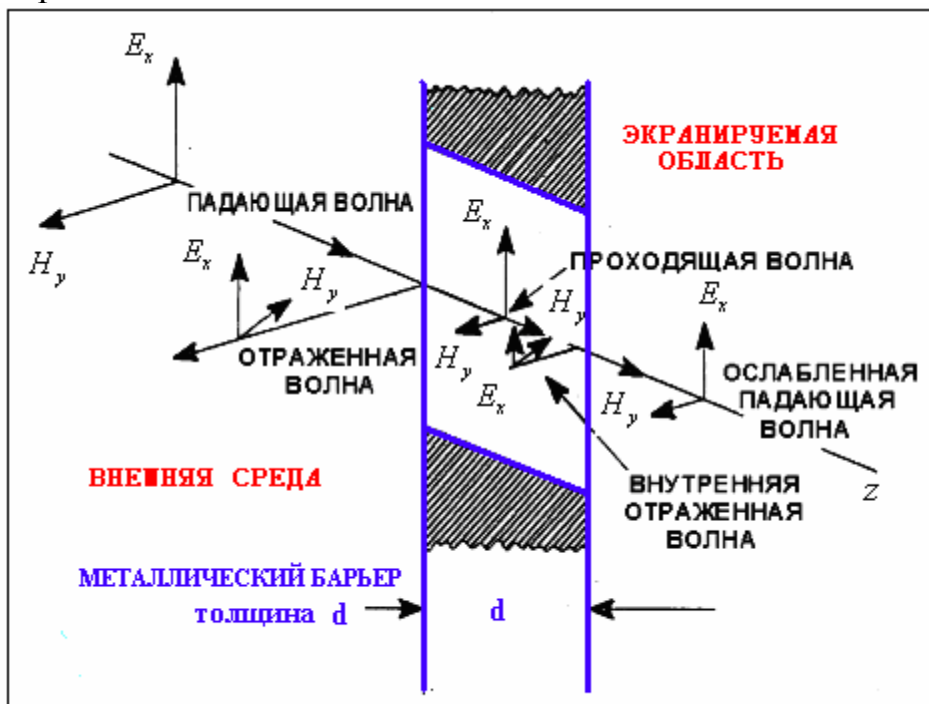


ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Рассмотрим качественно физические принципы экранирования. Анализ проведем для плоского проводящего экрана.

На рис. XX представлен бесконечно протяженный плоский металлический экран толщиной d , находящийся в воздухе, на который слева падает плоская электромагнитная волна.

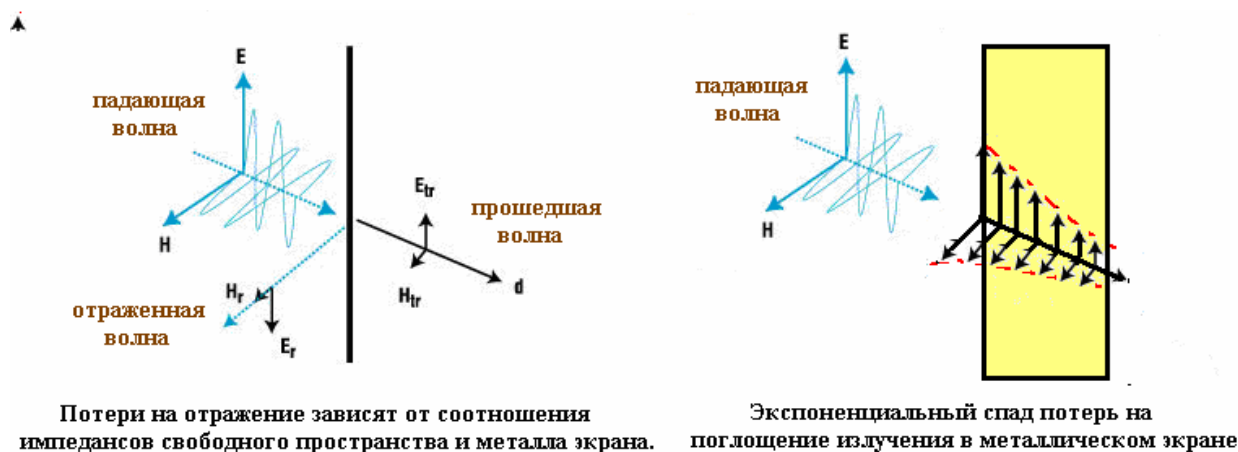


Отражение и прохождение падающей на экран электромагнитной волны

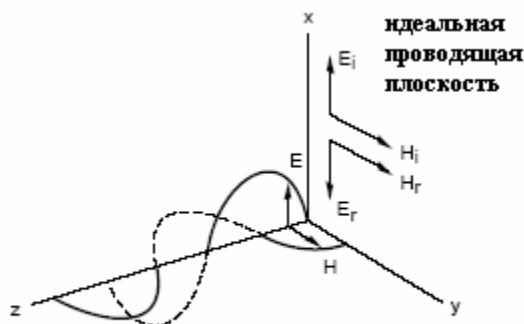
В процессе своего падения на границу раздела двух сред с различными электрофизическими характеристиками (воздух — металл и металл — воздух) волна претерпевает отражение и преломление, а в толще экрана ввиду его проводящих свойств происходит и частичное поглощение энергии электромагнитного поля. Таким образом, электромагнитная волна при взаимодействии с экраном частично отражается от его поверхности, частично проникает в стенку экрана, претерпевает там поглощение материалом экрана, многократно отражается от его стенок и, в конечном итоге, частично проникает в экранируемую область. При этом все вышеперечисленные процессы сопровождаются потерями энергии электромагнитной волны.

Теория экранирования основана на *двух фундаментальных принципах* — на *отражении и поглощении электромагнитных волн при переходе их из одной материальной среды в другую*. Оба эти эффекта снижают энергию элек-

ромагнитного поля, прошедшую за экран. Чаще всего в качестве материала экрана используется проводник.



Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть мы имеем нормальное падение вертикально поляризованной электромагнитной волны на поверхность металлического экрана (рис). Будем считать магнитную проницаемость материала экрана равной единице. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ электромагнитной волны лежат в плоскости экрана.



Падение плоской волны на идеальный экран

На границе раздела двух сред должно удовлетворяться соотношение (см. “Электродинамика”)

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2)\vec{\tau}_0 = 0,$$

где $\vec{\tau}_0$ - единичный вектор касательной к поверхности раздела сред (безразмерная величина), индексы 1 и 2 относятся к смежным средам.

Для вектора $\vec{H}$ должно быть справедливо соотношение

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2)\vec{\tau}_0 = \vec{\eta},$$

где $\vec{\eta}$ - плотность поверхностного тока.

Идеальный случай, когда проводимость экрана бесконечно высока (импеданс равен нулю). Тогда электрическая компонента напряженности отраженной волны $E_r = E_2$ будет равна и противоположна соответствующей компоненте падающей волны $E_i = E_1$.

При таких идеальных условиях и экранирование от электрического поля будет идеальным, потому что оба электрических поля – падающее и отраженное взаимно компенсируют друг друга.

В реальном случае эффективность экранирования металлическим экраном не бесконечна, поскольку не бесконечна проводимость материала экрана. Эффективность экранирования конечна, хотя и может быть очень высокой. Поскольку проводимость материала не бесконечна, часть волны пройдет в стенку экрана и создаст в ней ток.

Эти наведенные токи рассеивают падающую электромагнитную энергию двумя способами: на тепловые потери в материале экрана и на потери на излучение, поскольку эти токи заново излучают собственные ЭМ поля.

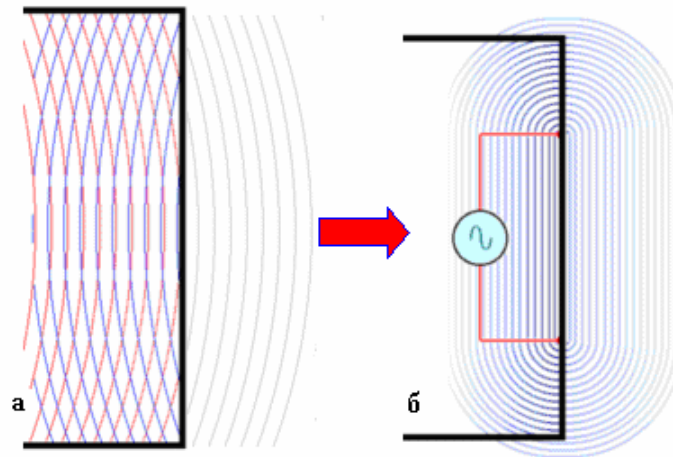
Для тонкого экрана зависимость плотности тока от глубины приведена на рис.



Ослабление индуцированного тока в экране с тонкой стенкой

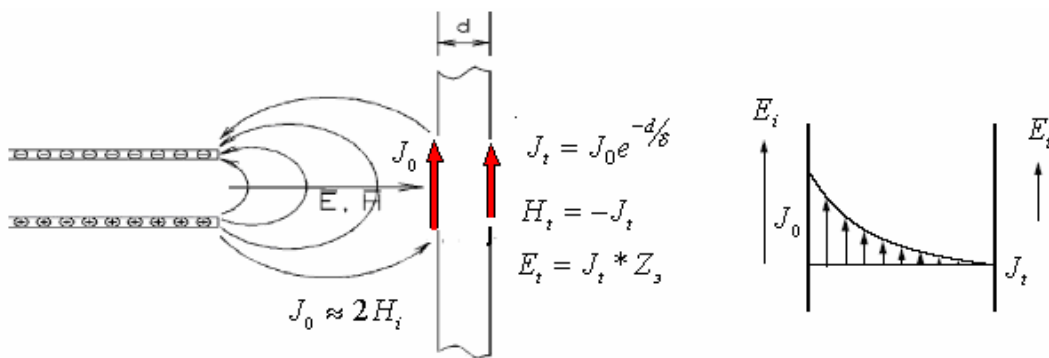
Всякий проводник с переменным током работает, в том числе, и как антенна. Поэтому вторая стенка тонкого экрана, по которой протекает этот переменный ток, может, и будет излучать,

Антенный эффект второй стенки экрана представлен генератором напряжения.



Излучение экрана

Механизм протекания поверхностного тока в экране при падении на него электромагнитного поля можно пояснить также с помощью рис..



а) Механизм образования поверхностного тока б) Спад тока в экране с толстой стенкой

Токи в экране при нормальном падении вертикально поляризованной волны

Мощность после прохождения экрана

Величина электрического поля за стенкой экрана будет равна

$$E_t = J_t * Z_s.$$

Амплитуда поля после прохождения барьера уменьшается, но направление поля остается неизменным. Затухание мощности является функцией расстояния от источника поля (рис. 4).

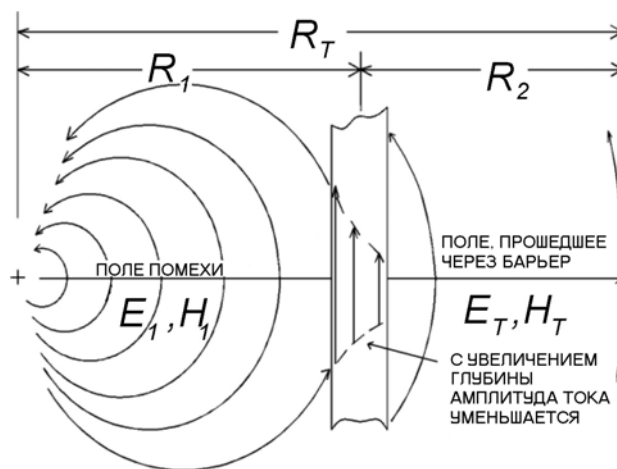


Рис. 4

Мощность на расстоянии R_2 от барьера вычисляется по формуле:

$$P_{R2} = \left(\frac{R_1}{R_T} \right)^2 \cdot P_T$$

где P_{R2} – плотность мощности на расстоянии R_2 (Вт/м²); P_T – плотность мощности, прошедшей через барьер (Вт/м²).

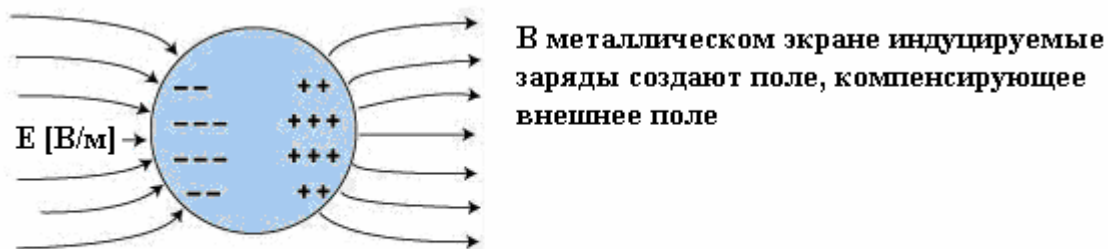
Если расстояние $R_2 > \lambda/2\pi$, значения E_{R2} и H_{R2} могут быть найдены из системы уравнений:

$$E_{R2} \cdot H_{R2} = P_{R2}$$

$$E_{R2} / H_{R2} = 377$$

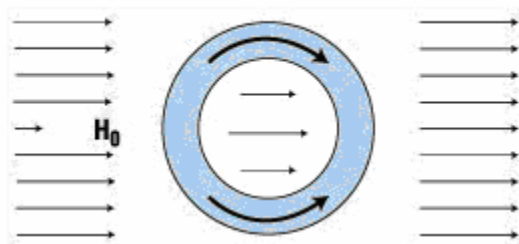
Можно и несколько иначе сформулировать физический смысл экранирования от электромагнитных помех. В основе экранирования на низких частотах лежат два физических принципа – поляризация и намагничивание материала экрана.

На низких частотах экранирование электрических полей основано на эффекте Фарадея (рис.). Поляризация зарядов в металлической стенке экрана создает поле, компенсирующее внешнее низкочастотное электрическое поле. Поскольку подвижность электронов в металле очень высока, то толщина стенок экрана может быть малой.

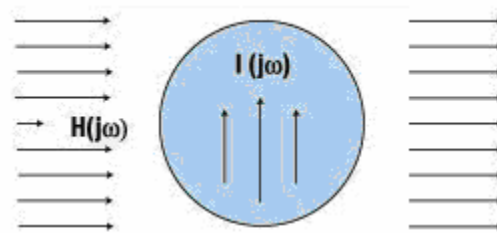


Принцип действия экрана Фарадея

В случае действия магнитных полей эффект поляризации не работает, поскольку в природе нет магнитных зарядов. Однако ослабления низкочастотного магнитного поля можно добиться, если в качестве материала экрана взять металл с высокой магнитной проницаемостью ($\mu \gg 1$) и с достаточной толщиной, чтобы силовые линии магнитного поля прошли в основном в стенках экрана, где реактивное сопротивление для магнитного поля минимально.



а) Шунтирование магнитного потока стенками экрана с $\mu \gg 1$



б) Создание вихревых токов в высокопроводящих стенках экрана

Принципы экранирования от магнитного поля

В экране из металла с высокой проводимостью высокочастотное магнитное поле вызывает вихревые токи, которые в свою очередь создают магнитное поле, направленное навстречу внешнему и компенсирующее его. Толщина экрана в этом случае может быть достаточно тонкой по сравнению с толщиной экрана для низкочастотных магнитных полей и магнитная проницаемость материала экрана не обязательно должна быть высокой. Здесь важна в первую очередь высокая проводимость металла экрана.

Концепция различия волновых импедансов (Теория Щелкунова (Schelkunoff's Theory))

При создании экранов очень важно различие волновых импедансов на границе раздела сред. Для любой распространяющейся электромагнитной

волны характерным параметром является полное волновое сопротивление среды, в которой происходит ее распространение $Z = E/H$.

Если импеданс волны, падающей на экран, сильно отличается от импеданса материала экрана, то большая часть энергии будет отражаться от экрана, а оставшаяся пройдет через границу, и в материале экрана эта прошедшая волна будет ослабевать. Электрическое и магнитное поля отражаются от каждой границы экрана по-разному.

Если импедансы не равны, то происходит отражение части волны. Оставшаяся неотраженная часть волны проходит в экран, где происходит ее полное или частичное поглощение.

Электрическая компонента поля отражается преимущественно при переходе из среды с высоким импедансом в среду с низким импедансом, т.е. на первой границе, поскольку волновой импеданс воздуха (или вакуума) высокий, а металлической стенки - низкий. Поэтому большая часть энергии электрического поля отражается от металлического экрана.

Поскольку у многих металлов внутренний импеданс составляет миллиомы, а магнитное поле, как было выяснено ранее (см. “Электродинамика”), тоже имеет низкий импеданс, то первая стенка металлического экрана для магнитной компоненты поля представляет собой нагрузку, близкую к согласованной. Поэтому только незначительная часть энергии Н-волны будет отражаться от первой границы экрана, а большая ее часть будет проходить внутрь экрана и там поглощаться. *Магнитная компонента поля отражается при переходе волны из среды с низким импедансом (металла) в среду с высоким импедансом (воздух – диэлектрик), т.е. на второй границе.* По этой причине трудно сделать экран от магнитного поля, который бы работал на принципе отражения волны на первой внешней стенке экрана.

Между этими двумя поверхностями экрана волна может многократно отражаться. Потерями на это многократное отражение, если они меньше 10 dB, обычно можно пренебречь.

Коэффициент прохождения через экран представляет собой эффективность экранирования, так как равен отношению амплитуд прошедшей и падающей на экран волны. Аналитическая оценка эффективности экранирования в общем случае, особенно при комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостях материала, затруднительна даже для плоскопараллельного бесконечного экрана. Поэтому часто используется более простой, приближенный анализ, основанный на представлении эффективности экрана как суммы отдельных составляющих:

$$A = A_{\text{отр}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{м.отр}}$$

где $A_{\text{погл}}$ — эффективность экранирования вследствие поглощения экраном электромагнитной энергии, $A_{\text{отр}}$ — эффективность экранирования за

счет отражения электромагнитной волны экраном, $A_{м.отр}$ — поправочный коэффициент, учитывающий многократные внутренние переотражения волны от поверхностей экрана.

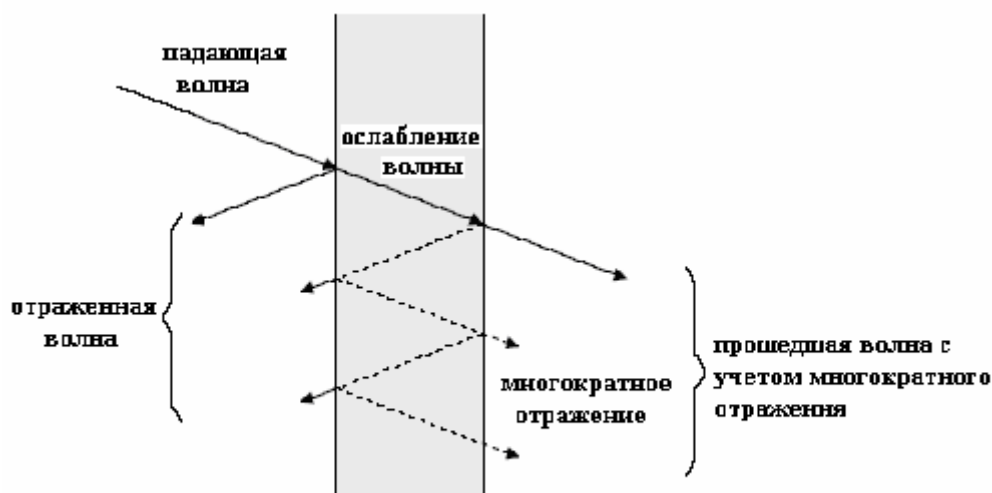


Схема прохождения волны через стенку экрана

При прохождении электромагнитной волны через стенку экрана имеют место три процесса.

1. Падающая на экран волна частично отражается от стенки экрана, поскольку волновой импеданс материала экрана не равен импедансу падающей волны;

2. Та часть волны, которая проникает за стенку экрана, будет ослабляться в стенке экрана в силу конечной проводимости материала экрана;

3. Часть волны, ослабленной в стенке экрана и дошедшей до его задней границы, в силу различия импедансов по обе стороны задней стенки экрана будет сначала отражаться от задней границы, потом, если она еще сохранится, от передней и т.д., т.е. будет происходить многократное отражение сигнала внутри стенки экрана. Теоретически этот процесс многократного отражения будет происходить бесконечно долго. Однако, поскольку после каждой пары отражений будут происходить потери энергии, то этот процесс будет ограничен во времени.

Формулы Щелкунова

1 Линейная шкала

Формулы для амплитуды волны, прошедшей через стенку экрана, имеют вид

$$\begin{aligned}
 F_{out} &= F_{in} \cdot \frac{2Z_M}{Z_M + Z_A} \cdot e^{-\frac{t}{\delta}} \cdot \frac{2Z_A}{Z_M + Z_A} \\
 F_{out} &= F_{in} \cdot s_R \cdot s_A \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Reflection: } s_R = \frac{4Z_A Z_M}{(Z_A + Z_M)^2} \\ \text{Absorption: } s_A = e^{-\frac{t}{\delta}} \end{array} \right. \\
 \delta &= \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}, \quad \sigma: \text{conductivity}, \mu: \text{permeability}
 \end{aligned}$$

Где F_{out} и F_{in} - напряженности поля волны прошедшей через экран и падающей на экран, Z_M и Z_A есть импеданс металла экрана и волновой импеданс падающей волны, t толщина экрана и δ - толщина скин – слоя. Второй сомножитель в формуле означает отражение от передней стенки экрана, третий – поглощение в экране, четвертый - отражение от задней стенки экрана.

Приведенные выше соотношения описывают поле волны, прошедшей через экран. Если учесть многократные отражения, то формула для амплитуды волны, прошедшей через стенку экрана будет иметь вид, в которой множитель в скобках учитывает многократное отражение

$$\begin{aligned}
 F_{out} &= F_{in} \cdot s_R \cdot s_A \cdot (1 + (s_{RR} \cdot s_A)^2 + (s_{RR} \cdot s_A)^4 + \dots) = F_{in} \cdot s_R \cdot s_A \cdot s_{MR} \\
 s_{MR} &= \frac{1}{1 - (s_{RR} \cdot s_A)^2}, \quad s_{RR} = \frac{Z_A - Z_M}{Z_A + Z_M}
 \end{aligned}$$

2 Логарифмический масштаб

Приведенные выше соотношения можно выразить в дБ. При этом коэффициенты отражения и поглощения будут положительными, а коэффициент многократного отражения – отрицательным, поскольку сама величина s_{MR} меньше единицы (**в s_{MR} ошибка**)

$$\begin{aligned}
 S[dB] &= 20 \log \left(\frac{F_{in}}{F_{out}} \right) = S_A[dB] + S_R[dB] + S_{MR}[dB] \\
 S_A[dB] &= 20 \log \left(e^{\frac{t}{\delta}} \right) \approx 8.7 \cdot \frac{t}{\delta} \\
 S_R[dB] &= 20 \log \left(\frac{(Z_A + Z_M)^2}{4Z_A Z_M} \right) \\
 S_{MR}[dB] &= 20 \log (1 - (s_{RR} \cdot s_A)^2)
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 SE_{dB} &= A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \\
 A_{dB} &= 20 \log_{10} e^{ad} \\
 R_{dB} &= 20 \log_{10} \frac{|(Z_0 + Z_m)^2|}{4 Z_0 |Z_m|} \\
 B_{dB} &= 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \right)^2 e^{-2\gamma d} \right|
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Чтобы определить эффективность экранирования, необходимо знать импедансы металла и волновой импеданс источника. Волновой импеданс зависит от типа источника и расстояния от источника до рецептора помехи:

$$Z_A = \begin{cases} 377 \Omega \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} & \text{near field - dipole} \\ 377 \Omega \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r & \text{near field - loop} \\ 377 \Omega & \text{far field } \left(r > \frac{\lambda}{2\pi} \right) \end{cases}$$

а импеданс металла дается соотношением (*1). Для проводящей среды полное характеристическое сопротивление соответствует полному сопротивлению экрана.

Поскольку отражение электрических полей происходит главным образом на первой поверхности, то даже тонкие экраны обеспечивают большие потери на отражение.

Эффективность экранирования

Для металлических экранов $|Z_e| \gg |Z_s|$

$$A_{отр} = 20 \lg(94,25 \sqrt{\sigma / \sqrt{\omega \mu_0 \mu}}) \quad (4)$$

откуда следует, что *потери на отражение велики у экрана, изготовленного из материала с высокой проводимостью и малой магнитной проницаемостью.*

В ближней зоне источника поля параметры излучения в основном определяются не характеристиками среды, а параметрами источника. Волновое сопротивление, создаваемое точечным высокоомным источником электрического поля для ближней зоны излучения ($r < \lambda/2\pi$), можно

аппроксимировать следующим уравнением:

$$|Z_{\epsilon}|_k = 1 / \omega \epsilon r$$

Тогда потери на отражение в электрическом поле ближней зоны источника излучения будут равны

$$A_{\text{отр}} \approx 20 \lg(1 / 4 \omega \epsilon r |Z_{\epsilon}|) .$$

Эти потери излучения электрического поля ближней зоны на отражение оказываются больше, чем потери на отражение у плоской волны, и в основном определяют процесс экранирования.

Волновое сопротивление, обусловленное точечным низкоомным источником магнитного поля в ближней зоне его излучения ($r < \lambda / 2\pi$)

$$|Z_{\epsilon}|_m = \omega \mu r$$

Тогда

$$A_{\text{отр}} \approx 20 \lg(\omega \mu r / 4 |Z_{\epsilon}|)$$

В этом случае потери на отражение меньше, чем у плоской волны, и на низких частотах их можно принять равными нулю.

Потери на поглощение. Эти потери обусловлены поверхностным эффектом в проводниках, приводящим к экспоненциальному уменьшению амплитуды проникающих в металлический экран электрических и магнитных полей (рис. 4). Это объясняется тем, что токи, индуцируемые в металле, вызывают омические потери и, следовательно, нагрев экрана. потери на поглощение экраном толщиной d

$$A_{\text{погл}} = 8.69d/\delta = 6.16d\sqrt{\omega\mu\sigma} . \quad (.)$$

Потери на многократные отражения в тонких экранах.

Для электрических полей почти вся энергия падающей волны отражается от первой границы и только небольшая ее часть проникает в экран. Поэтому многократными отражениями внутри экрана для электрических полей можно пренебречь.

Корректирующий коэффициент многократного отражения для магнитных полей в экране с толщиной стенки d при глубине скин-слоя δ

$$A_{\text{м отр}} = 20 \lg(1 - \exp(-2d/\delta))$$

При этом коэффициент многократного отражения имеет отрицательное значение, что указывает на уменьшение эффективности экранирования тонким экраном вследствие многократных отражений.

