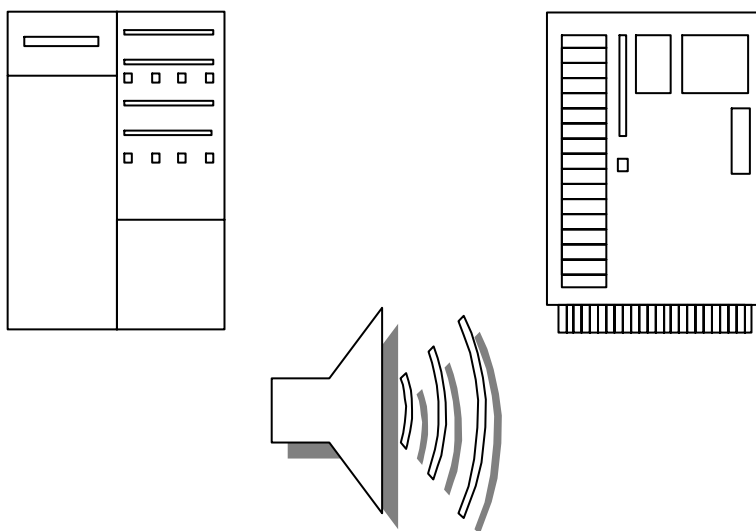


# ЭКРАНИРОВАНИЕ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 621.396.6  
ББК ←844-04я73  
К625

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ТГТУ  
**П.С. Беляев**

Составители:

**Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов**

К625 Экранирование в конструкциях РЭС : метод. указ. / сост. :  
Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн.  
ун-та, 2007. – 16 с. – 100 экз.

Даны рекомендации по экранированию в конструкциях РЭС, порядок выполнения лабораторной работы по курсам "Конструирование радиоэлектронных средств", "Конструирование и технология РЭС", контрольные вопросы и рекомендуемая литература.

Предназначены для студентов специальностей 210201, 210303 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.6  
ББК ←844-04я73

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный  
технический университет" (ТГТУ), 2007

# Экранирование в конструкциях РЭС

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов 4 и 5 курсов специальностей 210201, 210303  
дневной и заочной форм обучения по курсам  
"Конструирование радиоэлектронных средств" и  
"Конструирование и технология РЭС"



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2007

*Учебное издание*

**Экранирование в конструкциях РЭС**

Методические указания

С о с т а в и т е л и:

КОЛЬТЮКОВ Николай Александрович,  
БЕЛОУСОВ Олег Андреевич

Редактор Т.М. Г л и н к и н а

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Р ы ж к о в а

Подписано к печати 24.05.2007

Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 374

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС

**Ц е л ь:** научить студентов путем анализа блока радиоэлектронного средства (РЭС), назначения устройства, основных технических характеристик и условий эксплуатации получать необходимые данные для расчета эффективности экранирования и рассчитывать эффективность для материалов, применяемых в конструкциях РЭС.

**И с х о д н ы е д а н н ы е:** в качестве исходного задания выдаются структурная схема блока РЭС с описанием принципа ее действия, назначения средства и эксплуатационными условиями, сборочный чертеж или несущая конструкция блока, а также материал, из которого выполняется экран.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Рассмотреть структурную схему блока. Ознакомиться с его техническими характеристиками и сборочным чертежом. В отчете записать название работы, привести ее цель и обозначение исследуемого блока, кратко сформулировать его назначение и основные характеристики, условия эксплуатации.
2. Определить необходимые модули, требующие экранирования.
3. Выбрать два металла в качестве экрана.
4. Для этих двух экранов при толщине 0,4 мм и частоте электромагнитных волн (ЭМВ) от 10 кГц до 3 МГц (взять 10 – 15 точек) рассчитать эффективность экранирования.
5. Результаты расчетов занести в отдельную табл. 1 для каждого экрана.

## 1. Результаты расчетов

Экран	$R$ , дБ	$A$ , дБ	$S$ , дБ	$f$ , кГц
-------	----------	----------	----------	-----------

6. Построить графики зависимостей  $S$  от  $f$ . Одним из методов одномерной оптимизации (например, дихотомии) выявить наименьшую эффективность.
7. Письменно проанализировать, основываясь на теории экранирования, почему и когда именно эффективность экранирования уменьшается
8. Для выбранных двух материалов при толщине от 0,1 до 2 мм с шагом 0,1 мм и частоте 30 Мгц рассчитать эффективность экранирования, результаты расчетов занести в табл. 2.

## 2. Эффективность экранирования

Экран	$S$ , дБ	$t$ , мм
-------	----------	----------

9. Построить графики зависимости эффективности экранирования от толщины экрана.
10. Проанализировать, почему у разных экранов  $S$  отличается.
11. Сделайте выводы о качестве экранирования выбранных материалов.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

При изучении электромагнитной совместимости (ЭМС) необходимо рассмотреть два понятия: *рецептор* и *источник помех*.

*Рецептор* – объект, который находится под воздействием электромагнитных помех. Внутри РЭС рецепторами выступают маломощные чувствительные элементы и узлы на их основе. Чем выше быстродействие микросхемы, тем чувствительней она как рецептор. Электронное устройство в целом является рецептором помех для внешних источников.

*Источники помех* разделяют на источники *естественного* и *искусственного* происхождения.

Основные источники естественного происхождения:

- различные природные явления (атмосферные шумы, грозовые разряды и пр.);
- электростатический разряд (ЭСР);
- мощный электромагнитный импульс (ЭМИ).

Источники электромагнитных помех искусственного происхождения:

- мощные передатчики – радиостанции, ТВ-станции, радиолокация, навигация и т.д.;
  - навигация аэропортов – военного и гражданского воздушного флота;
  - радиослужбы в условиях ограниченного объема – корабельные радиослужбы, ВМФ – на одном корабле несколько сот радиостанций;
  - ЛЭП и электропередача в зданиях;
  - мобильная связь.
- Внутри устройства источниками помех могут быть:
- изделия, содержащие индуктивности, трансформаторы, дроссели и т.д.;
  - генераторы, усилители и им подобные узлы большой мощности, выходные каскады устройств большой мощности;

• узлы, блоки и элементы, работающие в ключевом режиме – возникают новые спектральные составляющие, расширяющие спектр помех.

Возможны различные расстояния от источника до рецептора помех, начиная от сотен километров (грозовой разряд, мощный передатчик) и заканчивая долями метра, если рассматривать пространство внутри аппарата.

Рецептором может выступать практически любой элемент конструкции, начиная от корпуса изделия и заканчивая выводами микросхемы, которые обладают хотя бы минимальным антенным эффектом.

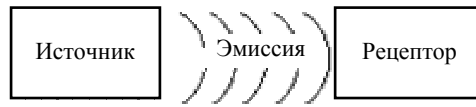


Рис. 1. Перенос электромагнитных волн от источника к рецептору

Рецепторы могут различаться по их чувствительности к воздействию различных полей. В наиболее общей модели имеется источник помех, рецептор и некоторый процесс – процесс переноса электромагнитных волн от источника к рецептору. Назовем этот процесс *эмиссией*.

Экранирование направлено на обеспечение ЭМС источника и рецептора помех. И что же такое ЭМС?

ЭМС – это способность аппаратуры функционировать согласно требованиям ТУ одновременно с другими устройствами в реальной электромагнитной обстановке и не создавать при этом недопустимых помех другим потенциальным рецепторам – устройствам, аппаратам и пр.

**Характеристики источников помех.** Все многообразие источников может быть сведено к двум основным типам.

1. Источники с высоким волновым сопротивлением. Для них эквивалентная схема или модель может быть представлена в виде штыря (антенна-штырь). В окрестностях этого штыря формируются относительно интенсивное электрическое поле (ЭП) и слабое магнитное поле (МП). Как мы помним,  $Z = U_n / I_n$ . Поскольку электрическое поле вызывает напряжение, а магнитное вызывает ток, получается, что большое ЭП и малое МП обеспечивают высокое волновое сопротивление  $Z (Z = E / H)$ .

2. Источники помех, модель которых может быть представлена в виде токовой петли. При этом возникает интенсивное магнитное поле и слабое электрическое. Эти источники имеют малое волновое сопротивление.

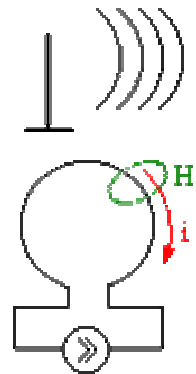


Рис. 2. Источники помех

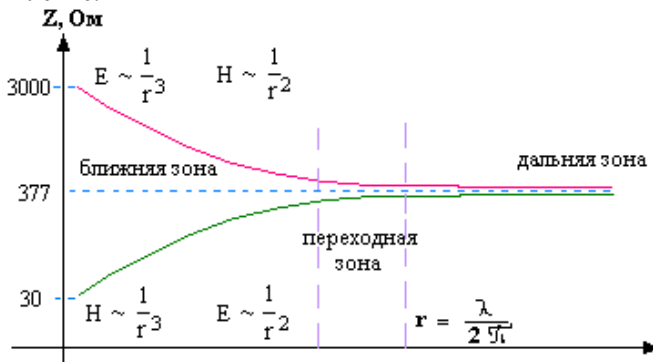


Рис. 3. Три зоны действия источников

Полученные относительные значения  $Z$  действительны для области, которая находится в непосредственной близости от излучателя. На значительных расстояниях основная составляющая поля – та, которая имеет большее значение, убывает быстрее дополнительной составляющей. И в конце концов волновое сопротивление  $Z$  становится равным 377 Ом, т.е. волновому сопротивлению свободного пространства.

Для первого типа источников основная составляющая – электрическая – убывает пропорционально  $1 / r^3$ . Дополнительная – магнитная – пропорционально  $1 / r^2$ . Для источников второго типа ситуация обратная. Магнитная составляющая убывает пропорционально  $1 / r^3$ , а электрическая – пропорционально  $1 / r^2$ .

Можно выделить три зоны действия источников.

1. Ближняя зона. Здесь преимущественно действует механизм индукции с достаточно четким разделением на магнитную и электрическую составляющие.
2. Переходная зона – зона формирования плоской электромагнитной волны.
3. Дальняя зона – зона действия плоской электромагнитной волны (Т-волны).

Таким образом, при анализе экранирования необходимо разделять задачи локализации электрического, магнитного и электромагнитного полей.

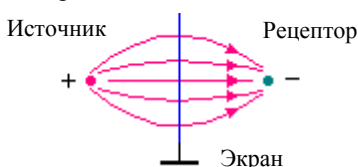


Рис. 4. Экранирование статического поля

**Электростатическое экранирование в ближней зоне.** Электрическое и магнитное поля рассматривают как квазистатические. Картины электрического и магнитного полей при соответствующих частотах и картины статических полей совпадают. Поэтому выводы, полученные для статического случая, пригодны для использования в определенном диапазоне частот. Итак, в ближней зоне проводим, по сути, экранирование статического поля. В ближней зоне действует закон электромагнитной индукции.

*Установка экрана.* Экран ставится как можно ближе к источнику. В конструкциях РЭС эта рекомендация может быть выполнена, когда источник находится в пределах уст-

ройства. Когда же источник находится вне пределов досягаемости или невозможно экранировать источник, экранируют ре-  
цептор.

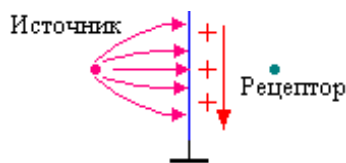


Рис. 5. Экранирование рецептора

**Обеспечение эффективной работы экрана.** Первым делом его необходимо заземлить! При заземленном экране происходит следующее: на экране индуцируются заряды, и за счет заземления заряды нейтрализуются. Получается, что экран является препятствием для силовых линий электрического поля.

**Требования к узлу заземления.** В первую очередь это минимальное сопротивление. Поэтому основные способы его выполнения – посредством пайки или сварки. Все другие виды соединения – заклепки, винты могут быть использованы только при гарантии долговременной надежности механического соединения и отсутствия коррозии в месте соединения. Например, при винтовом соединении экрана с узлом заземления возможно ослабление соединения, в контакте возникает полупроводниковый эффект и нелинейность этого контактного перехода способствует возникновению контактных помех. При отсутствии заземления экран может быть переизлучателем поля источника.

**Материал экрана.** Основное требование к экрану – максимальная проводимость. К толщине материала требований не предъявляется. Чаще всего используются медь, медные сплавы, алюминий.

**Конструкция экрана.** Экран не должен содержать щелей, стыков, мест стыка и тому подобных неоднородностей, ориентировка которых препятствует протеканию тока в цепях заземления (1). Если необходимо выполнить отверстия или жалюзи, например, для охлаждения, то они должны быть расположены вдоль линий токов (2).

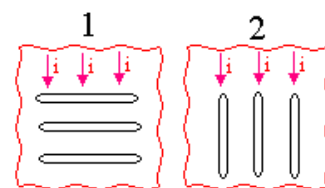


Рис. 6. Конструкция экрана

Электростатическое экранирование – самый простой способ экранирования аппаратуры.

Существенную проблему представляет выполнение экрана для аппаратуры в пластмассовых корпусах (например, мониторы компьютеров). Повышение эффективности экранирования в этом случае достигается:

- применением композиционных материалов (пластмасса с металлическим наполнителем);
- нанесением поверхностных слоев металла (напыление металлов, нанесение специальной проводящей краски, оклейка корпуса фольгой и т.п.).

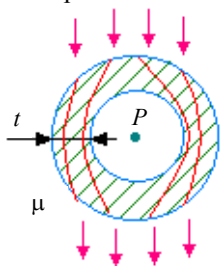


Рис. 7. Магнитостатический экран

**Магнитостатическое экранирование.** Механизм работы магнитостатического экрана заключается в шунтировании силовых линий магнитного поля.

Установка экрана производится по возможности вблизи источника.

Для обеспечения эффективной работы заземлять магнитный экран не надо. Эффективность экранирования прямо пропорциональна магнитной проницаемости  $\mu$  и толщине экрана  $t$ .

Следует применять материалы, имеющие максимальную магнитную проницаемость  $\mu$ . Это стали, различные пермаллои и соответствующие магнитные сплавы с высоким значением  $\mu$ .

Конструкция экрана такая же, как и конструкция для электростатического экранирования, но неоднородности не должны препятствовать силовым линиям магнитного поля.

Магнитное экранирование на низких частотах является самой сложной практической задачей. Оно существенно усложняет и утяжеляет конструкцию.

**Электромагнитное экранирование.** Рассмотрим работу экрана при падении на него плоской электромагнитной волны.

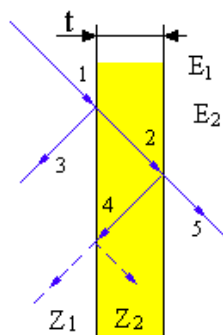


Рис. 8. Экран при падении на него плоской электромагнитной волны:

- 1 – падающая ЭМВ; 2 – проходящая ЭМВ; 3 – отраженная ЭМВ;
- 4 – снова отраженная ЭМВ; 5 – прошедшая ЭМВ;
- $E_1$  – напряженность поля без учета экрана;
- $E_2$  – напряженность поля с учетом экрана;  $E_1 > E_2$

Эффективность экранирования

$$S = 20 \cdot \lg (E_1 / E_2), \text{ дБ.}$$

Коэффициент экранирования

$$K_{\text{экp}} = E_2 / E_1; \quad S = 20 \cdot \lg (1 / K_{\text{экp}}).$$

Для расчета эффективности через параметры экрана существует формула:

$$S = R + A + B, \text{ дБ},$$

где  $R$  – составляющая, определяющая отражение от границы раздела при входе волны в экран;  $A$  – определяет эффективность экранирования за счет поглощения электромагнитной волны в толще экрана;  $B$  – характеризует потери за счет многократных отражений в толще экрана,  $B$  мало – 2...3 дБ. Эту величину можно приравнять к нулю.

Имеем три среды: воздух, металл и снова воздух. По сути, имеем структуру диэлектрик-металл-диэлектрик. Волновое сопротивление среды

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\mu}}.$$

Для металла выражение будет иметь вид:

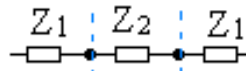
$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}; \quad |Z| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}.$$

Для диэлектрика

$$Z_{\text{д}} = \pm \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}.$$

Знак  $\pm$  описывает падающую и отраженную волны. В нашем случае, для воздуха:

$$Z_{\text{возд}} = \pm \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377 \text{ Ом}.$$



Одна из возможных моделей для анализа экрана – это модель длинной линии. Коэффициент прохождения электромагнитной волны через экран:

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\text{отp}}.$$

Суммарный коэффициент прохождения через экран

$$K_{\Sigma \text{ пр}} = K_{1 \text{ пр}} \cdot K_{2 \text{ пр}};$$

$$K_{\Sigma \text{ пр}} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}.$$

При этом потери отражения оцениваются следующим образом:

$$R = 20 \cdot \lg (1 / K_{\Sigma \text{ пр}}).$$

Для металлического экрана

$$Z_1 \gg Z_2 \cdot K_{\Sigma \text{ пр}} = 4 \cdot Z_2 / Z_1.$$

При электромагнитном экранировании имеют место потери на поглощение экраном электромагнитной энергии. На поверхности экрана возникает скин-слой.

На определенной частоте толщина скин-слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}},$$

$$A = 20 \cdot \lg (e^{t/\delta}) = 8,6 \cdot \frac{t}{\delta}, \text{ дБ},$$

где  $t$  – толщина экрана.



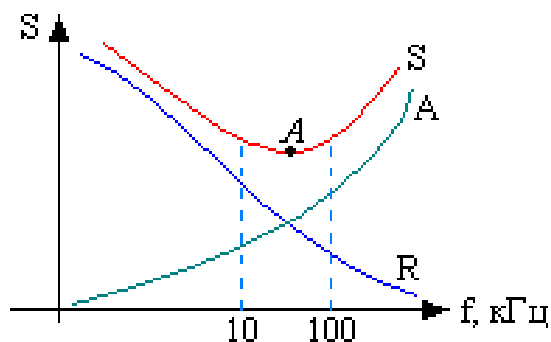


Рис. 9. Зависимость суммарной потери от частоты

Суммарная потеря

$$S = R + A.$$

В точке *A* эффективность электромагнитного экранирования минимальна.

Для электрических составляющих в целом справедливы ранее указанные правила, но добавляется эффект отражения электрического поля.

Для магнитной составляющей основной вклад вносят потери на поглощение, и с повышением частоты в большей степени проявляется эффект вытеснения магнитного поля. Это происходит за счет генерации вихревых токов на поверхности экрана, поле которых и вытесняет падающую электромагнитную волну.

*Выполнение отверстий в электромагнитном экране.* Общая эффективность экранирования определяется в большей мере не качеством экрана, а наличием отверстий, щелей, стыков в экране и прочих элементов поверхности. Выполнение отверстий, не пропускающих электромагнитную волну, требует применения определенных приемов.

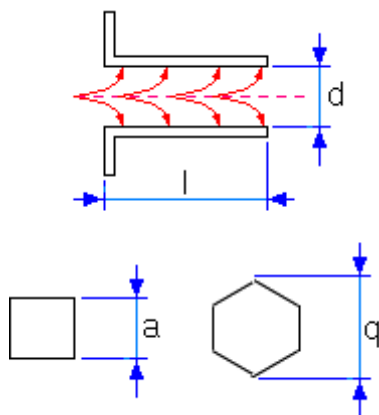


Рис. 10. Выполнение отверстий в электромагнитном экране

Наиболее часто применяют специальную форму отверстия, которое называют "запредельным волноводом". Подобные отверстия выполняются путем вытягивания металла на длину *l* при выполнении отверстия в экране. При этом образуется некоторое подобие волновода с определенной частотой среза, выше которой электромагнитные волны не проникают за волновод. В свою очередь, частота среза зависит от поперечных размеров сечения и длины волновода. Сечение подобных "запредельных волноводов" может быть круговым, квадратным и весьма часто – в виде правильного шестиугольника ("соты").

Частота среза для волновода круглого сечения

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^4}{d, \text{ мм}}, \text{ Гц.}$$

Формулы для расчета ослаблений (эффективность экранирования) для волноводов различных сечений представлены ниже в таблице.

Вид сечения	Расчетное соотношение
Круговое	$S = 32 \cdot \frac{1}{d}, \text{ дБ}$
Квадратное	$S = 27,2 \cdot \frac{1}{a}, \text{ дБ}$
Сота	$S = 27 \cdot \frac{1}{q} - 20 \cdot \lg N, \text{ дБ}$

Расчет эффективности экранирования некоторой области внутри структурного образования РЭС зависит от характера электромагнитного поля. Известно, что вблизи источника излучения (при расстояниях менее  $5\lambda$ ) поле не сформировано и

может преобладать либо магнитная, либо электрическая составляющие поля. В этом случае расчет экранирования сводится к определению ослабления электрической либо магнитной составляющей поля. В дальней зоне (при расстояниях более  $5\lambda$ ) поле сформировано, и задача экранирования решается относительно электромагнитного поля.

Варианты материалов для экранирования приведены в прил. 1, а характеристики металлов – в прил. 2.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Понятие рецептора и источника помех.
2. Характеристики источников помех.
3. Электростатическое экранирование в ближней зоне.
4. Магнитостатическое экранирование.
5. Электромагнитное экранирование.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уилльямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Уилльямс ; пер. с англ. под ред. Л.Н. Кечиева. – М. : Издательский Дом "Технологии", 2003. – 540 с.
2. Уилльямс, Т. ЭМС для систем и установок / Т. Уилльямс, К. Армстронг ; пер. с англ. – М. : Издательский Дом "Технологии", 2004. – 508 с.
3. Кечиев, Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества : учебное пособие для вузов / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М. : Издательский Дом "Технологии", 2005. – 328 с.
4. Кечиев, Л.Н. Электромагнитная совместимость и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М. : Издательский Дом "Технологии", 2005. – 320 с.
5. Медведев, А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А.М. Медведев. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.
6. Ненашев, А.П. Конструирование радиоэлектронных средств : учебник для радиотехн. спец. вузов / А.П. Ненашев. – М. : Высшая школа, 1990. – 432 с.
7. Гелль, П.В. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / П.В. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л. : Энергия, 1972.
8. Гроднев, И.И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И.И. Гроднев. – М. : Связь, 1972.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Варианты заданий

Номер в журнале	Материал
1	Алюминий. Очищенное железо
2	Медь. Промышленное железо
3	Очищенное железо. Медь
4	Цинк. Очищенное железо
5	Алюминий. Свинец
6	Промышленное железо. Цинк
7	Очищенное железо. Промышленное железо
8	Цинк. Алюминий
9	Медь. Цинк
10	Свинец. Цинк
11	Алюминий. Медь
12	Очищенное железо. Свинец
13	Свинец. Промышленное железо
14	Алюминий. Очищенное железо
15	Медь. Промышленное железо
16	Очищенное железо. Медь
17	Цинк. Очищенное железо
18	Алюминий. Свинец
19	Промышленное железо. Цинк
20	Очищенное железо. Промышленное железо
21	Цинк. Алюминий
22	Медь. Цинк
23	Свинец. Цинк
24	Алюминий. Медь
25	Очищенное железо. Свинец
26	Свинец. Промышленное железо
27	Очищенное железо. Медь
28	Цинк. Очищенное железо
29	Алюминий. Свинец
30	Алюминий. Медь

### 2. Характеристики материалов экранирования

Материал экрана	Удельная проводимость, 1/Ом·м	Относительная магнитная проницаемость $\mu_r$
Алюминий	$33,3 \cdot 10^4$	1
Свинец	$4,76 \cdot 10^4$	1
Медь	$57 \cdot 10^4$	1
Латунь	$13,3 \cdot 10^4$	1
Цинк	$16,7 \cdot 10^4$	1
Олово	$8,35 \cdot 10^4$	1
Промышленное железо	$10 \cdot 10^4$	200
Очищенное железо	$10 \cdot 10^4$	5000

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad \mu_0 = 0,000001256 \text{ Гн/м.}$$