

Министерство образования Российской Федерации
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н.ТУПОЛЕВА

Кафедра Приборов и информационно-измерительных систем

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Методические материалы к лабораторной работе
(объем 4 часа)

КАЗАНЬ-2002

Экранирование электронной аппаратуры от воздействия электромагнитного поля: методические указания к лабораторной работе / Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. Сост.: А. Г. Корнилов. Набор и техн. ред.: Куншина Н.Б. Казань, 2002г.

Экранированием называется локализация электромагнитного поля в определенном пространстве путем ограничения его распространения всеми возможными способами. Наиболее распространенный вид экрана – это металлическая замкнутая оболочка, препятствующая попаданию электромагнитного поля в пространство занятое электронным устройством. Помимо своего основного функционального назначения экран выступает, как несущий элемент конструкции и кроме ослабления и поглощения энергии электромагнитного поля должен обладать необходимой механической прочностью, жесткостью, удобством закрепления в общей конструкции прибора, иметь минимальные размеры и массу. Поэтому выбор материала экрана диктуется с одной стороны эффективностью защиты, а с другой стороны производственными условиями изготовления (если же экран используется еще и как несущий элемент, то учитываются требования обусловленные и этим обстоятельством).

С физической точки зрения экранирование можно свести к следующему:

Волны электромагнитного поля частично отражаются от внешней поверхности экрана, частично поглощаются материалом экрана, а остальная часть проходит сквозь экран.

В зависимости от частоты источника помех и расстояния от него до экранируемой аппаратуры, электромагнитные поля могут проявлять себя по-разному.

Принято различать ближнюю зону, определяемую расстоянием от источника помех до экранируемой аппаратуры равным $R \leq 5\lambda$, где λ ¹⁾ - длина волны и дальнюю зону, определяемую расстоянием $R \geq 5\lambda$. В ближней зоне преобладающей составляющей электромагнитного поля является магнитная или электрические составляющие (в зависимости от взаимной ориентации источника помех и экранируемой аппаратуры). В дальней зоне одинаково проявляют себя обе компоненты.

В диапазоне 0÷100 Гц – экранирование аппаратуры проводится от магнитной и электрической составляющей.

В диапазоне 100÷5·10⁹ Гц – экранирование аппаратуры проводится от электромагнитного поля.

Таким образом, в зависимости от расстояния между экранируемой аппаратурой и источника помех (в привязке к длине волны излучения источника) наблюдается преобладание отдельного вида поля и в соответствии с этим экран будет работать в одном из следующих режимов:

электростатический (при $R \leq 5\lambda$), когда преобладает электрическая составляющая, то есть $|E| \gg |H|$;

магнитостатический (при $R \leq 5\lambda$), когда преобладает магнитная составляющая, то есть $|H| \gg |E|$;

электромагнитный (при $R \geq 5\lambda$), когда обе составляющие равноценны $|H| \approx |E|$.

¹⁾ $\lambda = V \cdot 1/f$, где V - скорость света равна $3 \cdot 10^8$ м/сек
 f – частота источника помех в герцах.

Электростатическое экранирование.

Электростатическое экранирование (частоты до 4000 Гц) состоит в шунтировании паразитной емкости (между источником и приемником наводок) на корпус.

Эффективность электростатического экранирования не зависит от толщины и металла экрана. Поэтому часто электростатические экраны выполняют в виде тонкого слоя металлизированного диэлектрика. В трансформаторах часто экран выполняют в виде не замкнутого кольца из медной фольги или обмоток, один конец которых заземлен.

Электрическое поле на частотах до 1000 Гц очень слабо поглощается и в основном экранирование осуществляется за счет отражения, с увеличением частоты отражение уменьшается. Если в экране имеются отверстия, щели соизмеримые с длиной волны, то внутрь экрана попадает некоторая часть электрического поля. С целью улучшения электростатического экранирования особо чувствительных к помехам цепей (например, для передачи синхроимпульсов) на обеих сторонах печатных плат сигнальные и заземленные экранные проводники чередуются таким образом, чтобы против сигнальной линии, проходящей с одной стороны платы всегда располагалась заземленная линия с другой стороны платы.

При этом каждая сигнальная линия оказывается окруженной тремя заземленными линиями (слева, справа и снизу на противоположной стороне печатной платы), в результате чего достигается не только эффективная экранировка сигнальной линии от внешних помех, но и для полезного сигнала обеспечивается подобная волноводу цепь от источника до нагрузки.

Магнитостатическое экранирование

Защита осуществляется от постоянных и медленно меняющихся магнитных полей (частотой 0...3000 Гц). Экраны изготавливают в основном из ферромагнитных материалов (пермаллой, сталь, ферриты) с большой магнитной проницаемостью. Толщина экрана из металла составляет 0,5...1,5 мм. При наличии такого экрана силовые линии магнитного поля проходят в основном по его стенкам, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением воздушного пространства около экрана (эффект поглощения). Эффективность экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости экрана и его толщины, а также от наличия стыков и швов, расположенных перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Этот вид экранирования называется магнитным шунтированием, он дает практически одинаковый экранирующий эффект во всем диапазоне НЧ.

На низких частотах (менее 100 Гц) магнитное поле поглощается мало и основная защита осуществляется за счет отражения. Магнитный экран одинаково пригоден для защиты от воздействия внешнего магнитного поля и внешнего пространства от магнитного поля, созданного источником внутри экрана.

При экранировании постоянных магнитных полей следует придерживаться следующих рекомендаций:

- применять материалы с возможно более высокой магнитной проницаемостью;
- избегать в конструкции экрана стыков и швов;
- не допускать крепления экранируемого элемента и оболочки экрана стальными деталями, которые могут образовывать пути с малым магнитным сопротивлением для магнитных силовых линий поля помех;
- повышать эффективность экрана применяя материалы с большим значением магнитной проницаемости (μ). Так, например, если вместо стали взять пермаллой с $\mu=5000$ то при той же толщине экрана эффективность экранирования возрастает в 3...5 раз.

Электромагнитное экранирование

Сущность экранирования сводится к тому, что под действием источника электромагнитной энергии на стороне экрана, обращенной к источнику, возникают заряды, а в его стенках – токи, образующие во внешнем пространстве поля, по напряженности близкие к полю источника, а по направлению – противоположные ему. В результате внутри экрана происходит взаимная компенсация полей, а снаружи его – вытеснение внешнего поля полями вихревых токов (эффект отражения). Кроме того, происходит поглощение поля за счет потерь на джоулеву теплоту (при протекании вихревых токов по стенкам экрана) и на перемагничивании (если экран выполнен из ферромагнитного материала).

Защита осуществляется на частотах выше 3000 Гц. Экраны изготавливают из немагнитных и ферромагнитных металлов, что дает одновременное ослабление электрической и магнитной составляющих поля. Экранирование за счет отражения и экранирование за счет поглощения вносят различный вклад в общий эффект экранирования. Поэтому при выборе материала для экрана следует учитывать следующие соображения:

1. На частотах более 1 МГц резко возрастает вклад поглощения помехи, который в свою очередь можно улучшить за счет меньшего удельного сопротивления материала.

2. Тонкие проводящие пленки толщиной до 100 мкм обеспечивают достаточно высокое постоянное ослабление помехи в широком диапазоне частот (до 100 МГц).

3. Отражение помехи мало зависит от частоты, а в основном зависит от соотношения волнового сопротивления воздуха в электромагнитном поле и волнового сопротивления материала экрана.

Материалы, имеющие в своем составе большое содержание алюминия, меди, серебра, золота, бериллия, марганца и т.п. т.е. материалов с удельным сопротивлением $\rho \leq 50 \cdot 10^{-6}$ Ом · мм дают малое значение волнового сопротивления экрана. Поэтому, например, алюминиевая, медная или латунная фольга толщиной 20-30 мкм обеспечивает высокую степень экранирования уже на частотах более 100 КГц

Количественная оценка эффективности экранирования

Для количественной характеристики степени экранирования вводится понятие эффективности экрана (коэффициент экранирования). $K(EH)$ при этом под эффективностью экранирования понимается относительное ослабления поля экраном. Оценка эффективности экранирования производится или по формуле вида:

$$K(EH) = 20 \lg K(\Pi) + 20 \lg K(0)$$

(оценка в децибельной форме) или по формуле вида

$$K(EH) = K(\Pi) \cdot K(0)$$

(оценка в недецибельной форме)

где $K(\Pi)$ – коэффициент экранирования за счет поглощения энергии помех

$K(0)$ – коэффициент экранирования за счет отражения энергии помех.

В расчетах по экранированию рассматриваются следующие задачи:

Прямая задача:

Имеется экран, осуществляющий защиту от электромагнитного поля помех некоторое электронное устройство. Размеры экрана заданы. Выполнен экран из материала заданной марки с заданной толщиной. Оценить эффективность экранирования электронного устройства. Количественная оценка осуществляется в виде определения численного значения коэффициента экранирования на заданной частоте источника помех.

Обратная задача:

Определить толщину экрана, осуществляющего защиту от электромагнитных помех некоторого электронного устройства, выполненного из материала заданной марки и имеющего заданные размеры. Экранирование необходимо обеспечить с заданной эффективностью на заданной частоте источника помех.

Формулы количественной оценки эффективности экранирования.

Прямая задача

1. Оценка эффективности экранирования электрического поля (электростатический режим работы экрана) осуществляется с помощью следующих формул:

$$K(\Pi) = \operatorname{ch}(\alpha \cdot t)$$

$$K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_E/Z_M + Z_M/Z_E) \cdot \operatorname{th}(\alpha \cdot t)$$

2. Оценка эффективности экранирования магнитного поля (магнитоэлектрический режим работы экрана) осуществляется с помощью следующих формул:

$$K(\Pi) = \operatorname{ch}(\alpha \cdot t)$$

$$K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_H/Z_M + Z_M/Z_H) \cdot \operatorname{th}(\alpha \cdot t) \text{ при } Z_H > Z_M$$

$$K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_M/Z_H + Z_H/Z_M) \cdot \operatorname{th}(\alpha \cdot t) \text{ при } Z_M > Z_H$$

3. Оценка эффективности экранирования электромагнитного поля (электромагнитный режим работы экрана) осуществляется с помощью следующих формул:

$$K(\Pi) = \operatorname{ch}(\alpha \cdot t)$$

$$K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_0/Z_M + Z_M/Z_0) \cdot \text{th}(\alpha \cdot t)$$

Особенностью приведенных выше формул является, то что в их составе имеются гиперболические функции, значительно осложняющие выполнение расчетов. Наибольшие сложности возникают в том случае когда коэффициенты $K(0)$ и $K(\Pi)$ одновременно существенны и численным значением одного из них нельзя пренебречь по сравнению с численным значением другого. Однако во многих случаях для практических расчетов могут быть использованы значительно более простые формулы, вид которых устанавливается в зависимости от величины $\alpha \cdot t$.

Действительно, гиперболические функции входящие в исходные формулы, могут быть представлены следующим образом

$$\text{ch}(\alpha \cdot t) = (e^{\alpha t} + e^{-\alpha t})/2; \quad \text{th}(\alpha \cdot t) = (e^{\alpha t} - e^{-\alpha t})/(e^{\alpha t} + e^{-\alpha t})$$

Поэтому при $\alpha \cdot t \rightarrow 0$ $\text{ch}(\alpha \cdot t) \rightarrow 1$ $\lg(\text{ch}(\alpha \cdot t)) \rightarrow 0$, $\text{th}(\alpha \cdot t) \rightarrow \alpha \cdot t$

при $\alpha \cdot t \rightarrow \infty$ $\text{ch}(\alpha \cdot t) = 0,5 \cdot e^{\alpha t}$ $\text{th}(\alpha \cdot t) = 1$

Таким образом, знание численного значения $\alpha \cdot t$ дает возможность во многих случаях проводить расчеты по экранированию, применяя более простые формулы, осуществив вполне логичные упрощения.

В зависимости от частоты излучения источника помех коэффициенты экранирования $K(\Pi)$ (характеризующий эффект поглощения поля помех экраном) и $K(O)$ (характеризующий эффект отражения поля помех от экрана), меняют свои численные значения. И если в одном частотном диапазоне общий эффект экранирования может в основном определяться лишь коэффициентом $K(\Pi)$ (т.к. $K(O)$ весьма мал), в другом диапазоне - коэффициентом $K(O)$. Есть и такие частотные диапазоны, где эти коэффициенты равноценны. В том случае когда экранирование осуществляется в основном за счет отражения поля помех, а эффект поглощения очень мал можно пользоваться простыми счетными формулами вида:

$$K(E) = K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_E/Z_M) \alpha \cdot t.$$

$$K(H) = K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_M/Z_H) \alpha \cdot t, \text{ при } Z_M > Z_H.$$

$$K(H) = K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_H/Z_M) \alpha \cdot t, \text{ при } Z_H > Z_M.$$

$$K(EH) = K(0) = 1 + 0,5 \cdot (Z_0/Z_M) \alpha \cdot t.$$

Обратная задача

Рассмотрим формулу для вычисления коэффициента экранирования в электростатическом режиме, когда $K(\Pi)$ и $K(O)$ равноценны. очевидно, эта формула имеет следующий вид:

$$K(E) = \text{ch}(\alpha \cdot t) [1 + 0,5 \cdot (Z_E/Z_M + Z_M/Z_E) \cdot \text{th}(\alpha \cdot t)]$$

обозначим $A = Z_E/Z_M + Z_M/Z_E$, $a = \alpha \cdot t$, тогда

$$K(E) = \text{ch}(a) [1 + 0,5 A \text{th}(a)]$$

учитывая, что

$$\text{Sh}(a) = (e^a - e^{-a})/2$$

$$\text{Ch}(a) = (e^a + e^{-a})/2$$

получим

да $K(E) = (e^a + e^{-a})/2 + 0,5A(e^a - e^{-a})/2 = 0,5e^a + 0,5(1/e^a) + 0,5A(0,5e^a - 0,5(1/e^a))$ отку-

$$K(E)e^a = 0,5e^{2a} + 0,5 + 0,25A e^{2a} - 0,25A$$

обозначим $e^{2a} = X^2$, $e^a = X$ тогда

$$X^2(0,5 + 0,25A) - K(E)/(0,5 + 0,25A) + (0,5 - 0,25A)/(0,5 + 0,25A) = 0$$

обозначим

$$L1 = K(E)/(0,5 + 0,25A)$$

$$L2 = (0,5 - 0,25A)/(0,5 + 0,25A)$$

тогда

$$X^2 - L1X + L2 = 0 \text{ и значит}$$

$$(X - L1/2)^2 = (L1/2)^2 - L2 \text{ и значит}$$

$$X - L1/2 = \pm[(L1/2)^2 - L2]^{1/2}$$

$$X = (L1/2) \pm [(L1/2)^2 - L2]^{1/2}$$

Таким образом

$$e^a = L1/2 \pm [(L1/2)^2 - L2]^{1/2}$$

откуда

$$\alpha \cdot t = \text{Ln}(L1/2 \pm [(L1/2)^2 - L2]^{1/2})$$

$$t = (1/\alpha) [\text{Ln}(L1/2 \pm [(L1/2)^2 - L2]^{1/2})]$$

выполнив аналогичные рассуждения для магнитоэлектростатического и электромагнитного режимов можно получить общую формулу вычисления толщины экрана, она имеет следующий вид;

$$t = (1/\alpha) \text{Ln}[(L1/2) \pm [(L1/2)^2 - L2]^{1/2}]$$

$$L1 = R1/(0,5 + 0,25R2)$$

$$L2 = (0,5 - 0,25R2)/(0,5 + 0,25R2)$$

при этом $R1$ и $R2$ в зависимости от режима работы экрана принимают следующие значения:

$R1 = K(E)$ - в электростатическом режиме .

$R1 = K(H)$ - в магнитоэлектростатическом режиме.

$R1 = K(EH)$ - в электромагнитном режиме.

$R2 = (ZE/ZM + ZM/ZE)$ - в электростатическом режиме

$R2 = (ZH/ZM + ZM/ZH)$ - в магнитоэлектростатическом режиме, если $ZH > ZM$

$R2 = (ZM/ZH + ZH/ZM)$ - в магнитоэлектростатическом режиме, если $ZH < ZM$

$R2 = (Z_0/ZM + ZM/Z_0)$ - в электромагнитном режиме.

В том случае, когда экранирование осуществляется за счет поглощения энергии поля помех, а отражение ничтожно мало ($E(\Pi) \gg E(O)$) формулы для решения обратных задач имеют вид:

1) когда коэффициент экранирования задан в недецибелльной форме

$$t = 2,3 \cdot \frac{\lg K(EH) + 0,69}{\alpha}$$

$$t = 2,3 \cdot \frac{\lg K(E) + 0,69}{\alpha}$$

$$t = 2,3 \cdot \frac{\lg K(H) + 0,69}{\alpha}$$

2) когда коэффициент экранирования задан в децибельной форме

$$t = \frac{0,115(20 \lg K(EH) + 6)}{\alpha}$$

$$t = \frac{0,115(20 \lg K(E) + 6)}{\alpha}$$

$$t = \frac{0,115(20 \lg K(H) + 6)}{\alpha}$$

Как известно основные формулы для вычисления волновых сопротивлений имеют вид:

величина волнового сопротивления воздушной среды для электромагнитной волны (плоская волна, которая проявляется при удалении от источника помех более чем на пять длин волн)

$$Z_0 = (\mu_\epsilon / \epsilon_\epsilon)^{1/2}$$

волновое сопротивление воздушной среды для магнитной составляющей

$$ZH = \omega \cdot \mu_\epsilon \cdot RM$$

волновое сопротивление воздушной среды для электрической составляющей

$$ZE = 1/(\omega \cdot \epsilon_\epsilon \cdot RM)$$

величина коэффициента вихревых токов

$$\alpha = (\omega \cdot \mu_\epsilon / \rho)^{1/2}$$

величина волнового сопротивления экрана

$$ZM = \omega \cdot \mu_\epsilon \cdot RM$$

где μ_ϵ – магнитная проницаемость воздуха

$$\mu_\epsilon = 4\pi \cdot 10^{-10} \text{ Гн/мм}$$

ϵ_ϵ - диэлектрическая проницаемость воздуха

$$\epsilon_\epsilon = (1/36\pi) \cdot 10^{-12} \text{ ф/мм}$$

где μ_ϵ – магнитная проницаемость экрана

$$\mu_\epsilon = \mu_\epsilon \cdot \mu_m$$

где μ_m - магнитная проницаемость материала экрана

f - частота излучения поля помех (Гц) ρ - удельное сопротивление материала экрана ($\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot 10^{-3}$)

t - толщина экрана (мм)

RM - максимальный размер экрана мм (наибольший из размеров по X, Y, Z)

Подставляя численные значения констант, входящих в расчетные формулы легко установить что:

$$Z_0 = 376,8 \text{ (Ом)}$$

$$ZH = 7,89 \cdot 10^{-9} \cdot f \cdot RM \cdot \mu_m \text{ (Ом)}$$

$$ZE = 1,8 \cdot 10^{13} \cdot 1/(f \cdot RM) \text{ (Ом)}$$

$$\alpha = 8,88 \cdot 10^{-5} (f \cdot \mu_m / \rho)^{1/2} \text{ (1/мм)}$$

$$ZM = 8,88 \cdot 10^{-5} (f \cdot \mu_m \cdot \rho)^{1/2} \text{ (Ом)}$$

Размер экрана.

Выбор материала экрана диктуется с одной стороны эффективностью защиты, а с другой стороны производственными условиями, удобством изготов-

ления и, наконец, просто механической прочностью конструкции. Пусть размеры объекта экранирования составляют соответственно X , Y , Z . При экранировании между экраном и объектом экранирования предусматриваются зазоры, обеспечивающие удобство сборки, прочность монтажа, тепловой режим и другие условия нормального функционирования объекта. Обозначим величины этих зазоров через:

X_1, X_2 - по размеру X

Y_1, Y_2 - по размеру Y

Z_1, Z_2 - по размеру Z

Толщина стенок экрана определяет эффективность подавления помехи, механическую прочность, удобство закрепления и размещения на объекте. Обозначим толщину стенок экрана через:

$X_{T1} = X_{T2}$ - по размеру X

$Y_{T1} = Y_{T2}$ - по размеру Y

$Z_{T1} = Z_{T2}$ - по размеру Z

Обычно $X_{T1} = X_{T2} = Y_{T1} = Y_{T2} = Z_{T1} = Z_{T2}$

Таким образом, размеры экрана вычисляются по формулам:

$$X_E = X_{T1} + X_1 + X + X_2 + X_{T2}$$

$$Y_E = Y_{T1} + Y_1 + Y + Y_2 + Y_{T2}$$

$$Z_E = Z_{T1} + Z_1 + Z + Z_2 + Z_{T2}$$

Размеры зазоров находятся следующим образом:

$$X_1 = \Delta X_G + \Delta X + \Delta X_E + \Delta X_{\text{II}} \quad (\text{II})$$

ΔX - допуск на размер экранируемого объекта

ΔX_E - допуск на размер стенки экрана (обычно берётся равным)

$\Delta X_{\text{II}} \quad (\text{II})$ - максимальный прогиб стенки экрана

ΔG - гарантированный зазор стенки объекта

Обычно при расчетах берут следующие численные значения:

$\Delta X_G = 1 \text{ мм}$ для обеспечения необходимой электрической прочности

$$\Delta X = (0,005 \div 0,01) \cdot X; \quad \Delta X_E = (0,005 \div 0,01) \cdot X$$

$\Delta X_{\text{II}} \quad (\text{II}) = 0,01 \cdot X \quad (\uparrow)$ - наибольший размер в перпендикулярном направлении (т. е. от оси Y или Z)

Аналогично оцениваются величины зазоров $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$.

Контрольные вопросы:

1. Как определить необходимый режим работы экрана, если известна частота источника электромагнитных помех и расстояние между экранируемым устройством и источником помех.
2. Объясните физическую сущность электростатического экранирования.
3. Объясните физическую сущность магнитостатического экранирования.
4. Объясните физическую сущность электромагнитного экранирования.
5. Как устанавливается требуемое численное значение.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Электрические параметры экранирующих материалов (магнитные материалы)

№ п/п	Материалы	Толщина ленты (мм)	$\rho \cdot 10^{-6}$ Ом·мм	$\mu(\min)$	$\mu(\max)$
1.	Технически чистое железо	0,1 - 3,9	100	250	7000
2.	Карбонильное железо	0,1 - 3,9	100	3300	21000
3.	Электрические нелегированные стали: 10895,20895,11895 10880,20880,11880 10832,20832,11832	0,1 - 3,9 0,1 - 3,9 0,1 - 3,9	140 140 140	250 250 250	3000 4000 5000
4.	Пермаллой	0,005	550	7000	30000
		0,01	550	14000	60000
		0,02	550	16000	70000
		0,05 - 0,08	550	16000	90000
		0,1 - 0,15	550	20000	120000
	79НМ	0,2 - 0,5	550	22000	130000
		0,02	800	70000	170000
		0,05	800	100000	300000
		0,1 - 0,15	800	120000	350000
		0,8 - 2,0	800	50000	300000

Электрические параметры экранирующих материалов (немагнитные материалы)

№ №	Наименование материала	Марка	$\rho \cdot 10^{-6}$ Ом·мм	$\mu(\text{м})$	Защитное покрытие	$\rho \cdot 10^{-6}$ Ом·мм	$\mu(\text{м})$
1	Деформируемые алюминиевые сплавы	АМГ	30	1	Серебро	15	1
		АМЦ					
		АЛ4	45,8	1	Алюминий	26	1
2	Дюраль	АЛ9	45,7	1	Медь	17	1
		Д16	47	1	Никель	68	59-530
		Д19					
3	Сплав магния	МА-2	130	1	Хром	130	1
4	Сплав титана	ВТ1	1360	1	Кадмий	74	1
5	Сплав меди (латунь)	Л90	45	1	Цинк	69	1
		Л68	72	1	Олово	113	1
		ЛЖС					
		58-1-1	70	1	Висмут	1160	1

№ №	Наименование материала	Марка	$\rho \cdot 10^{-6}$ 0м·мм	μ (м)	Защитное покрытие	$\rho \cdot 10^{-6}$ 0м·мм	μ (м)
6	Фольгированный стеклотекстолит	СФ1- 35-1,5	47	1	Палладий	108	1

Логарифмические единицы измерения

В инженерии принято для количественной оценки степени ослабления (усиления) использовать логарифмические единицы. Целесообразность введения логарифмической единицы измерения определяется простым физическим смыслом и удобством применения. Обозначим мощность помехи паразитного электромагнитного поля через P_2 и мощность помехи после экранирования через P_1 . Очевидно $P_1 < P_2$, тогда $\ln P_2/P_1$ – логарифмическая единица называемая Непер (НП) Величина в 1НП соответствует ослаблению мощности в 7,39 раза. В инженерной практике чаще используется другая логарифмическая единица измерения – Бел и дБ – децибел, когда используется десятичный логарифм $\lg P_2/P_1^2$ (1дБ = 0,1 Бел)

Ниже приводятся соотношения между относительным измерением величины мощности и его выражением в дБ

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{дБ} = 20 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

(P2/P1)(дБ)	1	2	3	10	13	20	30	40	50
P2/P1	1,12	1,26	1,41	3,16	4,47	10	31,6	100	316

Если $P_2 > P_1$, то логарифмическая единица характеризует степень ослабления

Значение гиперболических функций

αt	Ch (αt)	Th (αt)
0,001 ÷ 0,17	1	αt
0,18 ÷ 0,22	1,02	αt
0,23 ÷ 0,26	1,03	αt
0,27 ÷ 0,3	1,04	αt
0,33 ÷ 0,35	1,06	$\alpha t - 0,009$
0,36 ÷ 0,385	1,07	$\alpha t - 0,01$
0,386 ÷ 0,41	1,08	$\alpha t - 0,02$
0,411 ÷ 0,43	1,09	$\alpha t - 0,025$
0,434 ÷ 0,464	1,1	$\alpha t - 0,029$
0,469 ÷ 0,499	1,12	$\alpha t - 0,034$
0,5 ÷ 0,515	1,135	$\alpha t - 0,035$
0,52 ÷ 0,545	1,145	$\alpha t - 0,0475$

αt	Ch (αt)	Th (αt)
0,55 ÷ 0,56	1,16	$\alpha t - 0,055$
0,565 ÷ 0,595	1,17	$\alpha t - 0,055$
0,6 ÷ 0,6125	1,19	$\alpha t - 0,0675$
0,63 ÷ 0,655	1,21	$\alpha t - 0,0775$
0,66 ÷ 0,685	1,235	$\alpha t - 0,0875$
0,69 ÷ 0,715	1,26	$\alpha t - 0,1$
0,72 ÷ 0,75	1,28	$\alpha t - 0,11$
0,755 ÷ 0,78	1,31	$\alpha t - 0,1225$
0,785 ÷ 0,815	1,33	$\alpha t - 0,135$
0,82 ÷ 0,86	1,375	$\alpha t - 0,15$
0,865 ÷ 0,915	1,425	$\alpha t - 0,18$
0,92 ÷ 0,965	1,475	$\alpha t - 0,2$
0,97 ÷ 1,01	1,53	$\alpha t - 0,23$
1,015 ÷ 1,055	1,58	$\alpha t - 0,26$
1,06 ÷ 1,085	1,535	$\alpha t - 0,28$
1,09 ÷ 1,125	1,68	$\alpha t - 0,3$
1,13 ÷ 1,17	1,74	$\alpha t - 0,335$
1,175 ÷ 1,235	1,815	$\alpha t - 0,365$
1,24 ÷ 1,31	1,93	$\alpha t - 0,42$
1,315 ÷ 1,395	2,07	$\alpha t - 0,48$
1,4 ÷ 1,5	2,25	$\alpha t - 0,555$
1,505 ÷ 1,62	2,495	$\alpha t - 0,6475$
1,625 ÷ 1,78	2,82	$\alpha t - 0,765$
1,785 ÷ 2,015	3,46	$\alpha t - 0,945$
2,02 ÷ 2,44	4,81	$\alpha t - 1,255$
2,45 ÷ 2,54	6,11	0,987
2,55 ÷ 2,57	6,44 ÷ 6,57	0,988
2,58 ÷ 2,62	6,64 ÷ 6,97	0,989
2,63 ÷ 2,72	6,98 ÷ 7,62	0,99
2,73 ÷ 2,82	7,7 ÷ 8,5	0,992
2,83 ÷ 2,97	8,6 ÷ 9,77	0,994
2,98 ÷ 3,04	9,87 ÷ 10,58	0,995
3,05 ÷ 3,17	10,7 ÷ 11,92	0,996
3,18 ÷ 3,34	12 ÷ 14,13	0,997
3,35 ÷ 3,59	14,3 ÷ 18	0,9985
3,6 ÷ 3,71	18,3 ÷ 20,43	0,999
3,72 ÷ 3,81	20,64 ÷ 22,59	0,999
3,82 ÷ 3,91	22,81 ÷ 24,96	0,999
3,92 ÷ 3,99	25,2 ÷ 27,3	0,999
4 ÷ 4,07	27,31 ÷ 29,3	0,999

αt	Ch (αt)	Th (αt)
4,08 ÷ 4,17	29,58 ÷ 32,04	0,999
4,18 ÷ 4,25	32,7 ÷ 35,06	0,999
4,26 ÷ 4,32	35,06 ÷ 37,6	0,999
4,33 ÷ 4,39	37,98 ÷ 40,33	0,999
4,4 ÷ 4,46	40,73 ÷ 43,23	0,999
4,47 ÷ 4,53	43,68 ÷ 46,38	0,999
4,54 ÷ 4,61	46,85 ÷ 50,24	0,999
4,62 ÷ 4,67	50,75 ÷ 53,35	0,999
4,68 ÷ 4,72	53,89 ÷ 56,09	0,999
4,73 ÷ 4,79	56,65 ÷ 60,15	0,999
4,8 ÷ 4,87	60,76 ÷ 65,16	0,999
4,88 ÷ 4,95	65,82 ÷ 70,59	0,999
4,96 ÷ 5,02	71,3 ÷ 75,7	0,999
5,03 ÷ 5,08	76,47 ÷ 80,04	0,999
5,09 ÷ 5,13	81,2 ÷ 84,5	0,999
5,14 ÷ 5,19	85,36 ÷ 89,73	0,999
5,2 ÷ 5,25	90,6 ÷ 95,29	0,999
5,26 ÷ 5,3	96,24 ÷ 100,2	0,999
5,31 ÷ 5,36	101,2 ÷ 106,4	0,999
5,37 ÷ 5,43	107,4 ÷ 114,1	0,999
5,44 ÷ 5,5	115,2 ÷ 122,3	0,999
5,51 ÷ 5,57	123,6 ÷ 131,2	0,999
5,58 ÷ 5,64	132,5 ÷ 140,7	0,999
5,65 ÷ 5,71	142,1 ÷ 150,9	0,999
5,72 ÷ 5,77	152,45 ÷ 160,3	0,999
5,78 ÷ 5,83	161,88 ÷ 170,2	0,999
5,84 ÷ 5,89	171,9 ÷ 180,7	0,999
5,9 ÷ 5,95	182,5 ÷ 191,9	0,999
5,96 ÷ 6	193,8 ÷ 201,72	0,999
6,01 ÷ 6,05	203,74 ÷ 212,1	0,999
6,06 ÷ 6,09	214,2 ÷ 220,7	0,999
6,1 ÷ 6,14	222,2 ÷ 232,03	0,999
6,15 ÷ 6,2	234,4 ÷ 246,2	0,999
6,21 ÷ 6,27	248,9 ÷ 264,2	0,999
6,28 ÷ 6,35	266,9 ÷ 286,2	0,999
6,36 ÷ 6,4	289 ÷ 300,9	0,999
6,41 ÷ 6,45	303,95 ÷ 316,5	0,999
6,46 ÷ 6,53	319,5 ÷ 342,7	0,999
6,54 ÷ 6,58	346 ÷ 360,3	0,999
6,59 ÷ 6,63	363,9 ÷ 378,7	0,999

Условные обозначения, используемые в расчетах
по экранированию.

- $K(E)$ – коэффициент, характеризующий эффективность экранирования электрических полей
- $K(H)$ - коэффициент, характеризующий эффективность экранирования магнитных полей
- $K(EH)$ - коэффициент, характеризующий эффективность экранирования электромагнитных полей
- $K(\Pi)$ - коэффициент экранирования за счет поглощения энергии помехи (рассеяние энергии помехи в экране)
- $K(O)$ - коэффициент экранирования за счет отражения энергии помехи от экрана
- f – частота источника помех
- ρ - удельное сопротивление материала, из которого выполнен экран
- μ - относительная магнитная проницаемость экрана
- R – расстояние между источником помехи и приемником
- RM - максимальный размер экрана (наибольший из размеров по X, Y, Z)
- λ - длина электромагнитной волны
- ZO - волновое сопротивление воздушного пространства для электромагнитных волн
- α - коэффициент вихревых токов
- t – толщина материала из которого выполнен экран
- ZH – волновое сопротивление воздушного пространства для магнитной составляющей
- ZE - волновое сопротивление воздушного пространства для электрической составляющей
- ZM - волновое сопротивление экрана.

Литература:

1. А. П. Ненашев. Конструирование радиоэлектронных средств М. Высшая школа 1990
2. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования под редакцией Р.Г.Варламова М."Советское радио" 1980
3. П.П.Гель, Н.К. Иванов-Осипович Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры, Ленинград, Энергоиздат, 1984.
4. О.П. Лавренов. Практика конструирования РЭС. Учебное пособие, Казань, КГТУ им.А.Н.Туполева, 1995.