

**Н. М. БОБКОВ**

**Лекции по общему конструированию РЭС**

**Раздел 5 Принципы и методы проектирования**

**Лекция 5.5 ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

### **1 Сокращения**

ЕСКД – Единая система конструкторской документации

КД – конструкторская документация

РЛС – радиолокационная станция

РЭС – радиоэлектронное средство

ТЗ<sub>окр</sub> – техническое задание на опытно-конструкторскую работу

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭДС – электродвижущая сила

ЭРИ – изделие электронной техники, квантовой электроники или электротехническое (электрорадиоизделие)

*T*-система – техническая система

### **2 Общие понятия**

В РЭС электрические сигналы кроме предусмотренных в КД путей передачи имеют и посторонние (не требующиеся по условиям работы) пути. Поэтому между элементами РЭС возникают так называемые паразитные связи, по которым распространяются помехи.

***D1* электромагнитная помеха;** помеха: Электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования *t*-системы [1].

Помехи различают по происхождению, структуре, спектральным и временным характеристикам. Естественные

помехи вызваны электромагнитными процессами, существующими в природе и не связанными непосредственно с деятельностью человека. Искусственные помехи вызваны деятельностью человека и обусловлены различными электромагнитными процессами в технике. Искусственные помехи могут быть непреднамеренными и преднамеренными. Первые создаются источниками искусственного происхождения, которые не предназначены для нарушения функционирования каких либо РЭС. Вторые создаются специально для нарушения функционирования РЭС, например, военного соперника.

**D2 источник помехи:** Источник искусственного или естественного происхождения, которые создают или могут создать электромагнитную помеху [1] (рисунок 1).

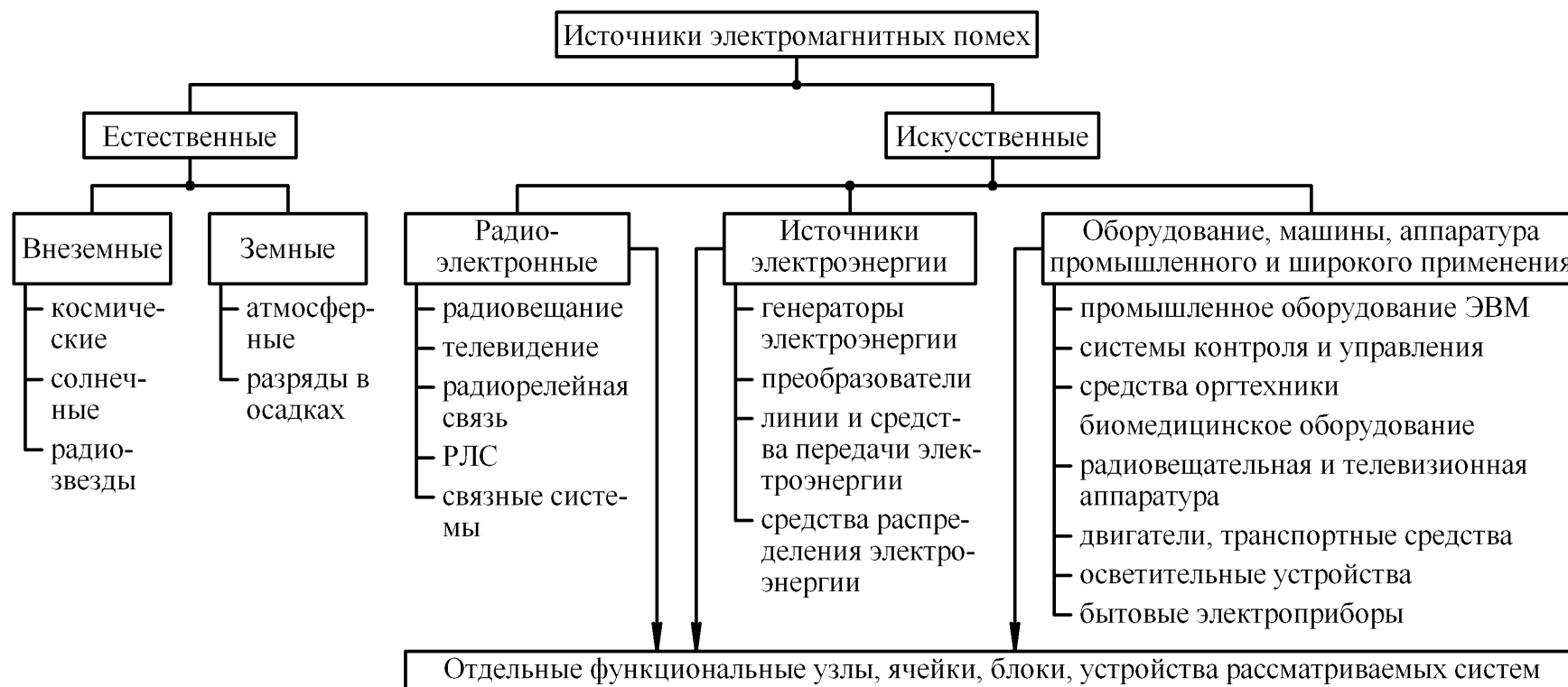


Рисунок 1 – Классификация источников электромагнитных помех [2]

**D3 рецептор:** Объект, на который воздействует помеха [1] (рисунок 2).



Рисунок 2 – Классификация рецепторов электромагнитных помех [2]

Связь источника помехи с рецептором может осуществляться гальваническим путем (непосредственным электрическим контактом между источником и рецептором, по шасси и корпусу, по общим проводникам) или через электрические, магнитные и электромагнитные поля.

Для нормального функционирования РЭС необходимо, чтобы уровень полезного сигнала превышал уровень сигнала помехи. Уменьшение влияния помех осуществляется или подавлением помех в источниках помех, или защитой рецепторов от существующих помех.

Первую задачу должны решать конструкторы  $t$ -систем, которые могут стать источниками электромагнитных помех. Требования к уровню излучаемых  $t$ -системой помех могут устанавливаться в ТЗ<sub>ОКР</sub> на разработку этой  $t$ -системы.

Вторую задачу приходится решать конструкторам, создающим  $t$ -системы, на качество функционирования которых влияют помехи.

Снижение уровня помех может достигаться следующими методами: рациональной компоновкой, фильтрацией, заземлением, компенсацией и экранированием [2].

**D4 экранирование (электромагнитное):** Способ ослабления электромагнитной помехи с помощью экрана с высокой электрической и (или) магнитной проводимостью [1].

Экранирование является средством локализации электромагнитного поля помех в пределах определенного пространства. Оно может применяться как для отдельных элементов или подсистем РЭС, так и для РЭС в целом.

**D5 эффективность экранирования:** Отношение действующих значений напряженности электрического поля  $E_1$  (магнитного поля  $H_1$ ) в данной точке при отсутствии экрана к напряженности электрического поля  $E_2$  (магнитного поля  $H_2$ ) в той же точке при наличии экрана [3]:

$$\mathfrak{E}_{0E} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \mathfrak{E}_{0H} = \frac{H_1}{H_2}. \quad (1)$$

В формулах (1) эффективность выражается в относительных единицах (разах). На практике эффективность экранирования часто представляют в логарифмических единицах – децибелах (дБ):

$$\mathfrak{E}_E = 20 \lg \mathfrak{E}_{0E} = 20 \lg \frac{E_1}{E_2}, \quad \mathfrak{E}_H = 20 \lg \mathfrak{E}_{0H} = 20 \lg \frac{H_1}{H_2}. \quad (2)$$

Эффективность экранирования не зависит от того, где расположено помехонесущее поле – внутри или вне экрана [2].

В некоторых работах действие экрана учитывают коэффициентом экранирования

$$S = \frac{E_2}{E_1}. \quad (3)$$

Коэффициент экранирования изменяется от 1 до 0, характеризуя в последнем случае максимальный эффект экранирования.

### **3 Принципы экранирования**

Вокруг любого проводника с электрическим током образуются электрическое и магнитное поля. Проводник с переменным током образует переменное электромагнитное поле. Если преобладает электрическая составляющая, то поле считают электрическим; если преобладает магнитная составляющая, то поле считают магнитным. По принципу действия различают электростатическое, магнитостатическое и электромагнитное экранирование.

#### **3.1 Электростатические экраны**

Электростатические экраны используются для экранирования электрического поля. Принцип их действия заключается в замыкании электрического поля на корпус («землю») РЭС. Если, между элементом А, создающим электрическое поле, и элементом Б, для которого влияние этого поля оказывается вредным (рисунок 3, *а*), поместить металлический лист В, соединенный с «землей», то он будет перехватывать электрические силовые линии, защищая тем самым элемент Б от вредного влияния элемента А (рисунок 3, *б*).

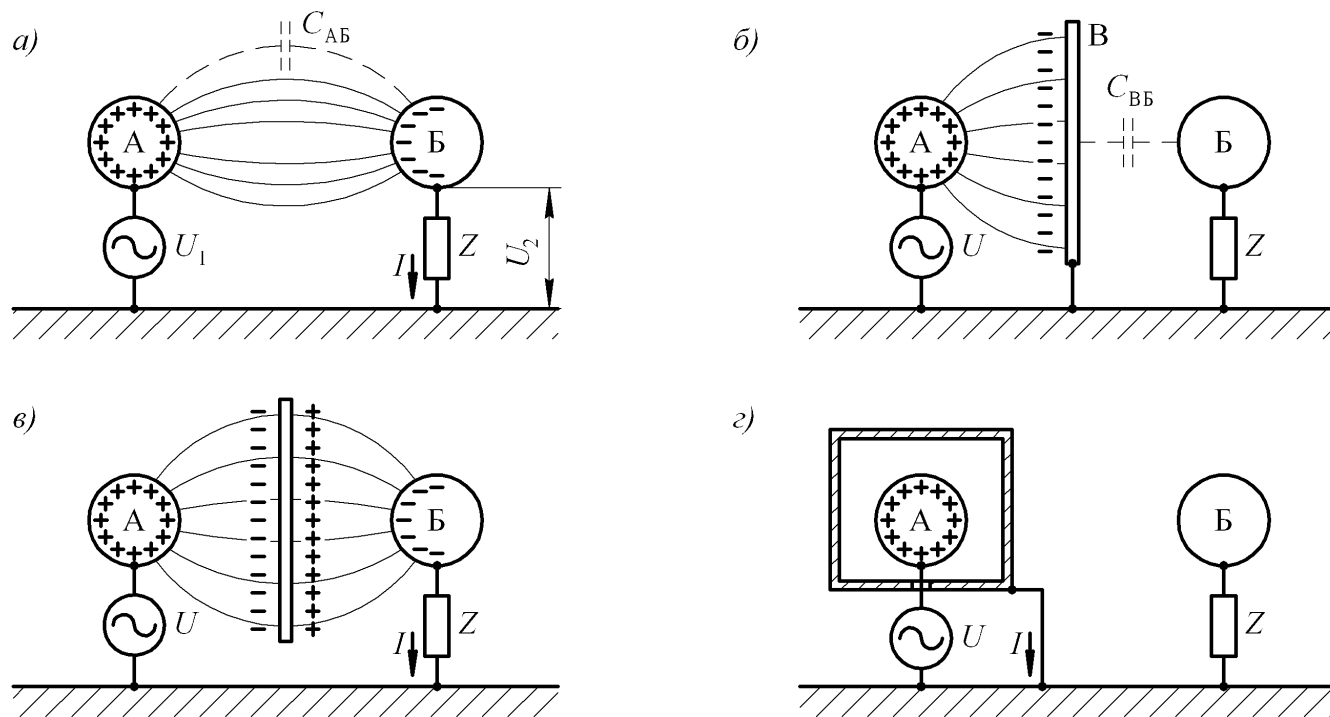


Рисунок 3 – Электростатическое экранирование:

*a* – электрическое поле между элементами А и Б без экрана; *б* – электрическое поле, когда между элементами А и Б помещен экран – заземленный металлический лист В; *в* – электрическое поле, когда между элементами А и Б помещен незаземленный металлический лист В; *г* – экранирование замкнутым экраном

Если металлический лист В не соединить с «землей» (рисунок 3, *в*), то все силовые линии электрического поля, созданные элементом А и заканчивающиеся на левой стороне листа В, будут индуцировать на этой стороне листа отрицательные заряды, на правой стороне листа будут индуцироваться положительные заряды, которые в свою очередь создадут силовые линии, оканчивающиеся на поверхности элемента Б, индуцируя на нем отрицательные заряды. При этом связь между элементами А и Б может оказаться еще более сильной, чем это было без экрана [4].

Для максимального устранения паразитной связи между элементами А и Б необходимо выполнение следующих условий:

экран должен полностью охватывать экранируемый элемент схемы А; необходимые отверстия в экране должны быть минимально возможного размера (рисунок 3, з);

материал экрана должен обладать по возможности большой электрической проводимостью, а его соединение с землей должно представлять минимальное сопротивление току с частотой помехи.

### 3.2 Магнитоэкранные экраны

Принцип действия магнитоэкранных экранов показан на рисунке 4, а. Магнитные силовые линии внешнего поля будут проходить в основном по толще стенок экрана, выполненного из ферромагнитного материала и обладающего малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением пространства внутри экрана, где находится катушка индуктивности. В результате внешнее магнитное поле помех не будет влиять на режим работы электрической цепи, в которую включена катушка индуктивности.

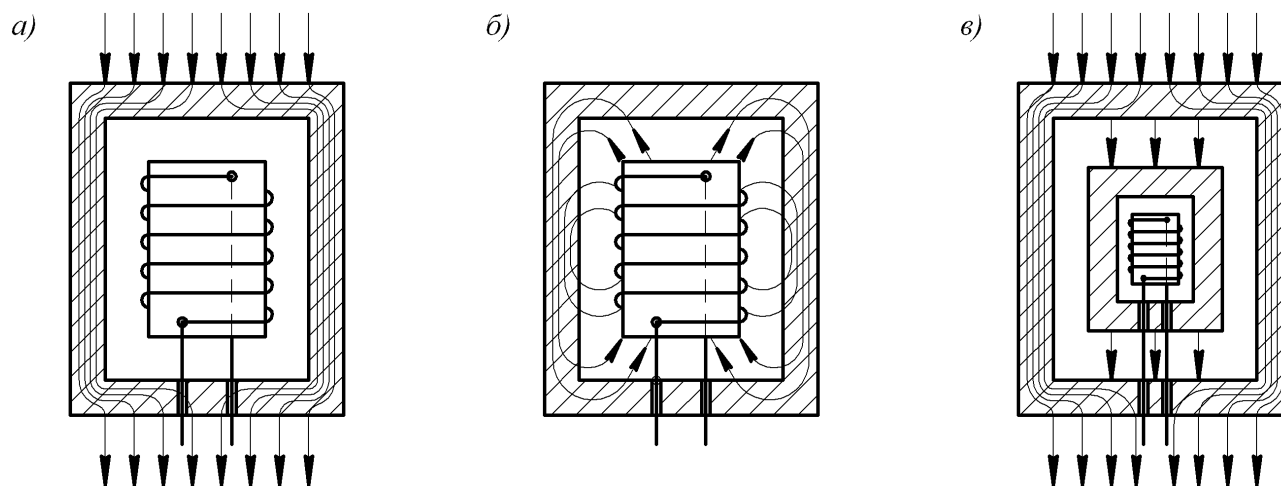


Рисунок 4 – Магнитоэкранные экраны:

а – защита устройства от внешнего поля; б – экранирование поля, создаваемого устройством; в – двойной экран

Задача предохранения внешних электрических цепей от воздействия магнитного поля, создаваемого током катушки индуктивности, решается, как показано на рисунке 4, б. Почти все силовые линии поля катушки индуктивности будут замыкаться через толщину стенок экрана, не выходя за их пределы вследствие того, магнитное сопротивление экрана намного меньше сопротивления окружающего пространства.

Эффективность экранирования цилиндрического магнитного экрана  $\mathcal{E}_{0M}^u$ , когда  $d/r \ll 2$  [3]

$$\mathcal{E}_{0M}^u = 0,5\mu \frac{d}{r}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – начальная магнитная проницаемость материала экрана;

$d$  – толщина цилиндрической стенки экрана;

$r$  – наружный радиус цилиндра экрана (рисунок 5, а)

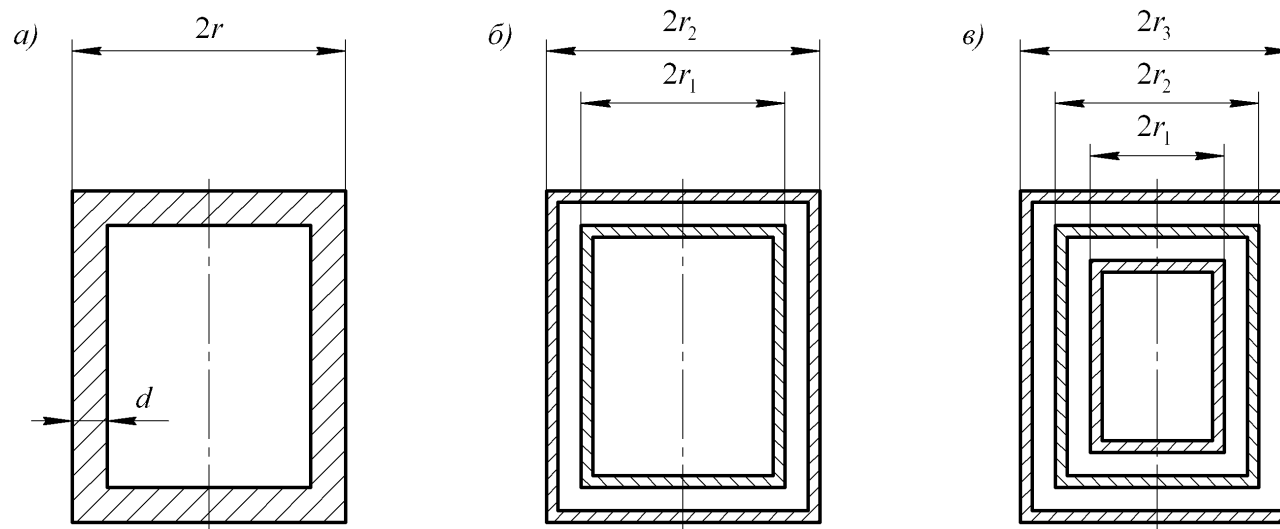


Рисунок 5 – К расчету однослойного (а), двухслойного (б) и трехслойного (в) экранов



Для повышения эффективности экранирования в ряде случаев применяют многоступенчатые магнитоэлектронные экраны, составленные из нескольких слоев, но более тонкого материала. Требуемая эффективность экранирования может быть получена уже у двух- или трехслойного экрана. Простейший из многослойных экранов – двухслойный – должен быть сконструирован так, чтобы обеспечить замыкание в наружной оболочке тех силовых линий поля, которые выйдут за толщину стенок первого внутреннего слоя. Для этой цели должны быть правильно выбраны как толщина стенок оболочек, так и расстояние между ними.

$$\text{Для двухслойного экрана } \mathcal{E}_{0m} = \mathcal{E}_{0m1} \mathcal{E}_{0m2} \left( 1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right), \quad (5)$$

$$\text{для трехслойного экрана } \mathcal{E}_{0m} = \mathcal{E}_{0m1} \mathcal{E}_{0m2} \mathcal{E}_{0m3} \left( 1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right) [5]. \quad (6)$$

Основные требования, предъявляемые к магнитоэлектронным экранам:

магнитоэлектронный экран целесообразно использовать только при постоянном поле и в диапазоне низких частот; для повышения эффективности экранирования экраны следует изготавливать из магнитомягких материалов с возможно более высокой начальной магнитной проницаемостью;

следует избегать в экранах стыков и швов с большим магнитным сопротивлением на пути магнитных силовых линий поля помех;

не допускается крепление экранируемого элемента и оболочек экрана стальными деталями, которые образуют пути с малыми магнитными сопротивлениями для магнитных силовых линий помехи;

расстояние между магнитным экраном и другими магнитопроводами различных цепей должно быть по возможности наибольшим с тем, чтобы магнитное сопротивление внешней среды было большим по сравнению с магнитным сопротивлением экрана;

повышать эффективность экрана не увеличением толщины материала, а применением нескольких тонких экранов, расположенных на возможно большем расстоянии друг от друга.

### 3.3 Электромагнитное экранирование

Принцип действия электромагнитного экранирования иллюстрируется на рисунке 6. Если на пути равномерного переменного магнитного поля (рисунок 6, *а*) поместить медный цилиндр (экран), то в нем возбуждятся переменные ЭДС, которые, в свою очередь, создадут переменные индукционные вихревые токи. Магнитное поле этих токов будет замкнутым (рисунок 6, *б*); внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле (рисунок 6, *в*) оказывается ослабленным у цилиндра и усиленным вне его, т. е. происходит вытеснение поля из пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие.

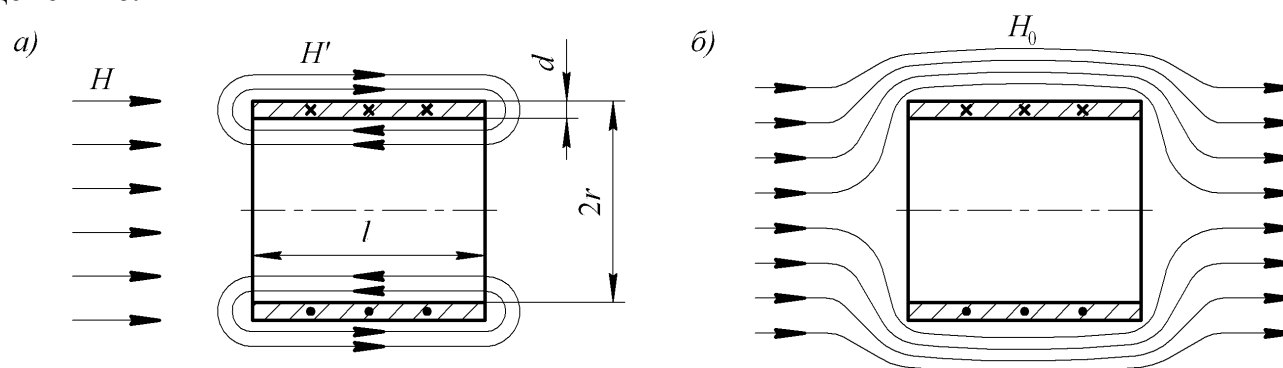


Рисунок 6 – Электромагнитное экранирование:

*а* – равномерное переменное магнитное поле; *б* – медный цилиндр (экран); *в* – результирующее поле

Из описанного принципа действия электромагнитного экранирования видно, что его эффективность увеличивается с увеличением обратного поля, которое будет тем больше, чем больше протекающие по цилиндру токи.

Поскольку вихревые токи распределяются неравномерно по толщине стенок экрана, глубина проникновения тока в стенку экрана уменьшается с увеличением частоты. При этом увеличивается ток в поверхностных слоях, что увеличивает создаваемое им магнитное поле, вытесняющее из пространства, занимаемого экраном, внешнее (мешающее) поле.

При магнитостатическом и электромагнитном экранировании часть энергии теряется в экране. Поэтому при разработке подобных экранов его материал и размеры выбирают исходя из допустимых потерь, которые он вносит в экранируемую цепь.

Электростатическое экранирование не вызывает появления в экране токов сколько-нибудь значительной величины. Поэтому для такого экрана параметры материала не имеют существенного значения. Его эффективность определяется почти полностью наличием короткого замыкания между экраном и корпусом (землей) устройства. Поэтому надежно соединенные с «землей» магнитостатические или электромагнитные экраны будут хорошо выполнять и функции электростатических экранов.

Эффект электромагнитного экранирования для заданной частоты прямо пропорционален магнитной проницаемости материала экрана и обратно пропорционален его удельному сопротивлению. Многообразие и случайный характер факторов, определяющих эффективность электромагнитного экранирования, существенно затрудняет расчеты экранов. Опыт проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации устройств и систем экранирования показывает, что в среднем эффективность экранирования аппаратуры и объектов может быть достигнута на уровне данных приведенных в таблице 1 [3]. Общая эффективность экранирования определяется самым низким значением эффективности экранирования одного из узлов экрана.

Таблица 1 – Эффективность экранирования устройств замкнутых электромагнитных экранов, дБ

Материал, устройство и конструкция экрана	Диапазон частот, МГц				
	От 0,15 до 3	От 3 до 30	От 30 до 300	От 300 до 3000	От 3000 до 10 <sup>4</sup>
Сталь листовая:					
сварка непрерывным швом	100	100	100	100	100
сварка точечная, шаг 50 мм	70	50	–	–	–
соединение болтами, шаг 50 мм	75	60	–	–	–
Жесть (фальцем)					
непрерывная пайка	100	100	100	100	100
точечная пайка, шаг 50 мм	100	80	60	50	40
без пайки	100	80	60	50	40
Сетка металлическая: пайка, ячейка 1 ... 1,5 мм	80	60	50	40	25

### Список использованных источников

1 ГОСТ 30372 – 95/ГОСТ Р 50397 – 92 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.

2 Конструирование экранов и СВЧ-устройств: учебник для вузов/под ред. А. М. Чернушенко. М., 1990.

3 Полонский Н. Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. М., 1979.

4 Рогинский В. Ю. Экранирование в радиоустановках. Л., 1969.

5 Аполлонский С. М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л., 1988.

**Николай Михайлович Бобков** – преподаватель Нижегородского радиотехнического колледжа, конструктор Нижегородского научно-производственного объединения имени М. В. Фрунзе.

E-mail: [n.bobkov@mail.ru](mailto:n.bobkov@mail.ru)