

# Экранирование радиоэлектронной аппаратуры

## как метод обеспечения электромагнитной совместимости

Александр Ивко

tp@test-expert.ru

Электромагнитное экранирование — это основной метод обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в части устойчивости к воздействию электромагнитным полем, а также к соответствию требованиям к уровню излучаемых помех. Установка экранов на помехоизлучающие элементы обеспечивает разделение сигналов, необходимое для функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), повышает избирательность приемников, помехозащищенность чувствительной аппаратуры, чистоту сигнала генераторов, точность работы приборов. Правильный выбор метода экранирования, материала экрана и его конструкции очень важны именно на начальном этапе проектирования, поскольку он будет определять возможность успешного прохождения испытаний на ЭМС и качественного функционирования разрабатываемой аппаратуры.

Финансовые и временные затраты на экранирование РЭА возрастают экспоненциально с увеличением размеров устройства и приближением момента сдачи изделия. При этом цена прототипа, совершенного в начале проектирования, на этапе сдачи изделия может сравниться с его стоимостью. В качестве практического примера возьмем изделие, представляющее собой набор оборудования, установленного в морской контейнер. В целом к изделию предъявляются жесткие военные требования по излучаемым помехам в широком частотном диапазоне. Однако данные требования не были учтены в ходе проектирования контейнера. В результате в конструкции не создан надежный

контакт по периметру дверей, не установлены фильтры ввода питания, оценочный коэффициент экранирования вентиляционной решетки недостаточен для обеспечения заданного в ГОСТе коэффициента экранирования. По предварительной оценке, переделка контейнера, с учетом сроков сдачи изделия в эксплуатацию, превышает стоимость самого контейнера. Именно поэтому необходимо тщательно планировать помеховую обстановку изделия, применяя экраны, фильтры и поглощающие материалы.

Рассмотрим взаимодействие электромагнитной волны с экраном (рис. 1) и определение коэффициента экранирования. В общем случае коэффициент экранирования  $K_3$  — это отношение интенсивности электромагнитного поля, измеренной до установки непрерывного бесконечного экрана и после его установки. Формулы для расчета взаимодействия при измерении напряженности поля в различных величинах:

$$\begin{aligned} E_2 &= E_1 - E_3 - E_4 - E_5, \\ K_3 [\text{дБ}] &= 10 \log(P_1/P_2), \\ K_3 [\text{дБ}] &= 20 \log(E_1/E_2), \\ K_3 [\text{дБ}] &= 20 \log(H_1/H_2), \\ K_3 [\text{дБ}] &= P_1 [\text{дБ}] - P_2 [\text{дБ}], \end{aligned}$$

где  $E_1$  — падающая волна;  $E_2$  — прошедшая волна;  $E_3$  — поглощенная волна;  $E_4$  — переотраженная волна;  $E_5$  — отраженная волна.

От каждой границы раздела сред совершается отражение электромагнитной волны, а в толще материала происходит поглощение. На высоких частотах коэффициент экранирования определяется в основном коэффициентом отражения  $E_5$ , который для электромагнитного поля близок к 100% и растет с повышением частоты и проводимости материала. Коэффициент отражения связан с генерацией в тонком приповерхностном слое токов той же частоты, что и воздействующее поле и, следовательно, с генерацией поля противоположной направленности. Поглощение  $E_3$  связано со скин-эффектом — протеканием токов высокой частоты в тонком приповерхностном слое проводника. Толщина скин-слоя убывает с ростом частоты и проводимости и увеличивается с повышением магнитной проницаемости. Например, для 50 Гц — 1 см; для 5 кГц — 0,1 см; для 0,5 МГц — 10 мкм; для 2,4 ГГц — 1,67 мкм. Таким образом, для эффективного экранирования высокочастотных полей достаточно иметь тонкий экран из материала с высокой проводимостью и низкой магнитной проницаемостью.

Напротив, для экранирования постоянных магнитных полей и низкочастотных электромагнитных

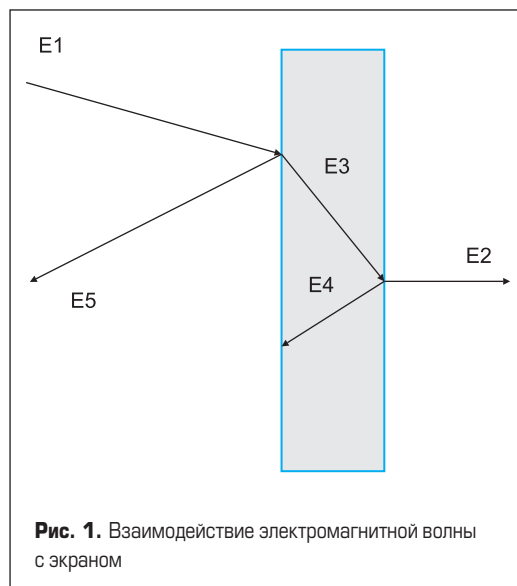


Рис. 1. Взаимодействие электромагнитной волны с экраном

полей, где преобладает магнитная составляющая, необходимы материалы с высокой магнитной проницаемостью. Чем выше магнитная проницаемость материала, тем выше коэффициент экранирования.

Итоговый коэффициент экранирования представляет собой сумму потерь на отражение и поглощение. На рис. 2 приведены расчетные значения потерь на отражение и поглощение для стали (проводимость  $7,69 \times 10^6$  См/м, относительная магнитная проницаемость 50) и меди (проводимость  $58 \times 10^6$ , проницаемость 0,9999). Для меди с ростом частоты потери на отражение уменьшаются, а потери на поглощение увеличиваются из-за ее высокой проводимости. Для стали потери на отражение также уменьшаются, потери на поглощение растут сначала даже быстрее, чем у меди, поскольку на низких частотах все еще велика магнитная составляющая, однако с дальнейшим повышением частоты эта же проницаемость, а также низкая проводимость стали приводят к уменьшению потерь на поглощение, и на сверхвысоких частотах сталь малоэффективна. Следовательно, для экранирования на высоких частотах предпочтительны материалы с высокой проводимостью, на низких частотах — материалы с высокой проницаемостью.

Примеры металлов и сплавов сведены в таблице. Для экранирования магнитного поля предпочтительным материалом является пермаллой с начальной проницаемостью  $10 \times 10^3 - 100 \times 10^3$ . Далее по убывающей: альсифер — 35 000, железо чистое — 10 000, трансформаторная сталь — 250–1000, сталь конструкционная — 50 и другие магнитомягкие материалы. Для экранирования высокочастотных электромагнитных полей необходимо применять материалы с высокой проводимостью: серебро  $62 \times 10^6$ , медь  $58 \times 10^6$ , алюминий  $37 \times 10^6$ , латунь  $12,5 \times 10^6$ , сталь  $7,6 \times 10^6$ . При этом металлы и сплавы с высокой проводимостью, кроме стали, не годятся для экранирования постоянных магнитных полей, поскольку имеют магнитную проницаемость, равную 1 (как у воздуха). Для экранирования в широком диапазоне частот лучше всего подойдут многослойные материалы — например, сталь с нанесенным слоем из хорошо проводящего металла. Такие листы применяют для изготовления безэховых камер. Для дальнейшего повышения коэффициента экранирования возможно использование комбинированных многослойных материалов.

### Конструкция экранов

Казалось бы, создать качественный экран с высоким коэффициентом экранирования очень просто — необходимо изготовить замкнутый электрически герметичный контур (например, куб), и тогда легко получить  $K_e$  порядка 100 дБ и более. К сожалению, в реальности это невозможно, так как понадобятся отверстия для ввода кабелей, вентиляции и обслуживания аппаратуры.

Каждое отверстие или щель в экране, сравнимые с  $1/20$  длины волны, следует учитывать при планировании экрана (рис. 3). Так, для 1 ГГц отверстие диаметром 1,5 мм ухудшит коэффици-

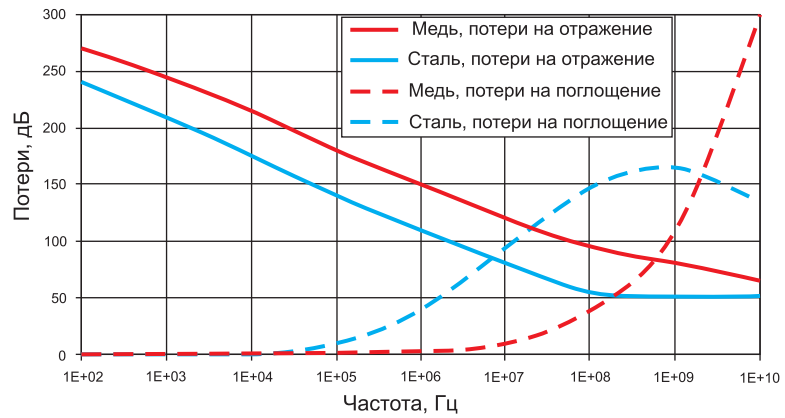
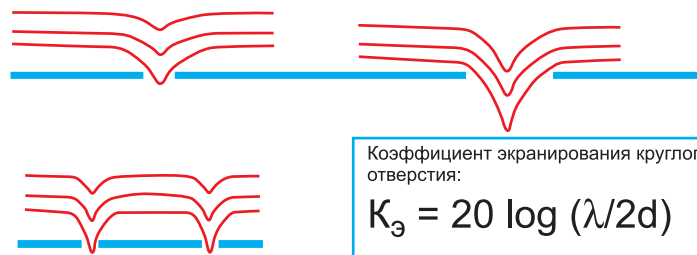


Рис. 2. Расчетные значения потерь на отражение и поглощение



Коэффициент экранирования круглого отверстия:  

$$K_9 = 20 \log (\lambda/2d)$$
 $\lambda$  - длина волны  
 $d$  - наибольший диаметр отверстия

Два отверстия имеют коэффициент экранирования на 6 дБ хуже чем одно.  

$$K_n = 20 \log n$$

Рис. 3. Планирование экрана

ент экранирования до 40 дБ; 1,5 см — до 20 дБ. При увеличении количества отверстий коэффициент экранирования ухудшится на  $K_n = 20 \log n$ . Необходимо избегать больших отверстий и щелей в экране. Много маленьких отверстий лучше, чем одно большое.

В случае если все же необходимо отверстие строго определенного диаметра (в частности, для вентиляции или ввода диэлектрических кабелей), можно использовать запердельный волновод (рис. 4). Это полая трубка из проводящего материала, длина которой

Таблица. Примеры металлов и сплавов

Экранирование постоянного магнитного поля	Экранирование высокочастотного электромагнитного поля
Пермаллой	Серебро
Альсифер	Медь
Технически чистое железо	Алюминий
Трансформаторная сталь	Латунь
Электротехническая сталь	
Магнитомягкие материалы	Материалы с высокой проводимостью

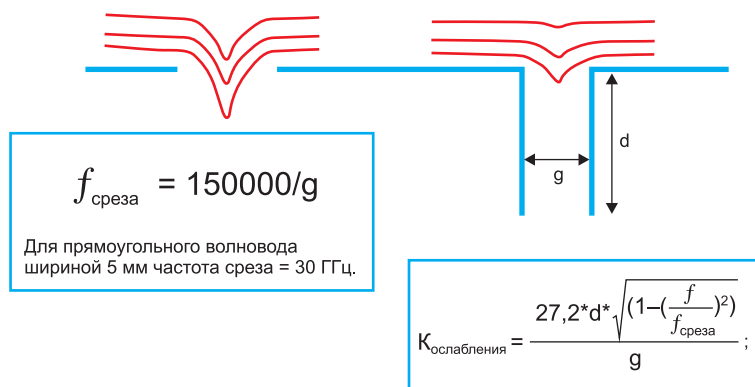
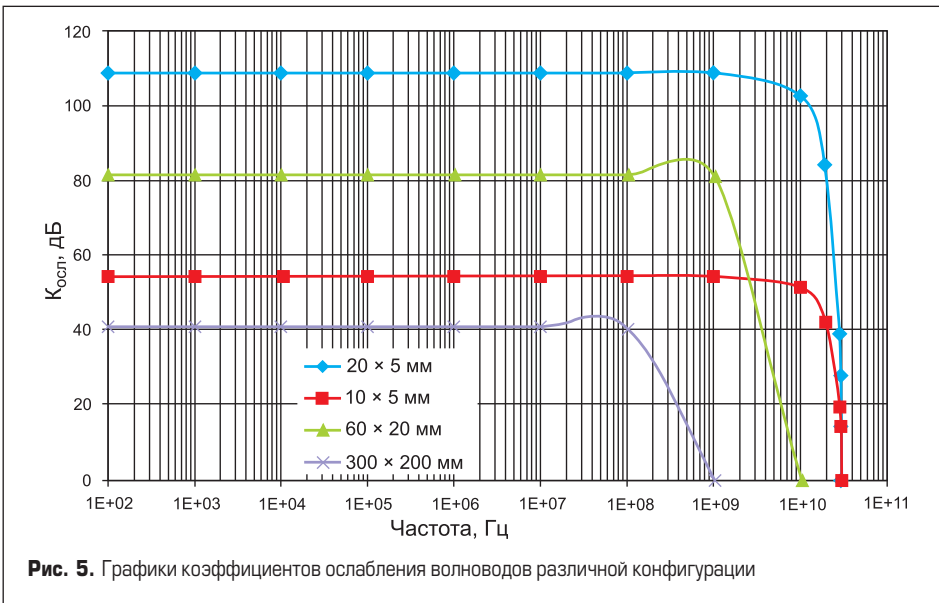


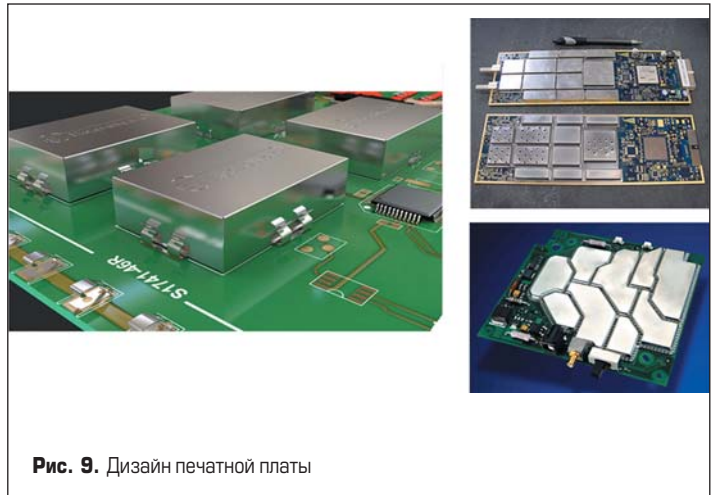
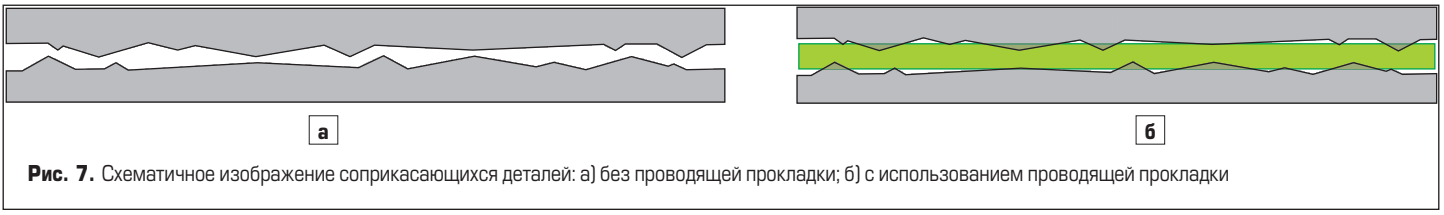
Рис. 4. Использование запердельного волновода



значительно превышает диаметр. Свойства данной конструкции частотно зависимы. Электромагнитные волны ниже определенной частоты будут распространяться с очень большим затуханием. Частота, выше которой электромагнитная волна распространяется по волноводу практически без потерь, называется частотой среза волновода и определяется из его наибольшего внутреннего размера по формуле  $f = 150\,000/g$ , где  $g$  — наибольший поперечный размер отверстия. Для прямоугольного волновода шириной 5 мм частота среза равна 30 ГГц. Коэффициент ослабления уже будет зависеть и от длины волновода, и от частоты и рассчитываться по формуле, представленной на рис. 4.

Для примера на рис. 5 построены графики коэффициентов ослабления волноводов различной конфигурации. Видно, что при уменьшении длины трубки с 20 до 10 мм  $K_3$  уменьшается со 108 до 54 дБ, причем частота среза остается постоянной. При изменении диаметра отверстия изменяется частота среза волновода. Для волновода диаметром 20 мм — это 10 ГГц, для волновода диаметром 200 мм — уже 1 ГГц. У запердельного волновода есть еще одно ограничение: если внутрь волновода ввести проводящий кабель, то волновод потеряет свои изолирующие свойства. Запердельный волновод подходит только для ввода диэлектрических кабелей типа оптических, не сильно искажающих диэлектрическую проницаемость среды. На рис. 6 показаны конструкции из запердельных волноводов.

Мы рассмотрели технические решения для создания вентиляционных решеток и ввода оптических кабелей, но есть еще одна проблема — образование щелей и зазоров, неизбежно появляющихся в процессе соединения элементов конструкции между собой. На рис. 7 схематично изображены в большом увеличении две соприкасающиеся детали. Кроме непосредственного искривления самих эле-



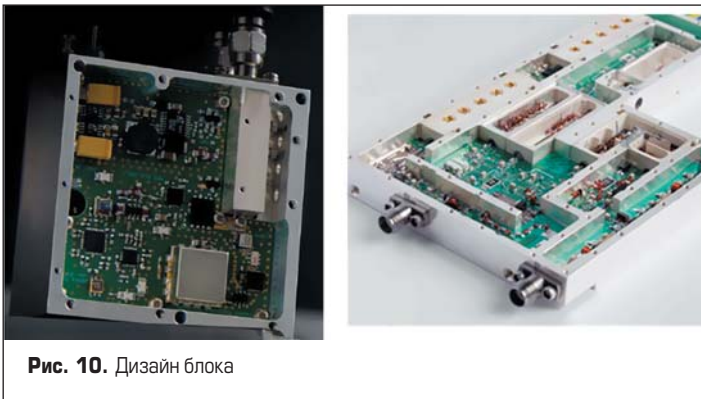


Рис. 10. Дизайн блока



Рис. 11. Дизайн корпуса

ментов конструкции, металлические детали имеют неровности, которые, соприкасаясь друг с другом, образуют зазоры и щели. Для надежного электрического контакта в этом случае необходимо применить довольно большое усилие прижима либо проводящую прокладку, обеспечивающую непрерывный контакт на всем протяжении щели.

В настоящее время промышленность выпускает огромное количество проводящих прокладок самых различных свойств и размеров (рис. 8).

### Планирование помеховой обстановки на различных этапах разработки

Планировать помеховую обстановку и экранирование необходимо на начальном этапе проектирования, предотвращая распространение нежелательных сигналов от самого источника.

Первый уровень разработки — дизайн печатной платы (рис. 9), к которому относятся правильное проектирование полигонов «земли», линий передачи, фильтров. Для экранирования отдельных элементов или целых областей печатной платы применяются металлические экраны, состоящие из двух частей. Одна часть — основание (фиксируется на печатной плате), вторая часть — крышка (надевается сверху и фиксируется зажимами, защелками или пайкой).

Второй уровень — дизайн блока. На рис. 10 представлены блоки, направленные на создание коэффициента экранирования около 100 дБ. Шаг винтов следует выбирать, исходя из максимальной частоты, которую требуется экранировать, также необходимо использовать проводящую прокладку. Корпус выполнен из цельного куска металла — это оправдано, когда нужны сложные формы с разделением каналов, зон с разными частотами и мощностями.

Третий уровень — дизайн корпуса (рис. 11). На данном этапе появляются вентиляционные отверстия, подвижные элементы и прозрачные панели для экранов. Окончательный коэффициент экранирования такой конструкции уже довольно трудно рассчитать, зато его можно достаточно достоверно оценить методом непосредственного измерения благодаря тому, что внутрь вполне может поместиться излучающая антенна с источником сигнала.

Следующий этап — соединение двух экранированных систем (рис. 12). Кабели и соединители должны быть экранированы и иметь электрический контакт по всей окружности разъема. Необходимо избегать соединения экрана кабеля с корпусом оборудования одним тонким проводником, так как он вносит паразитную индуктивность, а следовательно, имеет высокое полное сопротивление на высоких частотах. Ввод внешних кабелей должен осуществляться через проходные фильтры, заключенные в отдельный экранированный корпус.

Итак, для создания эффективного экрана необходимо:

- подобрать материал, его структуру и толщину в зависимости от составляющей электромагнитного поля, которую требуется экранировать;
- по возможности исключить любые отверстия и щели и любые другие прерывания электрического контакта, по размерам сравнимые с  $1/20$  длиной волны;
- для вентиляции и ввода кабелей использовать запердельные волноводы;
- для ввода сигналов и питания применять оптические линии связи и проходные фильтры;
- для обеспечения контакта по периметру сборных конструкций использовать проводящие прокладки или пружинные контакты;

- контролировать коэффициент экранирования корпусов, проводя натурные измерения, когда это возможно.

Применяя эти правила, можно довольно дешево и быстро решить проблемы электромагнитной совместимости, возникающие при разработке и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, а также с уверенностью подтвердить соответствие радиоэлектронной аппаратуры требованиям ГОСТов в аккредитованной испытательной лаборатории. Например, протокол испытательной лаборатории ЭМС ЗАО «ТЕСТПРИБОР», аккредитованной «АРМАК» и «Военный Регистр», позволяет в том числе получить сертификат соответствия продукции. По требованию заказчика работы проводятся под контролем военного представителя МО РФ. Лаборатория проводит испытания на соответствие требованиям подавляющего большинства нормативных документов по ЭМС из области авиации и наземной техники.

Сегодня трудно переоценить важность проведения испытаний на ЭМС, особенно в связи с участвовавшими техногенными авариями. Они лишь показывают, что необходимо не только расчетами, но и натурными испытаниями подтверждать соответствие продукции государственным стандартам. Прежде всего, это относится к военной, космической и авиационной отраслям, где цена ошибки чрезвычайно высока.

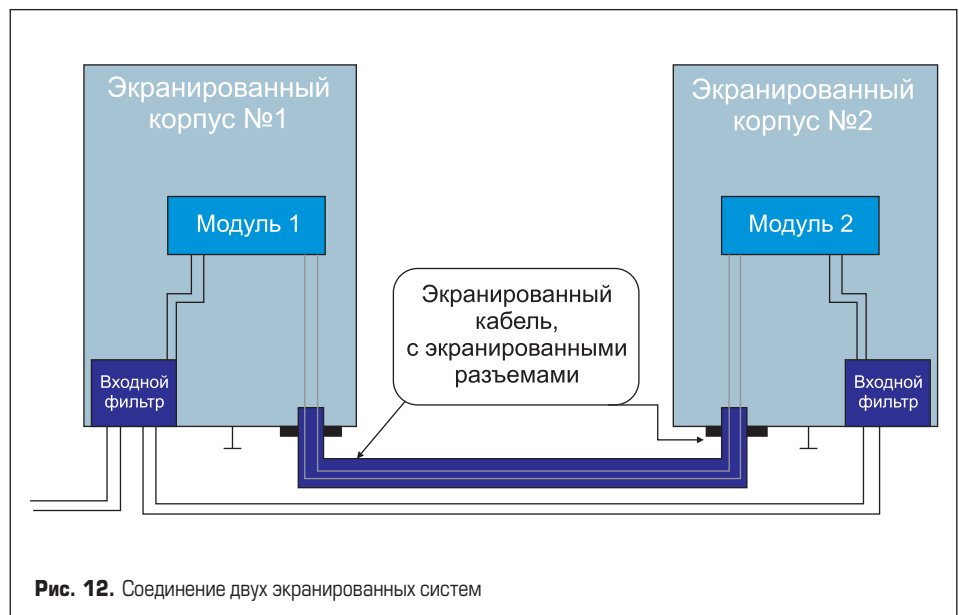


Рис. 12. Соединение двух экранированных систем