

ЭКРАНИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**И.Н. Карпов**

os186@yandex.ru

SPIN-код: 4000-5610

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Статья посвящена одному из основных способов достижения стойкости электронных систем к воздействию электромагнитной помехи — экранированию. Рассмотрены условия возникновения электромагнитных помех, причины необходимости борьбы с данными помехами, мероприятия по их ослаблению. Освещены факторы, влияющие на эффективность различных экранов в определенных условиях. Приведена классификация электромагнитных экранов по трем признакам. Даны рекомендации по расположению в экранах отверстий, например, для обеспечения теплового режима, осуществления доступа к регулируемым элементам экранируемых устройств, подключения проводов, а также по использованию материалов для осуществления электромагнитного экранирования с большой эффективностью.

Ключевые слова

Радиоэлектронная аппаратура, экранирование, защитные экраны, электромагнитное поле, экранирующие материалы, электромагнитная совместимость, помехи, экранирующая эффективность

Поступила в редакцию 29.03.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. В настоящее время активное использование электромагнитного ресурса, связанное с развитием радиосвязи и различных систем передачи и дистанционной обработки информации, телевидения, мобильной связи, радиолокации и радионавигации, приводит к появлению дополнительного электромагнитного фона. В крупных городах складываются довольно сложные электромагнитные условия, в которых в роли источников электромагнитных полей радиочастотного диапазона выступают радиолокационные станции, радиоцентры телевидения, связи, вещания и другие источники. Также большую роль в этом вопросе играют бытовые электроприборы, электротранспорт и, конечно же, компьютеры. Все чаще сбои в работе электронного оборудования стали происходить из-за наведенных электромагнитных полей, оказывающих влияние и на качество связи.

Чтобы избежать подобных проблем, среду, в которую не должно попасть поле, с помощью металлической оболочки изолируют от среды, где присутствует поле. Когда нужно устранить воздействие излучения источника переменного электромагнитного поля на находящиеся рядом устройства, данный источник окружают такой металлической оболочкой. Эти оболочки называют электромагнитными экранами. Экранирование — это физический процесс, который связан с распространением в средах с различными электрофизическими свой-

ствами электромагнитных полей источников излучения. Этот процесс характеризуется рассеянием, преломлением, отражением и поглощением энергии электромагнитных полей. При проектировании экранирующих систем применяют теорию поля, при этом вводят понятия «эффективность экранирования» и «коэффициент экранирования», которые в дальнейшем используют в качестве основного критерия выбора экранирующих материалов и конструкции экранов. Токи, наведенные в толще стенок экрана, и магнитное поле, возбужденное этими токами, определяют экранирующее действие экрана, сделанного из немагнитного материала, в переменном электромагнитном поле. Неудивительным является тот факт, что при увеличении частоты и толщины стенок экрана экранирующее воздействие возрастает.

Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов объясняется постоянной потребностью в данных материалах при разработке и усовершенствовании конструкций радиоэлектронных устройств, устройств защиты информации и военной техники.

Экранирование является одним из основных способов достижения стойкости электронных систем к воздействию электромагнитной помехи. Под помехой понимают внутреннее или внешнее воздействие, в результате которого происходит искажение информации во время ее обработки, преобразования, сохранения или передачи. В электронных системах информационные сигналы имеют электрическую природу — при конструировании следует брать в расчет помехи той же природы.

Цели и задачи работы:

- обзор способов защиты радиоэлектронной аппаратуры от помех;
- обзор существующих электромагнитных экранов;
- анализ эффективности экранов различной формы;
- обзор материалов, используемых для экранирования.

Защита радиоэлектронной аппаратуры от помех. При компоновке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) нужно осуществлять электромагнитную совместимость элементов, в частности, защиту от электромагнитных, электрических и магнитных помех. Источники помех радиоэлектронных устройств могут быть внешними и внутренними. Внешние помехи возникают от радиопередающих устройств, щеточных двигателей, сварочных аппаратов, грозовых разрядов и автомобилей. Из-за нестабильности напряжения и частоты возникают помехи от сети электропитания; импульсные помехи появляются при включении оборудования из-за перегрузки в сети и пусковых токов. Наличие паразитных связей, не предусмотренных конструкцией, и помех рассогласования параметров линии передачи сигнала с входными-выходными цепями электронных схем обуславливает наличие внутренних помех.

Источниками электрических помех являются шины распределения энергии, блоки электропитания, статические потенциалы, возникающие при трении. Трансформаторы и дроссели системы электропитания являются источниками

магнитных помех. Системы распределения электропитания при наличии пульсации выходного напряжения можно рассматривать как источник электромагнитной энергии. Излучающими энергию источниками являются синхронизирующие схемы и цепи, подводящие высокочастотные сигналы во все узлы цифровой вычислительной аппаратуры [1].

При защите РЭА от воздействия помех выполняют следующие действия:

1) выделяют источники и приемники помех, определяют максимальное значение сигналов помехи на входах схем;

2) размещают элементы схем, как следует продумывают расположение монтажных проводов (увеличивают зазоры между проводниками, уменьшают петли связи, укорачивают пути длины совместного прохождения проводников и т. д.);

3) вводя фильтры на линиях входа-выхода, усложняют схему, используют радиочастотные фильтры для устранения помехи по линиям электропитания;

4) у чувствительных схем экранируют входные цепи;

5) для элементов РЭА разрабатывают кожухи-экраны.

Мероприятия по второму пункту не приводят к увеличению стоимости разрабатываемой аппаратуры. Мероприятия по пунктам с третьего по пятый удорожают аппаратуру, но в некоторых случаях их выполнение оказывается необходимым [2].

Для локализации в замкнутом объеме пространства электрического поля применяют экраны. Экранируемое изделие влияет на конструктивную форму экрана, который выполняют, как правило, в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы. Эффективность экранирования электромагнитного поля прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов выражается следующим примерным соотношением:

$$\mathcal{E}_s^n = \mathcal{E}_s^n + 3,6 \text{ дБ} = \mathcal{E}_s^c + 9,6 \text{ дБ},$$

где \mathcal{E}_s^n — эффективность экранирования электромагнитного поля прямоугольного экрана; \mathcal{E}_s^n — эффективность экранирования электромагнитного поля цилиндрического экрана; \mathcal{E}_s^c — эффективность экранирования электромагнитного поля сферического экрана.

Указанные три принципиальные конструктивные разновидности экранов по эффекту экранирования можно выстроить в следующем порядке: прямоугольный, цилиндрический и сферический. Это соотношение справедливо для экранов, изготовленных из одинакового металла и со стенками равной толщины, при этом диаметр сферического или цилиндрического экрана равен расстоянию между параллельными пластинами прямоугольного экрана. Лучшее соотношение волновых сопротивлений пространства и экрана имеет плоская волна, вследствие чего возникает большее отражение волны. Данное обстоятельство обуславливает преимущество цилиндрического экрана по сравнению со сферическим и, в свою очередь, прямоугольного по сравнению с обеими этими конструкциями [3].

Конструктивная форма экрана имеет относительно небольшое влияние на его экранирующие характеристики. Основное воздействие оказывают: толщина стенки, материал, из которого изготовлен экран, и размеры экрана. Малое влияние формы экрана дает возможность при конструировании, расчете и определении эффективности определенных экранов применять расчетные формулы экранирования прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов к экранам, по конструкции близким к ним. Например, можно заменить цилиндрическим экраном экран с прямоугольным сечением, если его стороны примерно равны. Эквивалентным сферическим экраном для расчета можно заменять экраны различной конфигурации, имеющие по трем координатам примерно равную протяженность. Обратная закономерность справедлива для магнитных экранов. В данном случае имеется следующая зависимость между эффективностью затухания прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов:

$$\mathcal{E}_s^c = \mathcal{E}_s^n + 3,6 \text{ дБ} = \mathcal{E}_s^п + 9,6 \text{ дБ},$$

где \mathcal{E}_s^c — эффективность экранирования электромагнитного поля сферического экрана; \mathcal{E}_s^n — эффективность экранирования электромагнитного поля цилиндрического экрана; $\mathcal{E}_s^п$ — эффективность экранирования электромагнитного поля прямоугольного экрана.

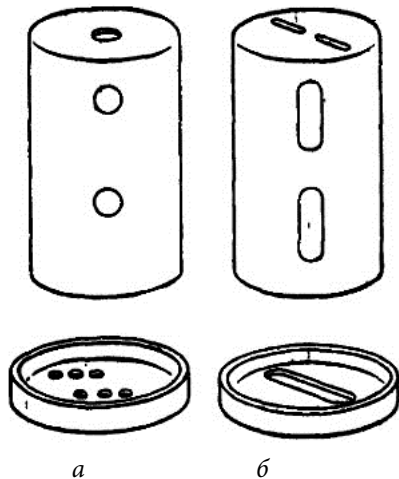


Рис. 1. Правильное (а) и неправильное (б) расположение отверстий в цилиндрическом экране

Из описанного выше следует, что на первом месте по экранирующему эффекту располагается сфера, потом цилиндр затем уже прямоугольный экран. Этому есть физическое объяснение. Действие магнитоэлектрических экранов происходит по принципу замыкания магнитного потока в магнитной массе экрана. Экранирующий эффект возрастает с уменьшением сопротивления экрана этому потоку. В сравнении с прямоугольным экраном более полно данному требованию соответствует конструкция в виде шара или цилиндра [4].

Довольно часто нужно продумывать отверстия в конструкциях экранов, например, для введения проводов, для доступа к регулируемым элементам экранируемых устройств, для обеспечения теплового режима и т. д. Отверстия в экранах надо располагать таким образом, чтобы они не могли мешать прохождению в толще экрана вихревых токов. На рис. 1, а показано правильное расположение отверстий в цилиндрическом экране, а на рис. 1, б — неправильное. Лучше не допускать большого числа отверстий, так же, как и боль-

ших их размеров. Недопустимо, чтобы разрезы и швы в магнитоэлектронных экранах шли поперек ожидаемого направления магнитных силовых линий [5].

Не последнюю роль для электростатических экранов играет хорошее заземление, обладающее небольшим сопротивлением заземляющего провода. Провод нужно брать как можно толще и короче. Экран имеет смысл заземлять в нескольких точках в случае экранирования электрических полей высокой частоты и наличия больших экранов [6].

При изготовлении внутренней полости экрана из-за технологических погрешностей и наличия под экраном сложной конфигурации экранируемых узлов может быть значительно искажена структура поля переотраженных волн. В случае размещения под экраном аппаратуры справедливо следующее неравенство для учета резонансных частот экрана:

$$\lambda_{\text{рез}} \cong \sqrt[3]{V_{\text{э}} - V_{\text{у}}},$$

где $V_{\text{э}}$ — объем экрана; $V_{\text{у}}$ — объем экранируемого устройства.

На резонансные частоты экрана можно влиять путем изменения его внутренних размеров, так что при конструировании экранов с учетом возможных резонансов в их внутренней полости нужно подбирать внутренние размеры полости таким образом, чтобы в спектре собственных длин волн экрана не оказывалась длина волны поля помехи (она должна быть больше самой длинной волны резонанса внутренней полости экрана), или брать внутренние размеры экрана экспериментальным путем, размещая их в маленьких пределах относительно первоначального выбранного значения для полного избавления от резонансов. Еще одним вариантом изменения резонансных частот экрана является подбор конфигурации его внутренней полости. Хорошего результата также можно добиться, применив рифленый материал для стенок вместе с нанесением поглотителя на внутреннюю поверхность металлического экрана, что способствует уменьшению коэффициента отражения от стенок экрана. Фильтрация электрических сетей управления, связи, сигнализации и электропитания, которые проходят через экран и вводятся в него, оказывает влияние на эффективность экранирования.

Внутри, а также вне экранов и аппаратуры располагают фильтры электрических цепей, проходящих через экранируемый объем или входящих в него. Фильтры не подвергают перестроению и переключению. Они должны удовлетворять следующим специфическим требованиям: довольно высокое затухание во всей полосе задерживания, занимающей достаточно широкий интервал радиочастотного диапазона, и малые потери в полосе пропускания; сохранение базовых технических характеристик в полосах пропускания и задерживания в условиях климатических и механических нагрузок; возможность эффективно работать при высоких уровнях мощности, больших напряжениях, сильных проходящих токах [7].

Виды защитных экранов и материалы для их изготовления. Максимально на работоспособность узлов РЭА влияет магнитная составляющая электромагнитного поля с индукцией B . После пересечения магнитного поля частотой f замкнутого контура площадью S в контуре возникает ЭДС U :

$$|U| = 2\pi fS|B|,$$

где U — ЭДС, возникающая в замкнутом контуре; f — частота магнитного поля; S — площадь замкнутого контура; B — индукция электромагнитного поля.

Найденное по последней формуле напряжение U для чувствительных элементов устройства оказывается напряжением помехи. В ходе анализа помехоустойчивости печатных узлов в роли чувствительных элементов, как правило, выступают микросхемы, в таком случае S — максимальная площадь замкнутого контура, образованного заземляющим и сигнальным проводниками. Если $|U| \geq U_n$ и не представляется возможным уменьшить площадь контура S , то в таком случае нужно ввести электромагнитный экран, эффективность которого:

$$\mathcal{E}_n = 20 \cdot \lg \left(\frac{U}{U_n} \right); \quad (2.2)$$

где \mathcal{E}_n — эффективность электромагнитного экрана; U — ЭДС, возникающая в замкнутом контуре; U_n — напряжение помехи.

Главной функцией экрана является ослабление напряженности электрического (E) или магнитного (H) полей. По назначению различают экраны внешнего электрического поля, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к помехам узлы, и экраны с внутренними источниками помехи [8].

Классификация электромагнитных экранов по трем признакам: типу поля помехи, конструктивной форме, материалу и конструкции стенок экрана показана на рис. 2.



Рис. 2. Классификация электромагнитных экранов

Проанализировав экранируемое изделие, определяем конструктивную форму экрана в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы (рис. 3). Главным образом форма экрана воздействует на характеристическое сопротивление среды возле него и, получается, на эффективность экранирования. Помимо этого, резонансные свойства экрана также зависят от его формы, т. е. влияние выражено в значении частоты, на которой происходит резкое возрастание магнитного или электрического поля внутри экрана [9].

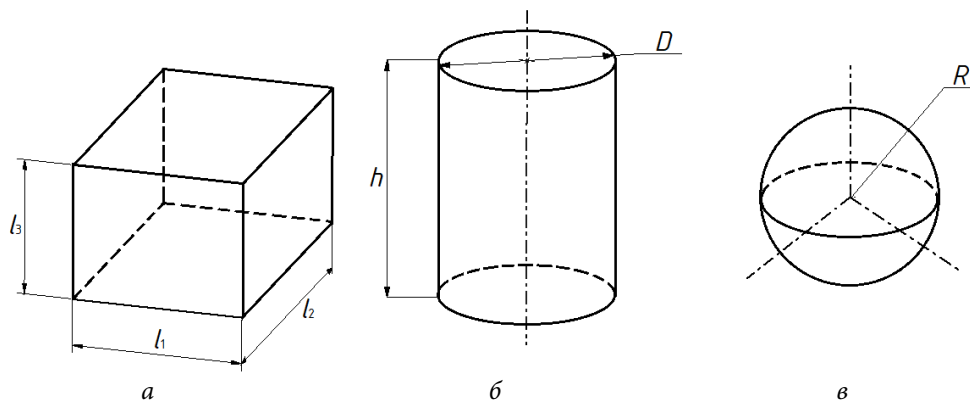


Рис. 3. Конструктивные формы экранов:

a — прямоугольной формы; b — цилиндрической формы; v — сферической формы

В случае экранирования на высоких частотах необходимо выбирать материалы с высокой проводимостью, а на низких частотах — материалы с высокой проницаемостью [10].

Для экранирования постоянного магнитного поля используются магнитомягкие материалы:

- пермаллой;
- альсифер;
- технически чистое железо;
- трансформаторная сталь;
- электротехническая сталь.

Для экранирования высокочастотного электромагнитного поля используются материалы с высокой проводимостью:

- серебро;
- медь;
- алюминий;
- латунь;
- электротехническая сталь.

Эффективность экранирования в наибольшей степени зависит от материала стенок экрана. Для экранирования магнитного поля в основном используют пермаллой с начальной проницаемостью $10 \cdot 10^3 \dots 100 \cdot 10^3$, далее по убывающей, альсифер — 35 000, железо чистое — 10 000, трансформаторная сталь —

250...1000, конструкционная сталь — 50 и другие магнитомягкие материалы. При экранировании высокочастотных электромагнитных полей предпочтительны материалы с высокой проводимостью: серебро — $62 \cdot 10^6$ См/м; медь — $58 \cdot 10^6$ См/м, алюминий — $37 \cdot 10^6$ См/м, латунь — $12,5 \cdot 10^6$ См/м, сталь — $7,6 \cdot 10^6$ См/м. Кроме того, металлы и сплавы с высокой проводимостью, за исключением стали, не годятся для экранирования постоянных магнитных полей, потому что имеют магнитную проницаемость равную единице (как у воздуха). Чтобы осуществлять эффективное экранирование в широком диапазоне частот лучше использовать многослойные материалы, например, сталь с нанесенным слоем из хорошо проводящего металла. Такие листы хорошо подходят для изготовления безэховых камер. Для еще большего увеличения коэффициента экранирования можно применить комбинированные многослойные материалы.

Для электромагнитного экранирования применяют тонколистовые и фольгированные материалы толщиной 0,01...0,05 мм. Активно используются сеточные экраны. Это обусловлено легкостью металлических сеток и простотой изготовления сеточных экранов, которые удобны в сборке и эксплуатации, светопроницаемы, не препятствуют свободным конвективным потокам воздуха и делают возможным получение довольно высокой эффективности во всем диапазоне радиочастот. К сожалению, сеточные экраны обладают невысокой механической прочностью. Главным проявлением экранирующих свойств металлических сеток является отражение электромагнитной волны от их поверхности. Параметрами, определяющими экранирующие свойства сетки, являются: шаг сетки S_c , радиус проволоки r_n и удельная проводимость материала сетки.

Заключение. Актуальность разработки высокоэффективных широкополосных технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов объясняется постоянной потребностью в данных материалах при разработке и усовершенствовании конструкций радиоэлектронных устройств, устройств защиты информации и военной техники. Одним из способов достижения стойкости электронных систем к воздействию электромагнитной помехи, устранению или ослаблению паразитных связей между источником и приемником наводок является экранирование.

Литература

- [1] Парфенов Е.М., Камышная Э.Н., Усачев В.П. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. М., Радио и связь, 1989.
- [2] Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. М., Интеллект, 2010.
- [3] Усачев В.П., Григорьев В.П., Костиков В.Г. Исследование электромагнитных экранов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.
- [4] Волин М.Л. Паразитные связи и наводки. М., Советское радио, 1965.
- [5] Шахнов В.А., ред. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [6] Камышная Э.Н., Усачев В.П. Расчет экранирования в ЭВА и РЭА. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1986.

- [7] Нестеров Ю.И., Власов А.И., Першин Б.Н. Виртуальный измерительный комплекс. *Датчики и системы*, 2000, № 4, с. 12–22.
- [8] Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. М., Советское радио, 1979.
- [9] Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.А. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [10] Ивко А.М. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры, как метод обеспечения электромагнитной совместимости. *test-expert.ru: веб-сайт*. URL:
- [11] <http://www.test-expert.ru/news/detail.php?ID=915> (дата обращения: 18.03.2019).

Карпов Иван Николаевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Соловьев Владимир Анатольевич, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT SHIELDING

I.N. Karpov

os186@yandex.ru

SPIN-code: 4000-5610

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to one of the main ways to achieve the resistance of electronic systems to the effects of electromagnetic interference — shielding. The conditions for the occurrence of electromagnetic interference, the reasons for the need of interference suppression, and mitigation measures are considered. The factors affecting the effectiveness of various screens in certain conditions are highlighted. The classification of electromagnetic screens according to three factors is given. The article contains recommendations on the location of the holes in the shields, for example, to provide thermal conditions, to access to the adjustable elements of shielded devices, to connect wires, and also on the use of materials for the implementation of electromagnetic shielding with high efficiency.

Keywords

Radio electronic equipment, shielding, protective shields, electromagnetic field, shielding materials, electromagnetic compatibility, interference, shielding efficiency

Received 29.03.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Parfenov E.M., Kamyshnaya E.N., Usachev V.P. Proektirovanie konstruktsiy radioelektronnoy apparatury [Structural design of radio-electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989 (in Russ.).
- [2] Shapiro D.N. Elektromagnitnoe ekranirovanie [Electromagnetic screening]. Moscow, Intellect Publ., 2010 (in Russ.).
- [3] Usachev V.P., Grigor'yev V.P., Kostikov V.G. Issledovanie elektromagnitnykh ekranov [Study on electromagnetic screens]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1998 (in Russ.).
- [4] Volin M.L. Parazitnye svyazi i navodki [Parasitic coupling and cross talk]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965 (in Russ.).
- [5] Shakhnov V.A., ed. Konstruktorsko-tehnologicheskoe proektirovanie elektronnykh sredstv [Design and engineering of electronic devices]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005 (in Russ.).
- [6] Kamyshnaya E.N., Usachev V.P. Raschet ekranirovaniya v EVA i REA [Screening calculation in computer and radioelectronic equipment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1986 (in Russ.).
- [7] Nesterov Yu.I., Vlasov A.I., Pershin B.N. Virtual measurement system. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2000, no. 4, pp. 12–22 (in Russ.).
- [8] Polonskiy N.B. Konstruirovaniye elektromagnitnykh ekranov dlya radioelektronnoy apparatury [Design of electromagnetic screens for radio-electronic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979 (in Russ.).
- [9] Kamyshnaya E.N., Markelov V.V., Solov'yev V.A. Konstruktorsko-tehnologicheskies raschety elektronnoy apparatury [Design and engineering calculation of electronic equipment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014 (in Russ.).

- [10] Ivko A.M. Ekranirovanie radioelektronnoy apparatury, kak metod obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti [Shielding of radio-electronic equipment as a way to provide electromagnetic compatibility]. *test-expert.ru: website*. URL: <http://www.test-expert.ru/news/detail.php?ID=915> (accessed: 18.03.2019).

Karpov I.N. — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Soloviev V.A., Assoc. Prof., Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.