

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЦИФРОВЫХ УЗЛОВ

Под внутренней электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается свойство РЭС и его частей (ячеек, блоков, шкафов, пультов) функционировать без ухудшения качественных показателей при заданной внутри РЭС или его частей электромагнитной обстановке. Обеспечение внутренней электромагнитной совместимости становится все более актуальной задачей ввиду непрерывного уменьшения энергии сигналов цифровых устройств РЭС и роста взаимного влияния элементов, из-за увеличения плотности компоновки и сложности устройств. На цифровые узлы влияют и внешние помехи, проникающие например по цепям питания. Для защиты от этих помех принимаются те же меры, что и для защиты от внутренних помех. Для обеспечения внутренней ЭМС цифрового узла необходимо, чтобы фактическая помеха была меньше допустимой.

Для удобства рассмотрения методов обеспечения внутренней ЭМС цифровых узлов РЭС все *электрические соединения* можно условно разделить на *электрически длинные* и *электрически короткие*.

*Электрически длинной* называется линия связи, геометрическая длина которой соизмерима с длиной волны наиболее высокочастотной составляющей спектра дискретного сигнала. Характеристическим параметром электрически длинной линии является *волновое сопротивление*:

$$L_n = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}} \quad , \quad \text{Ом} \quad (\dots)$$

где  $L_l$  - индуктивность линии, Гн;

$C_l$  - емкость линии, Ф.

При распространении сигнала в электрически длинной линии, имеющей неоднородность волнового сопротивления отдельных участков, от этой неоднородности происходит отражение падающего сигнала (приложенного к началу линии) напряжения  $U_{nad}$  или тока  $I_{nad}$ . Отраженный сигнал складывается с падающим и искажает его. В качестве неоднородности линии связи могут выступать, например, внутреннее сопротивление генератора сигналов, подключенного к началу линии, или сопротивление нагрузки в конце линии, не равные волновому сопротивлению линии связи. Причиной неоднородности может быть также наличие в линии связи участков различного конструкторско-технологического исполнения (одиночный объемный проводник, печатный проводник, коаксиальный кабель, экранированный проводник, контакт соединителя и т.д.), технологический разброс волнового сопротивления линии связи (например, из-за толщины или диэлектрической проницаемости изоляции коаксиального кабеля) или разветвление линий.

В *электрически коротких* линиях связи помехи возникают из-за «паразитных» связей между различными электрическими соединениями и различными компонентами в пределах одного соединения (например, шины питания) и могут привести к сбою в работе цифровых схем. Несмотря на то

что в цифровых узлах используют схемы с небольшим коэффициентом усиления по напряжению (в  $10^4 \dots 10^5$  раз меньшим, чем, например, в аналоговых блоках РЛС), наличие большого числа параллельных связей, а также высокая плотность компоновки требуют принятия специальных мер для обеспечения ЭМС с учетом помех в электрически коротких линиях. Паразитные связи определяются конструкцией РЭС и параметрами используемых материалов (особенно диэлектрической проницаемостью). Все виды внутренних паразитных связей делят на емкостные, индуктивные и кондуктивные. Если сигнал, наводящий помеху, имеет гармонический характер, то независимо от характера паразитной связи амплитуда помехи может быть определена по формуле

$$U_{ном} = U_{ином} \cdot Z_n / (Z_n + Z_{нар}), \quad (\dots)$$

где  $U_{ном}$  - напряжение помехи на сопротивлении нагрузки  $Z_n$

$U_{ином}$  - напряжение источника помех, приложенное к линии, наводящей помеху;

$Z_{нар}$  - сопротивление паразитной связи;

$K_{нар} = Z_n / (Z_n + Z_{нар})$  - коэффициент связи по напряжению.

В общем случае сопротивление паразитной связи и сопротивление нагрузки образует делитель напряжения.

В том случае, когда паразитная связь носит емкостной характер  $Z_{нар} = 1/(\omega C_{нар})$ , где  $C_{нар}$  - паразитная емкость (емкость паразитной связи). Тогда

$$U_{ном} = U_{ином} \cdot \frac{C_{нар}}{(C_n + C_{нар})} = U_{ином} \cdot K_c,$$

где  $K_c = C_{нар} / (C_n + C_{нар})$  - коэффициент емкостной связи;

$C_n = C_{л} + C_{вых} + C_{вх}$  - емкость нагрузки, равная сумме емкостей собственно линии связи, выходной емкости передающей и входной емкости приемной схемы соответственно.

В том случае, когда паразитная емкость носит индуктивный характер, напряжение помехи

$$U_{ном} = M \cdot \frac{\partial I_1}{\partial t} = \frac{U_1 \cdot M}{L_1} = U_1 \cdot K_L$$

где  $M$  - взаимная индуктивность, Гн;

$I_1$  - ток в первом контуре, А;

$t$  - время, с;

$K_L = \frac{M}{L_1}$  - коэффициент индуктивной связи;

$L_1$  - индуктивность первого контура.

При кондуктивной связи помехи выделяются на сопротивлении  $Z_{общ}$ , которое складывается из внутреннего сопротивления шин питания  $Z_{ин}$  и внутреннего сопротивления источника питания  $Z_{ист}$ . Так как  $Z_{общ} \ll Z_n$ , то коэффициент кондуктивной связи

$$K_Z = \frac{Z_{\text{общ}}}{(Z_{\text{общ}} + Z_n)} \approx \frac{Z_{\text{общ}}}{Z_n} .$$

Природа  $Z_{\text{общ}}$  зависит от частотного спектра сигнала, наводящего помеху. Для постоянного тока и очень низких частот это в основном сопротивление дросселей фильтров, диодов выпрямителя, внутреннего сопротивления химических источников питания; для звуковых частот – активное сопротивление шин питания, емкостное сопротивление конденсаторов фильтра; на высоких частотах – индуктивное сопротивление шин питания и конденсаторов фильтра.

Чтобы оценить ожидаемое искажение сигналов и наводки (помехи), необходимо рассчитать электрические параметры линий связи ( $L_{\text{л}}, C_{\text{л}}, C_{\text{нар}}, Z_{\text{л}}, M, Z_{\text{общ}}$ ) по известным конструктивным данным:

- геометрическим размерам,
  - физическим параметрам материалов,
  - конструктивному исполнению,
  - числу и взаимному расположению взаимодействующих линий связи
- по формулам приведенным в табл. ...., а также по графикам рис. .... – рис. ....

Точность формул составляет: 5-10% для одиночного объемного проводника, одиночного проводника над экраном, экранированного проводника, коаксиального кабеля; 15-20% для пары объемных проводников над экраном; 20-30% для печатных проводников.

#### *Методы уменьшения помех в электрических соединениях цифровых узлов.*

Уменьшение помех в электрических соединениях цифровых узлов РЭС достигается схемотехническими, конструктивными и технологическими методами.

К *схемотехническим методам* относятся:

1. использование элементной базы с максимальной помехоустойчивостью;
2. применение LC-фильтров в цепях питания;
3. компенсация помех (например, использование скрученных пар проводов);
4. применение амплитудного и временного стробирования и т.д.

К *конструктивным методам* относятся:

1. уменьшение числа конструкторско-технологических типов линий связи в одной цепи;
2. ослабление паразитной связи путем разнесения источников и приемников помех либо ортогонального расположения проводников в соседних слоях печатной платы, уменьшения длины взаимодействующих участков линий, использования материалов с малой диэлектрической проницаемостью;
3. увеличение числа точек заземления и сечения шин питания;
4. частичное экранирование печатных плат или введение межобмоточных экранов в трансформаторы;

5. уменьшение размеров контактных соединений, например путем замены разъемных соединений на неразъемные, в частности эластомерные.

К *технологическим методам* относятся:

1. увеличение однородности линий одного технологического исполнения (печатный проводник, коаксиальный кабель и т.д.);
2. уменьшение разброса параметров элементов схемы благодаря изготовлению их в едином технологическом цикле (например, пар транзисторов схем ЭЛС);
3. освоение производства изделий с улучшенными свойствами (кабельных изделий с экраном, эластомерных контактов).

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ АНАЛОГОВЫХ УЗЛОВ

Аналоговые узлы имеют более широкие, чем цифровые узлы, диапазоны изменения параметров электромагнитных сигналов: амплитуды напряжений (от  $10^{-6}$  до  $10^4$  В), частоты (от 0 до 3000 ГГц), мощности (от  $10^{-14}$  Вт до сотен мегаватт), а также худшее отношение сигнал-помеха. Это усложняет обеспечение электромагнитной совместимости аналоговых узлов РЭС, которая должна осуществляться уже на этапе проектирования, так как стоимость работ по обеспечению параметров РЭС на этом этапе меньше стоимости работ по обеспечению электромагнитной совместимости на этапе производства или испытания аппаратуры.

Механизм искажения и затухания сигналов, также появления помех в аналоговых узлах такой же, как и в цифровых узлах. Однако электрически длинные линии имеют место в аналоговых узлах лишь для диапазона СВЧ, а в диапазоне ВЧ преобладают линии электрически короткие. В них наибольшее влияние оказывают паразитные связи, характер которых зависит от расстояния  $r$  между источниками и приемниками помех. Когда это расстояние меньше пяти длин волн самой высокочастотной составляющей спектра сигнала, наблюдается преобладание электрической ( $E$ ) или магнитной ( $H$ ) составляющей электромагнитного поля и соответственно емкостной или индуктивной паразитной связи. Обычно это имеет место на частотах 0...3000 Гц. Волновые сопротивления для электрической и магнитной составляющей поля являются взаимно обратными. Электрическое поле при нулевой частоте обладает высокоомным волновым сопротивлением ( $Z_E$ ), а магнитное – низкоомным ( $Z_H$ ). На расстояниях. Больших пяти длин волн (начиная с частот, больших 3000 Гц), отношение амплитуд напряженности составляющих поля  $E$  и  $H$  таково, что волновое сопротивление электромагнитного поля для вакуума  $Z_0 = 377 \text{ Ом}$ .

Напряженность ближних электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от возбуждающего его элемента, а напряженность поля излучения обратно

пропорциональна первой степени расстояния. Напряженность на конце проводной линии или волновода с увеличением расстояния падает весьма медленно, за исключением случая стоячих волн в линии, когда небольшие изменения расстояния могут приводить к значительному увеличению или уменьшению напряжения. Из вышесказанного следует, что при малых расстояниях ( $r \leq 5\lambda$ ) действуют все четыре вида связи (индуктивная, емкостная, через электромагнитное поле, через провода и волноводы). С увеличением расстояния  $r$  ( $r \geq 5\lambda$ ) прежде всего исчезают связи через ближнее электрическое и магнитное поле, затем перестает влиять электромагнитное поле излучения и на большом расстоянии влияет только связь по проводам и волноводам.

Электромагнитная совместимость аналоговых узлов обеспечивается системотехническими, схмотехническими и конструкторско-технологическими методами.

К *системотехническим методам* относятся передача аналоговой информации в цифровой форме и кодирование её с помощью помехозащищенных кодов.

К *схмотехническим методам* относятся:

1. увеличение помехозащищенности схем (исключение необоснованного использования элементов с завышенной рабочей частотой, применение схем на основе дифференциальных усилителей);
2. гальваническая развязка цепей с помощью трансформаторов или оптронов;
3. подавление помех с помощью режекторных фильтров;
4. использование амплитудного и временного стробирования;
5. использование искрогасящих цепей у разрывных контактов;
6. применение прецизионных (например, малошумящих) элементов и т.д.

Хотя применение системотехнических и схмотехнических методов приводит к усложнению схем, увеличению числа элементов, в том числе дефицитных, и в конечном итоге усложняет и удорожает РЭС, оно оправдано в тех случаях, когда проблему электромагнитной совместимости невозможно решить конструкторско-технологическими методами.

К *конструкторско-технологическим методам* относятся:

1. В усилительных схемах каскады располагать один за другим на одной линии. Такая конструкция называется линейкой.
2. При автоматическом размещении элементов на плате аналогового узла запрещается улучшать размещение элементов путем перестановки их местами, допускаемой для элементов цифровых узлов.
3. Для уменьшения переходного сопротивления контакта заземления и повышения его стабильности целесообразно выполнять его в виде монолитного (паянного или сварного), а не прижимного или разъёмного соединения.
4. Эффективным путем уменьшения длины общих участков является использование отдельной шины с нулевым потенциалом для каждой группы цепей: малосигнальных, с сигналами средней и большой

мощности. Так, в радиотехническом устройстве шины с нулевым потенциалом (земляные шины) должны выполняться отдельно для входных цепей приемника, исполнительных цепей автоматики и выходных каскадов передатчиков.

5. Кондуктивная помеха может возникнуть, если земляная шина выполнена в виде замкнутого контура, следовательно, для исключения подобной помехи необходимо разомкнуть контур.
6. Индуктивную связь можно ослабить, уменьшая площадь взаимосвязанных контуров в результате использования скрученных и бифилярных пар проводников, расположения объемных и печатных проводников вблизи плоскости с нулевым потенциалом. Обычно скрученные пары и бифиляры используют до частоты 100 кГц, коаксиальные кабели – до 100 МГц, полые волноводы – на более высоких частотах.
7. Применение экранирования.

*Обеспечение электромагнитной совместимости аналоговых узлов экранированием*

Экранирование уменьшает перекрестные помехи в требуемое число раз, однако при этом увеличивается сложность аппаратуры, её габариты, масса, стоимость. Экранирование заключается в локализации электромагнитной энергии в определенном пространстве. Поглощая и отражая поток электромагнитной энергии, создаваемой источниками поля, экран отводит его от защищаемой области. Эффективностью экранирования ( $\mathcal{E}$ ) называют отношение напряжений, токов, напряжённостей электрического и магнитного полей в экранируемой области при отсутствии и при наличии экрана:  $\mathcal{E} = \frac{U}{U'} = \frac{I}{I'} = \frac{E}{E'} = \frac{H}{H'}$ . В технике проводной связи эту величину принято оценивать в неперах:  $B = \ln \mathcal{E} = 0,115 A$ . В радиотехнике эффективность экранирования (экранное затухание) оценивают в децибелах:  $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8,7 B$ .

В ближней зоне (на низких частотах) используют экранирование электрической или магнитной составляющей поля, а в дальней зоне (на высоких частотах) – электромагнитного поля. При конструировании необходимо ясно представлять физику работы электростатического, магнитостатического и электромагнитных экранов.

*Электростатическое экранирование* основано на замыкании электрического экрана (паразитной емкости) на шину с нулевым потенциалом (корпус, «землю»). Например, помещение заземленного электростатического экрана между точками  $A$  и  $B$  (рис.....) приводит к замыканию емкостей  $C_1$  и  $C_2$  на землю, а емкость  $C_{\text{пар}}$  уменьшается до  $C'_{\text{пар}}$

(за счёт увеличения длины силовых линий поля между точками  $A$  и  $B$ ).

Эффективность экранирования  $\mathcal{E} = \frac{C_{нар}}{C'_{нар}}$ .

При выполнении электростатического экрана в виде сплошной замкнутой поверхности емкость  $C_{нар} \rightarrow 0$ , и  $\mathcal{E} \rightarrow \infty$ .

Эффективность экранирования электростатического поля не зависит от толщины и металла экрана, так как токи, протекающие по нему малы. Часто электростатические экраны выполняют в виде тонкого слоя металлизации диэлектрика (нижней стороны металлокерамического корпуса ИС, пластмассового каркаса экрана катушек индуктивности). В трансформаторах часто электростатический межобмоточный экран выполняют в виде незамкнутого кольца из медной фольги или обмотки, один конец которых соединен с «землей».

*Магнитоэлектростатические экраны* применяются для защиты от постоянного и медленноменяющихся магнитных полей (частотой 0...3000 Гц). Их изготавливают из ферромагнитных материалов (пермаллой, сталь, ферриты) с большой относительной магнитной проницаемостью. Толщина экрана из металла составляет 0,5...1,5 мм. При наличии такого экрана силовые линии магнитного поля  $H$  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 и дает сравнительно небольшой и практически одинаковый экранирующий эффект во всем диапазоне НЧ.

С ростом частоты возрастает роль вихревых токов, происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана, что эквивалентно уменьшению магнитной проницаемости, и экран переходит в электромагнитный режим работы. Магнитный экран одинаково пригоден для защиты от воздействия внешнего магнитного поля и внешнего пространства от магнитного поля, созданного источником внутри экрана.

Эффективность экранирования магнитоэлектростатическим экраном можно определить по формуле:

$$\mathcal{E} = 1 + \frac{\mu d}{D},$$

где  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала экрана;

$d$  - толщина стенок экрана;

$D$  - диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий длине стенки кубического экрана.

Рекомендации при экранировании постоянных магнитных полей:

1. применять материалы с возможно более высокой магнитной проницаемостью;

2. избегать в конструкции экрана стыков и швов с большим сопротивлением на пути магнитных силовых линий помех;
3. не допускать крепления экранируемого элемента и оболочек экрана стальными деталями, которые могут образовывать пути с малыми магнитными сопротивлениями для магнитных силовых линий поля помех;
4. повышать эффективность экрана, применяя материалы с большим значением  $\mu$  или многослойные конструкции тонких экранов, не увеличивая толщину (если вместо стали взять пермаллой с  $\mu=5000$ , то при той же толщине экрана эффективность возрастает в 3...5 раз). Конструктивно расстояние между экранирующими оболочками принимают равным расстоянию между первой оболочкой и ближайшим краем экранируемого объекта.

*Электромагнитное экранирование* применяют на частотах выше 3000Гц. Экраны изготавливают из немагнитных и ферромагнитных металлов, что дает одновременное ослабление электрической и магнитной составляющих поля. Упрощенно суть 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 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 счёт потерь на джоулеву теплоту (при протекании вихревых токов по стенкам экрана) и на перемагничивание (если экран выполнен из ферромагнитного материала).

Сталь и на высоких частотах дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные материалы, однако надо учитывать, что стальной экран может вносить значительные потери из-за своего большого удельного сопротивления и явления гистерезиса.

Плотность вихревых токов уменьшается в металлическом экране от поверхности в глубь него. Это уменьшение тем больше, чем выше частота поля и чем больше удельное сопротивление материала экрана. За глубину проникновения  $\delta$  принято расстояние, на котором плотность тока меньше, чем на поверхности, в  $e$  раз (1/2,72), т.е. составляет 0,37 плотности и напряженности на поверхности. Электрические параметры экранирующих материалов представлены в таблице.....

#### Электрические параметры экранирующих материалов

Табл. ....

Параметр	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь Э44	Сталь Э330	Пермаллой 79НМ
Удельное сопротивление Ом·мм <sup>2</sup> /м	0,0175	0,06	0,03	0,1	0,1	0,65
Удельная проводимость	$57 \cdot 10^7$	$16,6 \cdot 10^7$	$33 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$



См·мм <sup>-1</sup>						
Относительная магнитная проницаемость	1	1	1	50	100	12000
Эквивалентная глубина проникновения, мм, при частоте, Гц						
10 <sup>2</sup>	6,7000	12,4000	8,8000	-	1,540	0,380
10 <sup>3</sup>	2,1000	3,9000	2,7500	-	0,490	0,120
10 <sup>4</sup>	0,6700	1,2400	0,8800	-	0,154	0,038
10 <sup>5</sup>	0,2100	0,3900	0,2750	-	0,049	0,012
10 <sup>6</sup>	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	-	-
10 <sup>7</sup>	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	-	-
	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	-	-

Из неё видно, что начиная с частоты 10<sup>4</sup> Гц экран из любого металла толщиной 0,5...1,5 мм действует эффективно, а на частотах выше 10 МГц медная и тем более серебряная фольга толщиной около 0,1 мм дает значительный экранирующий эффект, что делает целесообразным использование фольгированного диэлектрика.

При выборе материала экрана и его толщины необходимо учитывать не только электрические свойства материала, но и его механическую прочность, массу, коррозионную стойкость, удобство изготовления, обеспечение надежного контакта с шиной нулевого потенциала, теплоотвод и т.д.

На низких частотах, когда толщина экрана  $d$  меньше глубины проникновения  $\delta$ , поверхностный эффект можно не учитывать и эффективность экранирования определять по приближенной формуле:

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left[ \frac{\omega \mu_0 \sigma D d}{2m} \right]^2},$$

где  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота;

$D$  - ширина коробки прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического экрана, см;

$d$  - толщина стенок экрана, см;

$m$  - коэффициент формы экрана ( $m=1$  для прямоугольного,  $m=2$  для цилиндрического и  $m=3$  для сферического экрана);

$\sigma$  - удельная проводимость материала экрана, См·мм<sup>-1</sup>;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$  Гн/см – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума).

На высоких частотах при  $d > \delta$  действуют оба фактора и эффективность экранирования можно определить по приближенной формуле:

$$\mathcal{E} = e^{d/\delta} \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu\delta} \right)$$

где  $D$ ,  $\delta$ ,  $d$  берутся в миллиметрах или сантиметрах.

Для уменьшения потерь при экранировании ВЧ-катушек диаметр экрана обычно в два раза превышает диаметр катушек.

На частотах  $10^8$  Гц длина волны становится соизмеримой с размерами экрана и он переходит в волновой режим работы, отличающийся колебательным характером изменения затухания электрической и магнитной волны с изменением частоты и наличием резонансов. Резонансные явления имеют место как для плоской волны, так и для электрической и магнитной составляющих поля. При резонансе происходит суммирование всех полей отраженных стоячих волн. Это приводит к уменьшению экранного затухания ( $A_э$ ), обусловленного отражением ( $A_{отп}$ ) и поглощением ( $A_{нгл}$ ) на величину, обусловленную резонансными потерями ( $A_{рез}$ ).

Эффективность экрана может снижаться при проникновении электромагнитной волны не только через материал экрана, но и по проводам, проходящим через экран к защищаемым элементам, и через отверстия и щели, предназначенные для облегчения доступа к элементам регулировки, если их размеры соизмеримы с длиной волны. Поэтому при разработке конструкции ВЧ- и СВЧ-узлов особое внимание должно быть уделено экранированию проводов и кабелей, а также обеспечению электрогерметичности волноводов и экранов.

## РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Расчёт эффективности экранирования некоторой области внутри структурного образования РЭС зависит от характера электромагнитного поля.

В общем случае ослабление поля вносимое металлическим экраном определяется выражением

$$A_э = \ln |ch(k_m t)| + \ln \left| 1 + 0,5 \left( \frac{Z_n}{Z_m} + \frac{Z_m}{Z_n} \right) \cdot th(K_m \cdot t) \right|, \quad (\text{нп})$$

где  $K_m$  - коэффициент вихревых токов,  $K_m = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma}$ ;

$Z_n$  - волновое сопротивление среды,

$$\text{для электрического поля } Z_n^E = \frac{1}{j\omega\epsilon_a r_s},$$

$$\text{для магнитного поля } Z_n^H = j\omega\mu_a r_s,$$

$Z_m$  - волновое сопротивление материала экрана,

$$Z_M = \frac{j\omega\mu_a}{K_M} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\sigma}}$$

$\omega$  - частота поля (рад/сек);

$\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость среды или материала

экрана,  $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная свободного пространства;

$\sigma$  - электрическая проводимость экрана (1/ом);

$\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды или материала;

$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0,$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2},$$

$c$  – скорость света в вакууме ( $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$ )

$\varepsilon_0 = 8,85416$  (пф/м).

$r_3$  - радиус экрана, м

$t$  - толщина экрана, м.

В области низких частот (до  $10^4$  Гц) в ближней зоне для расчёта ослабления можно воспользоваться выражением

$$A_3^E = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_n^E \cdot \sigma \cdot t \right|, \text{ нп.}$$

Для расчёта ослабления магнитного поля

$$A_3^H = \ln \left| 1 + \frac{Z_M}{2Z_{II}^H} \cdot K_M t \right| = \ln \left| 1 + \frac{\mu \cdot t}{2 \cdot r_3} \right|, \text{ нп}$$

В области низких частот для дальней зоны (при  $l \gg 5\lambda$ ) ослабление плоской волны магнитным экраном будет

$$A_3^{EH} = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_0 \sigma \cdot t \right|, \text{ нп}$$

Для расчёта ослабления полей в области частот более  $10^4$  Гц необходимо воспользоваться общим выражением ослабления полей ( $A_3$ ).

Ослабление экраном постоянного магнитного поля можно определить по выражению:

$$S = \frac{H_{\text{БЭ}}}{H} = 0,22\mu_0 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{r_0} \right)^3 \right]$$

где  $H_{\text{БЭ}}$  - напряженность поля без экрана;  
 $H_{\text{Э}}$  - напряженность поля при наличии экрана;  
 $\mu_0$  - относительная магнитная проницаемость экрана;  
 $t$  - толщина экрана;  
 $r_0$  - радиус эквивалентной сферы, объем которой равновелик  
 объёму экрана.