# Обеспечение электромагнитной совместимости ЭВС (лекция 47 – 51)

## Основные понятия ЭМС. Виды помех и пути их воздействия на конструкции ЭВС

Под электромагнитной совместимостью в приборостроении понимается обес­печение одновременной и совместной работы элементов конструкции. Источники помех разнообразны по физической природе.

В зависимости от источника помех, помехи бывают: *внутренние и внешние.*

*Внутренние помехи* – создаются источником помех, находящимся внутри ЭС, выделяют:

- электростатические;

- магнитные;

- электромагнитные;

- высокочастотные;

- от рассогласования параметров линии связи.

*Источниками электростатических помех* являются блоки электропитания, шины распределения электроэнергии, батареи, термопары, стати­ческие потенциалы, возникающие при трении.

*Источниками магнитных полей* яв­ляются трансформаторы и дроссели.

*Источником электромагнитных помех,* следует рассматривать, систему распределения электроэнергии, при наличии пульсаций выходного напряже­ния, излучающую в пространство электромагнитную энергию.

*Высокочастотные помехи* вызывают импульсные схемы ста­билизации через емкостные связи за счет излу­чения энергии. Значительные помехи создаются источниками постоянного тока, электромагнитами, электрическими двигателями, реле и исполнительными электромеханическими механизмами.

Источниками, излучающими энергию в окру­жающее пространство, являются также тактирующие и синхронизирующие схемы, контактная дуга в двигателях и реле.

*Помехи от рассогласования парамет­ров линий связи* с входными – выходными цепями электронных схем, также являются внутренними помехами.

*Внешние помехи* — это помехи от:

- сети электропитания;

- от раз­мещаемой по соседству радиоэлектронной передающей аппаратуры средствами связи, щеточными двигателями, сварочными аппаратами и т.д.;

- ат­мосферных и космических явлений.

Помехи от сети электропитания возникают из-за нестабильности напряжения и частоты. При этом затрудняется стабилизация постоянного напряжения, изменя­ется частота вращения электрических двигателей, что приводит к появлению сбоев при записи и считывании информации.

По сети электропитания возможно появление *импульсных помех*, что обусловлено перегрузкой в сети появлением пусковых токов при включении оборудования в ту же сеть.

Дейст­вие на ЭС всех прочих внешних полей по физической природе аналогично действию на ЭС внутренних помех.

Несмотря на большое разнообразие ис­точников помех, помехи в ЭС возникают через:

- гальваническую связь,

- электрическое поле;

- магнитное поле;

- электромагнитное поле.

Приемниками помех в ЭС являются:

- высокочувствительные усилители;

- линии связи;

- магнитные элементы, характеристики которых изменяются под действием полей рассеивания источников помех.

Основным способом защиты от помех является способ устранения самих источников помех.

Если таким образом можно избавиться от внешних источников помех, то внутренние источники помех в ЭС будут присутствовать всегда.

Поэтому проблема защиты от помех является актуальной и важность ее с микроминиатюризацией растет.

Для обеспе­чения электромагнитной совместимости необходимы ликвидация или максималь­ное ослабление влияния помех, источников нежелательных сигналов на элементы конструкции.

Электрические токи, протекающие по элементам конструкции, кроме основного пути, требующегося по условиям работы изделия, могут иметь и посторонние пути, в результате чего могут возникнуть паразитные электрические связи.

Степень влияния нежелательных электрических связей на элементы конструкции зависит от числовых значений паразитного тока связи и от отношения уровня нежелательного сигнала к допустимому.

,

где Ен.с. - энергия нежелательного сигнала;

Едоп. - допустимая величина энергии нежелательного сигнала.

Связь нежелательного сигнала с элементами конструкции происходит за счет паразитных токов, электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Нежелательные паразитные токи и поля в электрических цепях, широко применяемых в промышленности, возникают, когда:

- через общий источник питания происходит связь между входными и выходными каскадами приемников, передатчиков и усилителей;

- вредное влияние связи через общие цепи сильно сказывается на работе импульсных устройств;

- нежелательные сигналы могут проходить через локальные резонансные контуры и т.д.

Паразитная связь может существенно влиять на величину обратной связи, в некоторых случаях меняя ее знак на противоположный. На степень паразитной связи большое влияние оказывает характер цепи связи:

- индуктивный;

- емкостной;

- с временной задержкой и т.п.

Индуктивная цепь связи вызывает задержку прохождения сигнала на время:

,

где L - паразитная индуктивность цепи связи, нГ;

RВХ - сопротивление входному сигналу, Ом.

Емкостная цепь связи вызывает задержку прохождения сигнала на время:



где RВЫХ – выходное сопротивление, Ом;

C – паразитная емкость цепи связи, пФ.

Цепь связи может быть выполнена в виде однородной длинной линии с волновым сопротивлением:

,

где L и C – индуктивность и емкость линии.

Если сопротивление линии входному сигналу RВХ не равно ρВ, то время задержки сигнала может быть определено по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где Т - время распространения сигнала вдоль линии, с;

К - коэффициент отражения;

n – число отражений от RВХ из-за несогласованности входного и волнового сопротивлений линии.

## Помехоустойчивость и помехозащищённость ЭВС

Из всего многообразия источников помех выделяют два основных типа:

- источники с высоким волновым сопротивлением,

- источники помех, модель которых может быть представлена в виде токовой петли.

*Для источников с высоким волновым сопротивлением,* эквивалентная схема или модель может быть представлена в виде штыря (антенна-штырь), вокруг которого формируются два поля:

- относительно интенсивное электрическое поле (ЭП) и

- слабое магнитное поле (МП).

Волновое сопротивление Z:

Z = Е / Н,

где Е – напряжение поля,

Н – сила тока поля.

*Для источников помех*, моделькоторых может быть представлена в виде *токовой петли,* формируется:

- интенсивное магнитное поле и

- слабое электрическое.

Такие источники имеют малое волновое сопротивление.

Полученные относительные значения волнового сопротивления Zдействительны для области, которая находится в непосредственной близости от излучателя. При значительном удалении от излучателя, в качестве основной составляющей поля, рассматривается составляющая, которая имеет большее значение и убывает быстрее дополнительной составляющей.

В итоге волновое сопротивление Z становится равным 377 Ом, т.е. волновому сопротивлению свободного пространства.

В зависимости от характеристик помех и расстояния r между источником излучения и экраном, источники характеризуются двумя составляющими: основной электрической и дополнительной магнитной.

*Для источников с высоким волновым сопротивлением:*

- основная составляющая – электрическая, убывает пропорционально *1/r3;*

- дополнительная составляющая – магнитная*,* убывает пропорционально *1/r2.*

*Для источников помех, модель которых может быть представлена в виде токовой петли* ситуация обратная:

- магнитная составляющая убывает пропорционально *1/r3;*

- электрическая составляющая убывает пропорционально *1/r2.*

Действие источников помех в основном характеризуется тремя зонами: ближней, переходной, дальней.

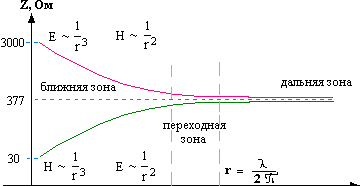


Рис. . Зоны действия источников помех

*Ближняя зона* – в которой преимущественно действует механизм индукции с достаточно четким разделением на магнитную и электрическую составляющие.

*Переходная -* зона формирования плоской электромагнитной волны.

*Дальняя* - зона действия плоской электромагнитной волны (Т-волны).

Решая вопрос экранирования необходимо разделять задачи локализации электрического, магнитного и электромагнитного полей.

Решая задачу электростатического экранирование в ближней зоне, электрическое и магнитное поля рассматривают как квазистатические (равновесные).

Характеры электрического, магнитного и статического полей, при определенных частотах совпадают.



Рис. . Экранирование статического поля

Результаты, полученные для статического случая, пригодны для использования в определенном диапазоне частот.

Следовательно, в ближней зоне проводится, по сути, экранирование статического поля.

В ближней зоне действует закон электромагнитной индукции.

Экран располагается как можно ближе к источнику, когда источник находится в пределах устройства.

В случае если источник находится вне пределов досягаемости или невозможно экранировать источник, экранируют рецептор.



Рис. . Экранирование рецепторов

Для обеспечения эффективной работы экрана, 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. Узел заземления, в первую очередь, должен обладать минимальным сопротивлением.

Основными способами выполнения узла заземления являются пайка или сварка.  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.

Экранное заземление состоит из цепи и контактов заземления. Цепь заземления состоит из общей шины заземления и заземляющих проводов, соединяющих несущие конструкции, экраны, корпуса и другие элементы изделия с шиной заземления.

Поскольку по цепи заземления протекают совместно полезные и нежелательные сигналы, имеется опасность появления наводок*.* Для ее снижения необходимо уменьшать полное электрическое сопротивление цепи заземления до величины, *не превышающей 10 Ом.* Для обеспечения такой низкой величины переходного сопротивление необходимо все контактные соединения в цепях заземления выполнять сваркой:

- для деталей из листового алюминия - контактной или под давлением;

- для литых алюминиевых деталей - аргонодуговой электросваркой.

Элементы конструкции должны быть соединены с общей шиной, но сами не должны служить такой шиной.

Шина заземления должна быть изолирована от металлических частей и проходить через всю конструкцию.

При выполнении контактного узла, соединяющего шину заземления с корпусом, необходимо принять все меры по обеспечению его коррозионной стойкости. В противном случае, контактный узел будет вести себя, как нелинейное сопротивление, вызывающее побочные паразитные наводки в широком спектре частот, что может привести к неработоспособности отдельных радиотехнических цепей и каскадов устройства ЭС.

Действие *развязывающих фильтров* состоит в ослаблении влияния напряжения источника нежелательных сигналов, поступающих по электрическим цепям изде­лия. Развязывающие фильтры устанавливаются в непосредственной близости от защищаемых элементов конструкции, особенно в высокочастотных и импульсных устройствах, с целью уменьшения паразитных монтажных связей. Фильтр может иметь с защищаемым элементом емкостную и индуктивную связь, вследствие чего можно получить не уменьшение, а увеличение нежелательного сигнала за счет на­водок на элементы фильтра от защищаемых элементов.

Поэтому сам фильтр должен быть хорошо экранирован или удален от вешних электрических, магнитных или электромагнитных полей.

Диапазон частот, где должен работать развязывающий фильтр, предъявляет к элементам фильтра определенные требования.

Так, для частот - до 0,1 МГц целесообразно использовать катушки индуктивности с магнитопроводом, а для частот выше - 1 МГц – катушки без магнитопроводом.

При сравнительно больших частотах (порядка 50-200 МГц) катушка индуктивности из-за распределенной межвитковой емкости может оказаться настроенной в последовательный резонанс, что существенно снизит сопротивление фильтра в этом диапазоне.

В этом случае применяют катушку специальной конструкции или заменяют ее резистором.

На частотах выше - 200 МГц применяют элементы с распределенными постоянными (типа линий задержки).

Тип конденсатора фильтров необходимо выбирать с учетом его реак­тивных параметров в той области частот, в которой он будет работать. При соединении элементов фильтра следует по возможности максимально уменьшать длину проводников. Уменьшить индуктивность проводников можно за счет увеличения их диаметра. В ряде случаев целесообразно использовать тонкие широкие полоски медной фольги.

## Экранирование

Различают электростатическое; магнитостатическое; электромагнитное.

Эффективность экранирования, это величина, показывающая во сколько раз интенсивность поля на данном участке, уменьшилась в результате экранирования источника излучения при выбранном способе экранирования.

Эффективность экрана SЭ, оцениваемая в децибелах как относительное ослабление поля действием экрана, можно представить суммой двух слагаемых:

SЭ= SО + Sn,

где SО и Sn – потери (ослабление поля) на отражение и поглощение.

Потери на отражение SО зависят от материала экрана, частоты и типа поля.

В зависимости от того, какое поле действует на экран, выделяют:

Е - электрическое поле;

Н - магнитное поле;

Р - плоская электромагнитная волна, в котором энергия распреде­лена равномерно, между магнитной и электрической составляющими.

Различают три вида потерь на отражение:

SО(E), SО(H), SО(P).

Потери на поглощение Sn, зависящие только от материала и частоты, опреде­ляются по формуле:

,

где a – толщина, мм;

μ – магнитная проницаемость;

g – электропроводность мате­риала;

f – частота, Гц.

*Электростатическое* экранирование состоит в замыкании электрических сило­вых линий на поверхности металлической массы экрана и передаче электрических зарядов на корпус изделия.

Выражение для определения потерь (в дБ) на отраже­ние в случае электрического поля имеет вид:

,

где r – расстояние между источником энергии и экраном, мм.

*Магнитостатическое* экранирование заключается в замыкании магнитных силовых линий в стенках магнитного экрана. Магнитостатический экран целесообразно использовать только в постоянном поле или в диапазоне низких частот. Эффективность такого экрана тем больше, чем больше его магнитная проницаемость и толщина.

Выражение для определения потерь (в дБ) на отражение в случае магнитного поля имеет вид:

.

*Электромагнитное* экранирование, или экранирование с помощью вихревых токов, основано на использовании магнитной индукции. Плоская электромагнитная волна, встречая на своем пути медный цилиндрический экран, возбуждает в нем переменные индукционные вихревые токи.

Магнитное поле этих токов будет замкнутым. Внутри цилиндра, оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами - в сторону возбуждающего поля. Результирующее поле оказывается ослабленным внутри цилиндра и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение поля из цилиндра. Таким образом, чем больше протекающие по цилиндру вихревые токи, тем больше эффективность экрана.

Выражение для определения потерь на отражение (в дБ) в случае электромагнитного поля имеет вид:

.

Эффективность экранирования зависит от формы экрана, который может быть:

- плоским (из параллельных пластин);

- цилиндрическим;

- сферическим (шаровым).

Эффективность (в дБ) плоского экрана определяется по формуле:

SПЛ = (chbd + 0,5Kshbd)-1,

где  - постоянная вихревых потоков, зависящая от абсолютной магнитной проницаемости материала;

μа – удельная проводимость материала ;

σ - удельная проводимость металла экрана;

d – толщина экрана, мм;

;

μо – магнитная проницаемость вакуума;

D – расстояние между пластинами экрана, мм.

Эффективность (в дБ) цилиндрического экрана радиусом R определяется по формуле:

,

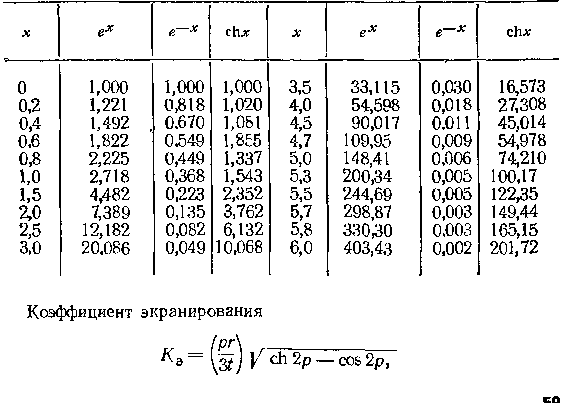
где

;

R – наружный радиус экрана, мм;

ch – гиперболический косинус;

сh – определяется по таблицам.



Эффективность (в дБ) замкнутого сферического (шарового) экрана радиусом R определяется по формуле:

.

Если R = D, то при одинаковой толщине стенок d, эффективности экранирования плоского, цилиндрического и сферического экранов находятся примерно в следующем соотношении:

SПЛ : SЦИЛ : SСФ = 1 : 2 : 3.

Приведенные выше формулы не учитывают наличия в реальных конструкциях отверстий для крепления деталей, устанавливаемых на экранах, и щелей между стенками. Проникновение энергии через эти отверстия и щели снижает эффективность экранирования на 25-50%.

Основное требование к материалу экрану – максимальная проводимость. К толщине материала требования не предъявляются.

Чаще всего используются медь, медные сплавы, алюминий.



Рис. . Конструкция экрана

Требование к конструкции экрана - экран не должен содержать щелей, отверстий, мест стыка и других неоднородностей, ориентировка которых препятствует протеканию тока в цепях заземления (1).

Если необходимо выполнить отверстия или желюзи, например, для охлаждения, то они должны быть расположены вдоль линий токов (2).

*Электростатическое экранирование* – самый простой способ экранирования ЭС. Проблемным является выполнение экрана для ЭС 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.).

При *магнитостатическом экранировании* 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 нужно. Эффективность экранирования прямо пропорциональна магнитной проницаемости μ и толщине экрана t. Поэтому для экрана следует применять материалы, имеющие максимальную магнитную проницаемость μ.

К таким материалам относятся стали и различные пермаллои (магнитомягкие материалы), которые не намагничиваются. Из таких материалов можно выполнять тонкие ленты, толщиной 10-20 мкм и магнитные сплавы с высоким значением μ. Конструкция магнитостатического экрана аналогична конструкции экрана при электростатическом экранировании.

Неоднородности экрана не должны препятствовать распространению силовых линий магнитного поля.

Сложной практической задачей является магнитное экранирование на низких частотах является. Конструкции экранов существенно усложняют и утяжеляют конструкцию.



Рис. . Магнитное экранирование на низких частотах



Рис. . Падение плоской электромагнитной волны на экран

Падение плоской электромагнитной волны на экран:

1 – падающая ЭМВ;

2 – проходящая ЭМВ;

3 – отраженная ЭМВ;

4 – снова отраженная ЭМВ;

5 – прошедшая ЭМВ;

Е1– напряженность поля без учета экрана;

Е2 – напряженность поля с учетом экрана, Е1> Е2.

Эффективность экранирования:

S = 20 ⋅ lg (E1 / E2), дБ.

Коэффициент экранирования:

Kэкр. = Е2 / Е1;

S = 20 ⋅ lg (1 / Kэкр.).

Расчет эффективности через параметры экрана:

S = R + A + B, 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 экран;

B – характеризует потери за счет многократных отражений в толще экран, величина B незначительная – 2…3 дБ. Эту величину можно приравнять к нулю.

Рассматривается три среды: *Воздух - металл - воздух.*

По сути, имеем структуру: *диэлектрик-металл-диэлектрик.*

Волновое сопротивление среды:

Z = √ jωμ / δ +jωμ

Для металла выражение будет иметь вид:

Z = √ j ωμ / σ; | Z| = ωμ / σ.

Для диэлектрика:

Zд = ± √ μ / ε .

Знак ± описывает падающую и отраженную волны. В нашем случае, для воздуха:

Zвозд. = ± √ μ0 / ε0 = 377 Ом



Рис. . Модель экрана длинной линии

Коэффициент прохождения электромагнитной волны через экран:

Kпр. = 1 – Kотр.

Суммарный коэффициент прохождения через экран:

КΣпр = K1пр ⋅ K2пр;

КΣпр = 4Z1Z2  (Z1 + Z2)2

При этом потери на отражение оцениваются следующим образом:

R = 20 ⋅ lg (1 / KΣпр).

Для металлического экрана:

Z1>> Z2 ⋅ KΣпр = 4 ⋅ Z2 / Z1.

При электромагнитном экранировании имеют место потери на поглощение экраном электромагнитной энергии. На поверхности экрана возникает скин-слой (слой в котором уменьшается плотность тока).

На определенной частоте толщина скин-слоя:

δ = 2 / ωσμ,

Скин-эффект (поверхностный эффект) — эффект уменьшения [амплитуды](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D1%82%D1%83%D0%B4%D0%B0) [электромагнитных волн](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) по мере их проникновения вглубь [проводящей среды](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA). В результате этого эффекта, например, [переменный ток](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA) высокой [частоты](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0) при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое.

  \mathbf{j} = \gamma  \mathbf{E} \Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu \omega}}\omega=2\pi \cdot f

ω – частота.

A = 20⋅ lg (et/δ) = 8,6⋅ tЭ / δ, дБ,

где tЭ – толщина экрана.



Рис. . Зависимость суммарной потери от частоты

Зависимость суммарной потери от частоты.

Суммарная потеря: S = R + A.

В точке А эффективность электромагнитного экранирования минимальна. Для электрических составляющих в целом справедливы ранее указанные правила, но добавляется эффект отражения электрического поля.

Основой магнитной составляющей являются потери на поглощение, а 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.

Экран выполняют в одной плоскости с проводниками и на отдельных слоях. Все экраны выполняют с вырезами, равномерно распределёнными по площади экрана.

Форма вырезов произвольная или в виде сетки. Вырезы на экранах следует выполнять таким образом, чтобы их площадь составляла не менее 50% от об­щей площади экрана. При необходимости допускается уменьшение площади вырезов в экранах или выполнение сплошных экранов по согласованию с заказчиком.

На экранах наружных и внутренних слоев МПП при попадании в зону экрана отверстия, электрически с ним не связанного, следует сделать вырез вокруг этого отверстия шириной, обеспечивающей электрическую прочность изоляции.

Свободные от элементов проводящего рисунка места (пробельные) на сто­роне расположения элементов проводящего рисунка, не использованные другими элементами конструкции, рекомендуется заполнять сетчатым рисунком, анало­гичным сетчатому экрану.

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.

Наиболее часто применяют специальную форму отверстия, которое называют "запредельным волноводом".

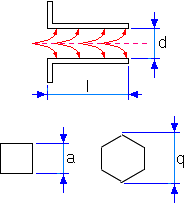


Рис. . Специальная форма отверстия в волноводе

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 в виде правильного шестиугольника ("соты").

Частота среза для волновода круглого сечения, мм:

ƒср. = 1,75 ⋅104 / d, мм, Гц.

Расчет ослаблений (эффективность экранирования) для волноводов различных сечений.

Кругового - d:

S = 32⋅ 1/ d, дБ.

Квадратного - g:

S = 27,2⋅ 1/ а, дБ.

Сечения сота - q:

S = 27 ⋅ 1/ q − 20⋅ lg Ν, дБ.

Расчет эффективности экранирования некоторой области внутри структурного образования ЭС зависит от характера электромагнитного поля.

Известно, что вблизи источника излучения (при расстояниях менее 5λ) 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 5λ) поле сформировано, и задача экранирования решается относительно электромагнитного поля.