильтра.

Материалы для экранирования

Металлы

Различные и многочисленные материалы, применяемые для экранирования ЭМИ, можно с полным правом считать пассивными компонентами для подавления помех. Их использование тем более обосновано тем, что, как уже упоминалось, экранирование помех, в отличие от фильтрации, не ухудшает (имеются исключения) функциональность конечного оборудования.

При подавлении ЭМП используется значительный набор металлов. Критерии выбора таковы:

- эффективность экранирования;
- гальваническая совместимость;
- проводимость;
- антикоррозионные свойства;
- вес;
- долговечность;
- стоимость проекта;
- производительность конечного оборудования.

Чаще всего применяются девять металлов и сплавов.

Медь. Практически идеальный и универсальный металл для подавления ЭМИ. Блокирует электрические и магнитные поля. Легко обрабатывается для придания сложной формы. Часто используется в сплавах для повышения эффективности фильтрации и увеличения коррозионной стойкости.

Бериллиевая медь (BeCu). Бериллий увеличивает экранирующие свойства меди, упрочняет и усиливает коррозионную стойкость. Обычно в сплаве содержится 0,5–3% бериллия. Гребенчатые пружинные прокладки из этого сплава являются отраслевым стандартом де-факто благодаря их чрезвычайно длительному сроку службы, в том числе в суровых условиях и при многократном использовании, а также их способности противостоять коррозии и радиации. Как изделие они очень легко настраиваются — предлагаются многочисленные вариации и модификации в зависимости от требований разных приложений.

Сплав 770. Состоит из меди, цинка и никеля и обладает значительными коррозионно-стойкими свойствами. Он эффективен для экранирования электромагнитных помех и имеет высокую прочность на разрыв. Этот сплав иногда и ошибочно называют мельхиором (Nickel Silver), хотя из-за наличия в сплаве цинка он относится к нейзильберам в соответствии со строгой классификацией.

Нержавеющая сталь. Дешевый и жесткий материал. Устойчив к коррозии и высоким температурам. Имеет относительно невысокую проводимость, что востребовано в некоторых приложениях. В комбинации с тканями из полиэфирных волокон применяется для защиты бытовой электроники и электроприборов.

Алюминий. Один из самых популярных материалов для подавления ЭМИ. Имеет лучшее соотношение прочность/вес, легко обрабатывается и формируется. Обладает коррозионной стойкостью и экономически эффективен.

Луженая сталь. Покрытие — олово. Хорошо паяется. Применяется для подавления ЭМИ относительно низких частот.

Никель. Чаще всего используется в качестве покрытий на других металлах. Применяется, в основном, для подавления ЭМИ на относительно низких частотах.

Монель. Сплав никеля и меди в сочетании с небольшим количеством железа, марганца, углерода и силикона. Прочнее никеля, обеспечивает отличную коррозионную стойкость, хорошую проводимость и отличные механические характеристики, например прочность на разрыв и устойчивость к старению. Однако монель не рекомендуется использовать в условиях контакта с алюминием в жестких условиях эксплуатации.

Мю-металл. Сплав никеля и железа. Легко обрабатывается. Чаще всего применяется в виде тонких листов, в том числе для конструирования клеток Фарадея. Экранирует электрические и магнитные поля.

Количественно сравнить защитные свойства металлов можно на примере меди и алю-

миния по расчетному графику ослабления внешнего магнитного поля при толщине защитного слоя 2 мм (рис. 10).

Основными производственными позициями металлических изделий для экранирования являются металлические листы, объемные корпуса, выполненные литьем, фрезерованием и спеканием, штампованные и гнутые экранирующие отсеки для монтажа на печатные платы (рис. 11), гребенчатые пружинные прокладки также, называемые контактными пальцами (рис. 12), элементы заземления, в частности, заземляющие оплетки с контактными площадками под винт (как правило, диаметром 3 и 4 мм).

Интересное решение по листовым защитным материалам предлагает компания Würth Elektronik [7]. Она выпускает заготовки для производства экранов и отсеков в виде тонкого металлического листа с нанесенной методом гравирования прямоугольной сеткой с размерами 5×5 мм. Размеры листовой заготовки: 0,2×206×148 мм. Гравировка сделана на глубину 0,1 мм. Материал листа относится к группе нейзильберов (сплавы меди с 5–35% никеля и 13–45% цинка). Производитель утверждает, что защитные характеристики этого сплава такие же, что у луженой стали, традиционно применяемой для производства отсеков. В демонстрационном видеосюжете,

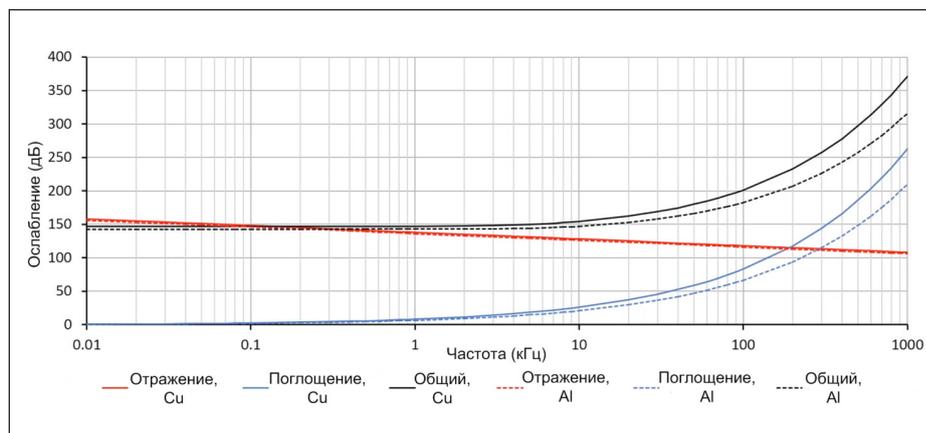


Рис. 10. Ослабление переменного магнитного поля медью и алюминием

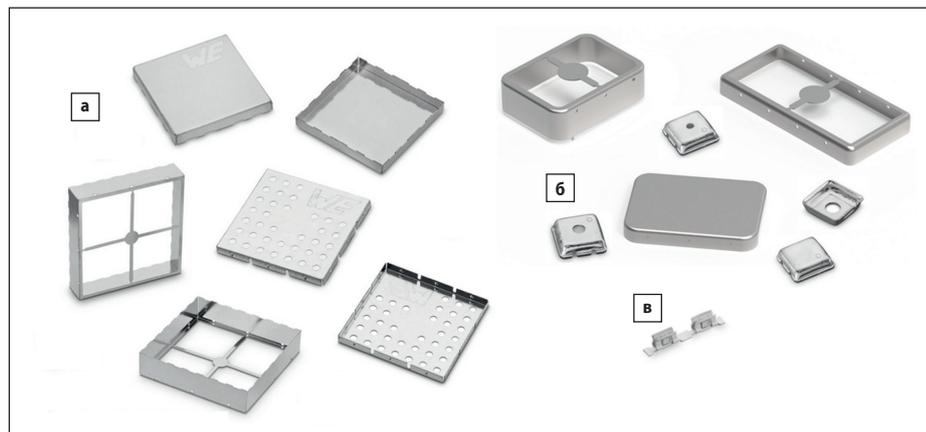


Рис. 11. Ослабление переменного магнитного поля медью и алюминием



Рис. 12. Виды гребенчатых пружинных прокладок



Рис. 13. Сигнал помехи от трекинг-генератора на экране анализатора спектра

кадр из которого приведен на рис. 13, специалист фирмы выполняет измерение электрического поля с частотами в диапазоне 9 кГц...1 ГГц на одинаковом расстоянии от платы без экрана (желтый спектр ~70 мкВ) и с экраном из этой заготовки (зеленый спектр ~50 мкВ).

Заметим в отношении литых и фрезерованных корпусов, что это чаще всего либо заказная продукция, либо они изготавливаются непосредственно на производстве РЭА.

Магнитные материалы

Основным параметром для любого материала, используемого в качестве магнитного экрана, является магнитная проницаемость μ . Она определяет способность материала формировать внутри себя магнитное поле как реакцию на внешний магнитный поток. Речь идет об относительной магнитной проницаемости μ_r , которая, в свою очередь, является комплексной величиной с действительной частью μ'_r , отвечающей за экранирование (отражение), и мнимой частью μ''_r ,

описывающей поглощение. Обе части параметра зависят от состава вещества, частоты воздействующего поля и температуры. В документации компании Würth Elektronik, имеющей обширную линейку листовых материалов для подавления ЭМИ, представлена зависимость магнитной проницаемости некоторых изделий от частоты (рис. 14).

В этом отношении заметим, что непроводящие гибкие поглощающие магнитные листы WE-FAS имеют худшие магнитные свойства в сравнении с гибкими листами со спеченным ферритовым материалом WE-FSFS в силу того, что полимер, являющийся связующей основой листов, уменьшает магнитную проницаемость композита. Преимуществом же диэлектрических магнитных листов является более широкая частотная полоса и способность к подавлению электрического поля высоких частот. Разная форма кривых μ' и μ'' открывает разработчикам дополнительные возможности маневра по частоте. На примере материала WE-FSFS 364 (черные кривые) видно, что до

частоты 10 МГц основным физическим процессом уменьшения ЭМИ является экранирование. Начиная с 10 МГц, магнитное поле начинает проникать в экран, где посредством вихревых токов и гистерезиса преобразуется в тепло (поглощение). Это позволяет конструктивно по-разному применять один и тот же экранирующий материал.

Подавление электромагнитных помех с помощью магнитных материалов требует соблюдения нескольких правил. В самом начале раздела о материалах для экранирования упоминалось, что, в отличие от фильтров, экраны не снижают функциональность изделия. Указывалось и на наличие исключений из этого правила. Таким образом, использование магнитного материала может стать таким исключением. При проектировании магнитного защитного элемента необходимо учитывать три осложняющих фактора.

Первый. Магнитная индукция в материале экрана не должна его насыщать. Отслеживание нежелательного насыщения — достаточно трудоемкий процесс, требующий специализированных измерений или математического моделирования.

Второй. Применение магнитного экрана создает распределенную индуктивность. В свою очередь, она может отрицательно влиять на защищаемое устройство, в том числе способствовать появлению резонансов на кривой зависимости затухания от частоты.

Третий. Магнитные свойства экрана зависят от температуры. Речь идет о точке Кюри, которая достигается как сумма внешней температуры и внутренней, связанной с поглощением магнитного поля защитным материалом. Это обстоятельство следует учитывать, например, при эксплуатации автомобильной электроники, которая работает при повышенной температуре [6].

По степени убывания магнитной проницаемости все материалы, используемые для защиты от магнитных полей, делятся на четыре группы (табл. 1):

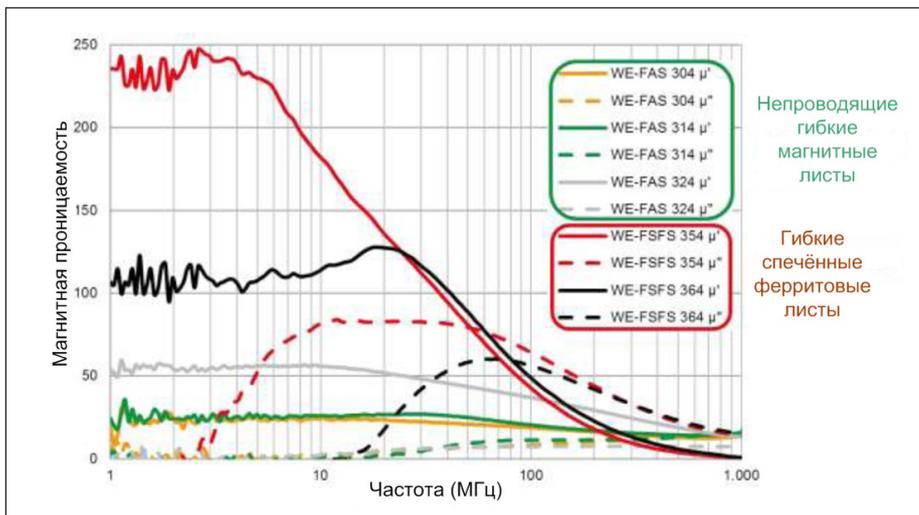


Рис. 14. Зависимость магнитной проницаемости некоторых листовых материалов от частоты [5]

Таблица 1. μ , некоторых материалов используемых для защиты от магнитных полей**

Группа	Материал	μ'
аморфные и нанокристаллические сплавы	нанокристаллический сплав**	30000–80000
сплавы никеля и железа	мю-металл	20000–25000
	пермаллой	8000
ферриты	марганец-цинковый феррит	640 и более
	никель-цинковый феррит	до 640
магнито-мягкие материалы	никель	до 600
	нержавеющая сталь	500
	сталь	100

**У нанокристаллического сплава с указанным в таблице значением магнитной проницаемости отсутствует международно признанное название. У ПАО «МСТАТОР», одного из производителей этого материала, сплав называется АМАГ200. Его аналог у ООО НПП «Гаммамет» – ГМ412Б ГМ414, у Hitachi – Finemet FT-3KM, у Magnetec (Германия) – Nanoperm. В КНР подобный сплав имеет индексы 1k101, 1k107. Заметим, что, в целом, применение этих сплавов сдерживается только ценой и некоторыми температурными ограничениями, поскольку при превышении определенной температуры у аморфного сплава появляется кристаллическая структура. Использование сердечника магнитопровода из аморфного или нанокристаллического материала позволяет уменьшить количество витков обмотки и, соответственно, паразитную емкость.

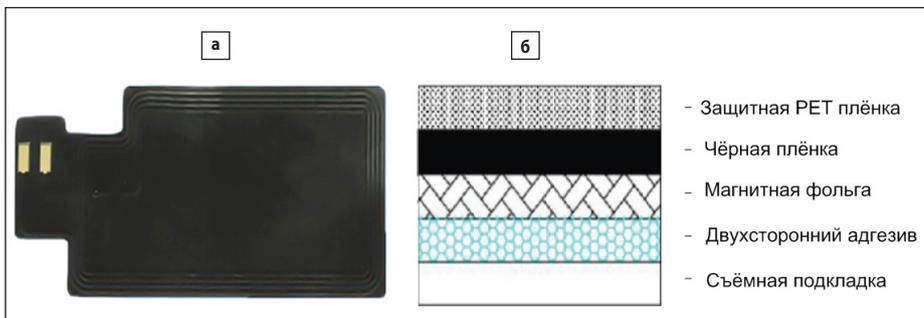


Рис. 15. а) NFC-антенна с магнитным экраном; б) структура материала NC

- аморфные и нанокристаллические сплавы;
- сплавы никеля и железа: основные — мю-металл и пермаллой;
- ферриты: керамические материалы, содержащие оксиды железа и других металлов;
- магнитомягкие материалы: в эту группу объединены материалы, не вошедшие в первые три группы.

Большинство магнитных экранирующих материалов выпускается в виде гибких листов и лент со сложной структурой. Одним из основных потребителей этой продукции являются приложения короткозоновой беспроводной связи NFC/RFID и беспроводные зарядные устройства. Соответственно этому адаптированы и защитные свойства магнитных экранов. Продукция подавляющего большинства производителей практически не отличается по характеристикам, поскольку они определяются именно требованиями соответствующих приложений. В качестве типового примера можно привести гибкие экраны компании DK-Daleba, выпускаемые под торговым знаком EMITERMO. Это серия магнитных материалов NC (Nano-Crystalline) в виде полос на основе железа шириной 50 мм и толщиной 0,03–0,3 мм. Магнитная проницаемость этих изделий заявлена в двух частотных диапазонах: 200 кГц (беспроводная зарядка

по технологии WPC-Qi) и 13,56 МГц (NFC/RFID). В первом случае ее действительная часть равна 400–700, мнимая — 20–40, а во втором — 300–500 (действительная) и 100–200 (мнимая). Точка Кюри 570 °С; диапазон рабочей температуры: –40...85 °С (рис. 15).

Эффективность магнитного экранирования удобно продемонстрировать на примере резонансных короткозоновых беспроводных технологий NFC/RFID (рис.16).

При отсутствии экранирования (рис. 16а) магнитное поле считывающего устройства наводит вихревые токи в проводящих элементах конструкции (условно показано плоскостью серого цвета). В результате генерируется опозитное магнитное поле (красные линии на рис. 16а), которое снижает качество связи. Использование магнитного экрана (рис. 16б) оптимально формирует магнитное поле ридера.

Еще один защитный эффект магнитного экрана представлен на рис. 17.

Благодаря наличию проводящего материала в магнитном поле антенны порождаемые им вихревые токи снижают индуктивность антенны. В результате повышается резонансная частота антенны, и одновременно уменьшается добротность (красная линия на рис. 17). При использовании магнитного экрана из материала WE-FSFS 364 (Würth Elektronik) происходит некоторое увеличение индуктивности с соответствующим уменьшением ре-

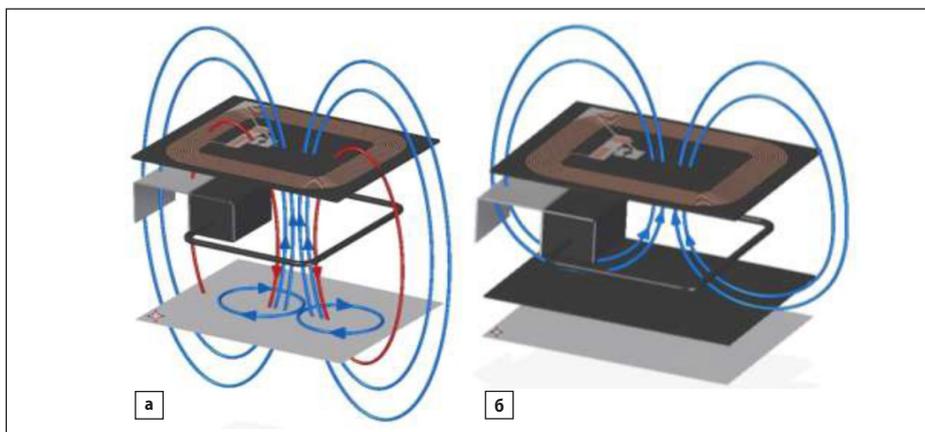


Рис. 16. Влияние магнитного экранирования в системах NFC/RFID

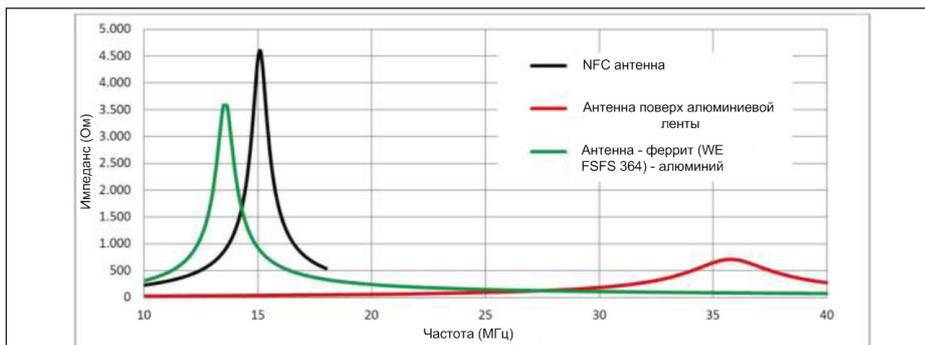


Рис. 17. Влияние магнитного экрана на добротность и резонансную частоту антенны [5]

зона частоты, но при этом из-за малых потерь (μ^2) экрана добротность существенно не ухудшается (зеленая линия на рис. 17).

Еще одним пассивным компонентом, используемым для подавления ЭМИ без гальванических связей с защищаемым оборудованием, являются ферриты для установки на кабели. Для производства этих изделий используется никель-цинковый феррит, эффективный в широкой полосе частот. Обычно в производственных линейках фирм такие ферриты представлены двумя большими группами. На рис. 18 показаны основные модели кабельных сердечников компании Würth.

Разрезные ферритовые сердечники (полукольца и полумуфты) в пластмассовых корпусах, имеющих системы фиксации на кабель и на основание (рис. 18а). Подавляющее большинство арматуры оснащено системой авторизованного размыкания в виде ключей (рис. 18а, поз. 1–3). Замкнутые ферритовые сердечники (рис. 18а, поз. 1, 4). Имеются и «переходные» конструкции с разрезными сердечниками, соединяемыми посредством клипс или термоусаживаемой трубки (рис. 18б, поз. 2–3). В качестве комплектующих производятся полукольца и полумуфты на различные диаметры до 33 мм (рис. 18б, поз. 3).

Компания Würth, производящая кабельные ферриты в арматуре, рекомендует потребителям придерживаться специальных правил хранения таких изделий. Для повышения огнестойкости в пластмассу добавляются присадки, которые повышают так же и гигроскопичность материала. При ненадлежащем хранении резкое изменение влажности, например вследствие изменения температуры может привести к разрушению арматуры сердечника. Поэтому рекомендуется до первого применения контролировать влажность хранения на уровне 1,5–2% (для полиамида PA 66/6). При первом применении во время защелкивания произойдет максимальное изгибание элементов конструкции арматуры, для чего и нужна соответствующая влажность изделия.

И, конечно же, главным в рекомендациях производителя является способ выбора кабельного феррита для конкретного прило-

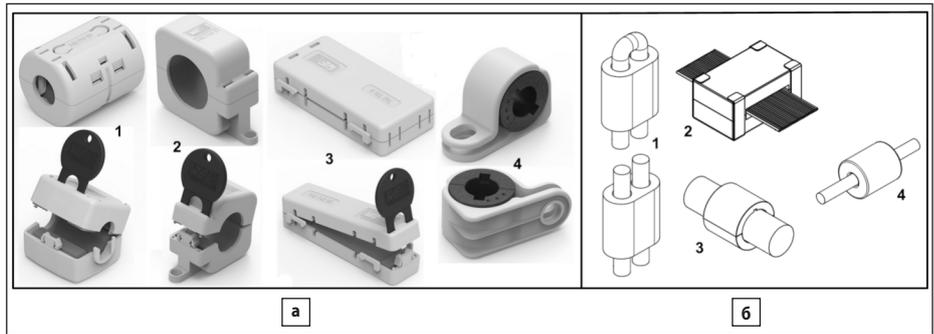


Рис. 18. Модели кабельных ферритов: а) разрезные в арматуре; б) замкнутые и разрезные без арматуры

жения. Основным параметром для выбора служит импеданс сердечника в рабочей полосе частот. Это связано с тем, что подавление ЭМП ферритом происходит посредством превращения электромагнитного поля в тепло в материале сердечника. Выбор кабельного феррита осуществляется по нескольким видоизмененной формуле (2) для вычисления вносимых потерь (рис. 19), основанной на эквивалентной схеме среды распространения [7].

Переменные Z_A и Z_B называются динамическим (системным) импедансом среды распространения. Для высокочастотных приложений они не поддаются расчету и применяются в соответствии с предположением, проверенным инженерной практикой. Z_F — импеданс феррита, который можно найти из формулы (рис. 19), если задать требуемое ослабление. Числовые значения Z_A и Z_B приводятся в табл. 2.

Далее по каталогу производителя, в котором указаны импедансы изделий, подбирается конкретная марка феррита. Например, компания Würth Elektronik приводит в своих технических описаниях импедансы для двух частот — в основном, для 25 и 100 МГц (в случае низкочастотных серий — для 1 и 10 МГц). А, например, для изделия серии WE-RIB (рис. 18б, поз. 1) приводятся значения еще и для одного и двух проводов. Так, импеданс сердечника-муфты 7427056 для провода диаметром 3,5 мм составляет

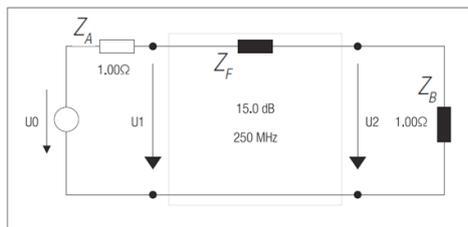
Таблица 2. Значения динамического импеданса среды распространения

Практически возможные значения системного импеданса	Приложение
1 Ом	заземление (поверхность)
10 Ом	линии питания
50–90 Ом	шины данных/такты/ видеосигнал/USB
90–150 Ом	длинные шины данных

для одного провода 126 Ом и 80 Ом — для двух проводов на частоте 25 МГц. На частоте 100 МГц значения возрастают, соответственно, до 260 и 182 Ом. Заметим также, что указанное изделие заявлено производителем не только как устройство для подавления ЭМИ, но и как согласующий трансформатор сопровитлений.

Литература

- EMI Filters // <http://www.tms-elektronik.com/images/content/files/Syfer-Filter-Catalogue.pdf>.
- Murata. SMD/BLOCK Type EMI Suppression Filters EMIFIL.
- EMI Filters // www.knowledscapacitors.com.
- Design Kits EMC Components // <https://www.we-online.com>.
- Jorge Victoria Ahuir. AN. Going Wireless with Magnetic Shielding. Würth Elektronik.
- Крис Буркет. Основы экранирования электромагнитных помех. Электронные компоненты. №3. 2020.
- Würth Elektronik // <https://www.we-online.com>.



$$A \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \frac{Z_A + Z_F + Z_B}{Z_A + Z_B}$$

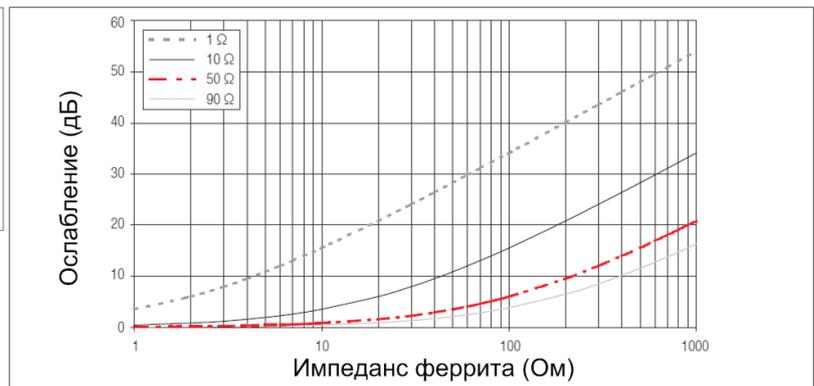


Рис. 19. Выбор кабельного феррита