

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

С.А. Маркелов

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Самара  
Издательство СГАУ  
2009

УДК СГАУ:537.812(075)

ББК 32.86

М 266

Рецензенты: канд. техн. наук, проф. Е. И. Татаренков  
канд. техн. наук, доц. Ю. Ф. Широков

*Маркелов С.А.*

М 266 Электромагнитная совместимость в примерах и задачах: учеб. пособие /С.А. Маркелов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 80 с.

ISBN 978-5-7883-0664-3

В сборнике представлены свыше 110 задач, охватывающих все основные разделы курса «Электромагнитная совместимость», и типовые методики их решения.

Сборник рассчитан на студентов радиотехнических факультетов технических вузов, подготавливаемых по направлению 654200 «Радиотехника» по специальности 210302.

УДК СГАУ:537.812(075)

ББК 32.86

ISBN 978-5-7883-0664-3

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2009

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
1 Источники и рецепторы электромагнитных помех .....	5
2 Оценка электромагнитной совместимости .....	9
3 Электромагнитная совместимость СВЧ устройств и антенн.....	12
3.1 Общие вопросы технической электродинамики .....	12
3.1.1 Уравнения Максвелла для описания электромагнитных полей в различных средах .....	12
3.2 Задачи, связанные с определением параметров полей и волн .....	17
3.3 Направляющие системы .....	20
3.4 Задачи, связанные с определением параметров направляющих систем .....	23
3.5 Задачи, связанные с определением параметров антенн и антенных комплексов .....	25
4 Экранирование элементов РЭА .....	30
4.1 Параметры и основные характеристики экранов .....	30
4.2 Определение основных характеристик экранирования .....	31
4.3 Расчет экранов и электрогерметичных корпусов .....	34
4.3.1 Экранирование электрического и магнитного полей .....	34
4.3.2 Электромагнитное экранирование .....	36
4.3.3 Волновой режим экранирования .....	38
4.3.4 Сравнение экранов различных конструкций .....	40
4.4. Задачи .....	43
5 Реакция элементов и устройств РЭА на экранирование .....	47
6 Задачи, решаемые с использованием компьютеров .....	53
Приложение А .....	59
Приложение Б .....	60
Б.1 Расчет неоднородных экранов .....	60
Б.2 Конструирование элементов экранов .....	63
Б.2.1 Выбор материалов и покрытий .....	63
Б.2.2 Контактные устройства и стыковочные соединения элементов экранов .....	66
Б.2.3 Экранирование вентиляционных отверстий .....	72
Б.3 Экранирование отдельных узлов и блоков РЭУ .....	74
Б.3.1 Катушки индуктивности .....	74
Б.3.2 Микросхемы .....	75
Б.3.3 Провода и кабели .....	76
Список использованных источников .....	79

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание предлагаемого сборника задач охватывает основные разделы курса «Электромагнитная совместимость и экранирование РЭА». Сборник задач содержит как задачи, заимствованные из существующих учебников, так и специально разработанные в СГАУ для практических занятий по курсу «Электромагнитная совместимость и экранирование РЭА». Сборник задач предназначен для студентов радиотехнических специальностей, чем и объясняется отличие тематики задач данного сборника от тематики большинства других сборников задач по электромагнитной совместимости, ориентированных преимущественно на анализ электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости систем радиосвязи и компьютерных систем.

# 1 ИСТОЧНИКИ И РЕЦЕПТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

1.1 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, поддерживается радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Коэффициент усиления антенны равен 36, полоса пропускания приемника 1 КГц (любительская радиосвязь). Чувствительность приемника 500 мкВ/м.

Могут ли солнечные вспышки 4-го типа нарушить связь?

1.2 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, планируется поддерживать радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Каким должен быть минимальный коэффициент усиления антенны, чтобы при полосе пропускания приемника 1 КГц и чувствительности 500 мкВ/м поддерживать радиосвязь в условиях солнечной вспышки 4-го типа?

1.3 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, поддерживается радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Коэффициент усиления антенны равен 36, полоса пропускания приемника 10 КГц (любительская радиосвязь). Чувствительность приемника 5 мкВ/м.

Могут ли солнечные вспышки 4-го типа нарушить связь?

1.4 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, планируется поддерживать радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Каким должна быть максимальная полоса пропускания приемника, чтобы при коэффициенте усиления антенны 36 и чувствительности 5 мкВ/м поддерживать радиосвязь в условиях солнечной вспышки 4-го типа?

1.5 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, поддерживается радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Коэффициент усиления антенны 36, полоса пропускания приемника 10 КГц (любительская радиосвязь).

Может ли суббуря на Юпитере нарушить радиосвязь, если чувствительность приемника 5 мкВ/м?

1.6 С помощью приемника, работающего на частоте 28,5 МГц, поддерживается радиосвязь при отношении сигнал/шум около 5 дБ. Коэффициент усиления антенны 36 (любительская радиосвязь), чувствительность приемника 1 мкВ/м.

Каким должна быть максимальная полоса пропускания приемника, чтобы поддерживать радиосвязь в условиях суббури на Юпитере?

1.7 Определить максимально допустимую полосу пропускания приемника станции дальней космической связи, работающей на частоте 3 ГГц при отношении сигнал/ шум около 5 дБ, чтобы при чувствительности приемника  $27 \times 10^{-16}$  Вт/см<sup>2</sup> и коэффициенте усиления антенны 36000 обеспечить радиосвязь с объектами в направлении, близком к направлению на радиоисточник Кассиопея – А.

1.8 На частоте 450 МГц работает приемник многоканальной подвижной диспетчерской связи, расположенный в 30 метрах от дороги и поддерживающий радиосвязь в своей зоне контроля при интенсивности движения 1 автомобиль/ мин. Полагая напряженность поля на границе зоны контроля 3 мкВ/м и полосу частот диспетчерского приемника 50 кГц, определить вероятность связи на границе зоны контроля в часы пик (интенсивность движения 100 автомобилей/мин).

1.9 На частоте 450 МГц работает приемник многоканальной подвижной диспетчерской связи, расположенный в 100 метрах от дороги и поддерживающий радиосвязь в своей зоне контроля при интенсивности движения 1 автомобиль/ мин. Полагая напряженность поля на границе зоны контроля 3 мкВ/м и полосу частот диспетчерского приемника 30 кГц, определить вероятность связи на границе зоны контроля в часы пик (интенсивность движения 100 автомобилей/мин).

1.10 Определить минимальную напряженность поля принимаемого сигнала, обеспечивающего 90% вероятность связи с вертолетом, ведущим монтажные работы на расстоянии 60 метров от ЛЭП-350, если радиосвязь ведется на частоте 5,5 МГц в полосе 5 кГц.

1.11 Как изменится вероятность связи в условиях задачи 1.9, если расстояние до вертолета, расположенного на одном уровне с ЛЭП, увеличить в 3 раза?

1.12 Как изменится вероятность связи в условиях задачи 1.9, если расстояние до вертолета, расположенного на одном уровне с ЛЭП, увеличить в 3 раза, а полосу принимаемых частот до 10 кГц?

1.13 Объяснить, почему качество приема телевизионных передач вблизи от телецентра, размещенного в крупном индустриальном городе, хуже, чем в прилегающих пригородных районах.

Вывод подтвердить расчетом отношения сигнал/шум для 9-го канала (190 МГц) и случая использования антенны с коэффициентом усиления 12 дБ (логопериодическая антенна). Приемник с полосой 6 МГц и чувствительностью 7 мкВ/м удален от телецентра в городе на 5 км, в пригороде – на 20 км.

1.14 Во сколько раз будет ослаблена помеха, если ее источник излучает горизонтально поляризованную электромагнитную волну, распространяющуюся над влажной почвой с гладкой поверхностью и имеющую длину волны 1 м. Источник расположен на высоте 6 м над поверхностью, а приемник удален от источника на 5 км и расположен на высоте 4 м. Параметры почвы:  $\epsilon = 30$ ,  $\delta = 0,02$  См/м.

1.15 Во сколько раз будет ослаблена помеха, если ее источник излучает вертикально поляризованную электромагнитную волну, распространяющуюся над влажной почвой с гладкой поверхностью и имеющую длину волны 1 м. Источник расположен на высоте 6 м над поверхностью, а приемник удален от источника на 5 км и расположен на высоте 4 м. Параметры почвы:  $\epsilon = 30$ ,  $\delta = 0,02$  См/м.

1.16 Определить напряженность поля помехи на расстоянии 250 км от источника. Помеха – монохроматический электромагнитный сигнал с длиной волны 1,2 м и мощностью 30 кВт, излучаемый с помощью антенны, имеющей коэффициент усиления, равный 1,5. Антенны источника и приемника помехи расположены на высоте 10 м над гладкой поверхностью морской воды ( $\epsilon = 80$ ,  $\delta = 4$  См/м).

1.17 Определить напряженность поля помехи на расстоянии 250 км от источника. Помеха – монохроматический электромагнитный сигнал с длиной волны 1,2 м и мощностью 30 кВт, излучаемый с помощью антенны, имеющей коэффициент усиления, равный 1,5. Антенны источника и приемника помехи расположены на высоте 10 м над морской поверхностью с волнением 4 балла. Параметры морской воды:  $\epsilon = 80$ ,  $\delta = 4$  См/м.

1.18 Определить напряженность поля помехи на расстоянии 250 км от источника. Помеха – монохроматический электромагнитный сигнал с длиной волны 1,2 м и мощностью 30 кВт, излучаемый с помощью антенны, имеющей коэффициент усиления, равный 15. Антенна источника расположена на высоте 7, а приемника помехи – на высоте 3 м над морской поверхностью с волнением 4 балла. Параметры морской воды:  $\epsilon = 80$ ,  $\delta = 4$  См/м.

1.19 Определить уровень контактной помехи, порождаемой источником электромагнитного излучения, удаленного на 125 метров от железнодорожного состава, несущего приемник контактной помехи и

движущегося со скоростью 60 км/ч. Расстройка каналов приема и излучения равна 0,5 МГц.

1.20 Определить напряженность поля контактной помехи на частоте 100 кГц, порождаемой ЛЭП-132, удаленной на 750 метров от железнодорожного состава, движущегося со скоростью 60 км/ч. При расчетах пренебречь шириной полосы излучения и полагать ее частоту равной 1 КГц.

1.21 Определить напряженность поля контактной помехи на частоте 100 кГц, порождаемой ЛЭП-350, удаленной на 150 метров от железнодорожного состава, движущегося со скоростью 60 км/ч. При расчетах пренебречь шириной полосы излучения и полагать ее частоту равной 1 КГц.

1.22 В соответствии со Строительными правилами и нормами, определяющими допустимые уровни электромагнитных полей в жилых и производственных помещениях, плотность потока магнитных полей для частот 5 Гц – 2 кГц не должна превышать 250 нТл [4,5] (нормативные материалы СН 2.2.2.542-96). Положим, что нагреватель электрочайника образован спиралью с внешним диаметром 10 см и внутренним диаметром 5 см из трех витков плоского проводника, уложенных так, что зазор между проводниками равен их ширине. Электрочайник питается от электросети с номинальным напряжением 220 вольт и частотой 50 Гц. Найти предельную мощность электрочайника, при которой пользование им (считая ручку чайника удаленной на расстояние 25 см от центра спирали) безопасно с точки зрения СН 2.2.2.542-96. Сравнить найденное значение с реальной мощностью применяемых электрочайников и сделать выводы.



## 2 ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

2.1 Оценить ЭМС передатчика РЛС и приемника тропосферной линии связи, работающих на частоте 1 ГГц и разнесенных на 400 км. Ширина диаграммы направленности антенны РЛС равна  $1^\circ$ , мощность излучения равна 100 кВт. Чувствительность приемника тропосферной линии связи равна -100 дБм. Антенны передатчика РЛС и приемника тропосферной линии связи установлены на высотах соответственно 5 и 30 метров над гладкой поверхностью сухой почвы ( $\epsilon = 80$ ,  $\delta = 0,01$  См/м).

2.2 Провести оценку ЭМС для условий задачи 2.1, при работе РЛС в весеннее время, когда почва влажная ( $\epsilon = 80$ ,  $\delta = 0,02$  См/м).

2.3 Оценить ЭМС передатчика тропосферной линии связи и приемника РЛС. Потери в линии связи 100 дБ, мощность передатчика на рабочей частоте равна одному киловатту, на частоте РЛС – 1 Вт. Приемник РЛС на своей рабочей частоте имеет чувствительность 1 мкВт, на частоте тропосферной линии связи – 0,1 Вт. Сделать амплитудную оценку помех для четырех комбинаций совпадения частот (ОО, ОП, ПП).

2.4 Провести частотную оценку помех при воздействии шумоподобного излучения КВ передатчика с шириной полосы излучения 10 кГц на приемник с шириной полосы 1 кГц. Рабочие частоты приемника и передатчика совпадают, амплитудная оценка помехи показала превышение помехи над порогом чувствительности на 80 дБ.

2.5 Провести частотную оценку помех для условий задачи 2.4, если передатчик излучает последовательность прямоугольных радиоимпульсов с частотой 1 кГц.

2.6 Провести частотную оценку помехи, если полоса частот передатчика 1 МГц, приемника – 10 кГц. Разница в восприимчивости рецептора по основному и побочному каналам приема 90 дБ, разница в мощности излучения по основному и побочному каналам 60 дБ, превышение помехой порога чувствительности по основному каналу 80 дБ.

2.7 Для условий задачи 2.6 провести частотную оценку помехи в случае импульсной модуляции излучения передатчика с частотой 1 кГц.

2.8 Определить индекс артикуляции и качественную характеристику работы радиотелефонного приемника при воздействии помех от РЛС.

Уровень полезного сигнала превышает уровень шума приемника на 10 дБ.

РЛС излучает импульсный сигнал с частотой повторения 200 Гц, а средний уровень помех от РЛС в полосе приемника на 10 дБ выше уровня шумов приемника.

Считать, что качественная характеристика работы приемника соответствует следующим диапазонам индекса артикуляции:

очень плохо	0...0,20
плохо	0,20 ... 0,35
посредственно	0,35 ... 0,50
хорошо	0,50 ... 0,70
отлично	0,70 ... 1,00

2.9 Для условий задачи 2.8 определить индекс артикуляции и качественную характеристику работы радиотелефонного приемника при воздействии помех от телевизионного передатчика, причем уровень помех превышает уровень шумов приемника на 5 дБ.

2.10 Определить качественную характеристику работы ТВ-приемника для 90% экспертной выборки при воздействии помех от двигателя внутреннего сгорания. Уровень полезного сигнала превышает уровень шумов приемника на 30 дБ, средний уровень помех в полосе приемника превышает уровень шумов на 8 дБ.

2.11 Радиолокационная станция с дальностью действия 160 км подвергается воздействию помех от системы сопровождения ракет, работающей на частоте РЛС. При этом чувствительность приемника РЛС падает на 10 дБ. Определить коэффициент уменьшения дальности действия РЛС.

2.12 Передатчик обзорной РЛС работает на частоте 1 ГГц, а СВЧ-приемник на частоте 2,3 ГГц. Определить вероятность того, что РЛС будет создавать помехи СВЧ-связи, если полоса приемника составляет 10 МГц.

2.13 Определить вероятность появления помех в навигационной системе, приемник которой находится на борту самолета, а передатчик – в аэропорту. Помехи создаются радиолокационной станцией, работающей на

частоте 220 МГц с пиковой мощностью 2 МВт и имеющей антенну с коэффициентом усиления 25 дБ.

Самолет, несущий приемник навигационной системы, находится на расстоянии 13 км от РЛС и 66 км от аэропорта.

Навигационная система работает на частоте 1,09 ГГц. Ее передатчик имеет пиковую мощность 3 кВт и работает на антенну с коэффициентом усиления 3 дБ. Приемник навигационной системы имеет уровень шумов 0,1 мВт, полосу пропускания 165 кГц и антенну с коэффициентом усиления 3 дБ.

2.14 Для условий задачи 2.13 определить вероятность появления помех, если рабочая частота навигационной системы равна 1290 МГц, а РЛС работает на частоте 430 МГц.

### 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СВЧ УСТРОЙСТВ И АНТЕНН

#### 3.1 Общие вопросы технической электродинамики

##### 3.1.1 Уравнения Максвелла для описания электромагнитных полей в различных средах

Для вакуума вводят два основных векторных объекта – напряженность электрического поля  $\vec{E}$  и напряженность магнитного поля  $\vec{H}$ . Кроме того, определяют скалярное поле объемной плотности электрического заряда  $\rho$  и векторное поле объемной плотности электрического тока  $\vec{\delta}$ , связанного с движением носителей заряда в пространстве. Система уравнений Максвелла для вакуума относительно перечисленных величин записывается в виде [3]

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{\delta}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В эти уравнения входят две фундаментальные физические константы:  
 $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  Ф/м – электрическая постоянная,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

К основным принципам электродинамики относится также закон сохранения электрического заряда, находящий свое отражение в уравнении непрерывности тока:

$$\operatorname{div} \vec{\delta} + \partial \rho / \partial t = 0. \quad (2)$$

В присутствии материальных сред теория Максвелла должна быть дополнена рядом новых представлений, учитывающих микроскопическую

структуру вещества. Под действием приложенного электрического поля  $\overline{E}$  в среде возникает ток проводимости  $\overline{\delta}$  с объемной плотностью

$$\overline{\delta} = \gamma_V \cdot \overline{E}. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma_V$  – удельная объемная проводимость вещества. Соотношение (3) есть дифференциальная форма записи закона Ома, пропорциональность между  $\overline{\delta}$  и  $\overline{E}$  в сильных электрических полях может нарушаться.

Молекулы или атомы вещества в электрическом поле испытывают поляризацию, что отображается в теории введением векторного поля электрической поляризованности  $\overline{P}$ . Данный вектор в каждой точке характеризует дипольный момент единицы объема вещества. Если электромагнитное поле изменяется во времени, то в среде возникает электрический ток поляризации с объемной плотностью  $\overline{j_{пол}} = \frac{\partial \overline{P}}{\partial t}$ .

В каждой точке среды существует вектор электрической индукции:

$$\overline{D} = \epsilon_0 \overline{E} + \overline{P}. \quad (4)$$

В линейных и изотропных средах  $\overline{P} \sim \overline{E}$  и соотношение (4) приобретает форму

$$\overline{D} = \epsilon_0 \cdot \overline{E}, \quad (5)$$

причем множитель  $\epsilon_0$  получает наименование абсолютной диэлектрической проницаемости вещества.

Магнетизм материальных сред имеет квантовую природу. В рамках классических представлений определяют вектор намагниченности  $\overline{M}$ , являющийся магнитным моментом единицы объема вещества, и вектор магнитной индукции  $\overline{B}$ , связанный с  $\overline{H}$  и  $\overline{M}$  соотношением

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M}). \quad (6)$$

В линейных и изотропных средах  $\overline{M} \sim \overline{H}$  и соотношение (6) приобретает форму

$$\overline{B} = \mu_a \overline{H}. \quad (7)$$

Причем множитель  $\mu_a$  получает наименование абсолютной магнитной проницаемости вещества.

Для отражения процессов, имеющих неэлектромагнитное происхождение, но порождающих электромагнитные поля и токи (конвективный перенос зарядов, трибоэлектрические эффекты, пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты и т. п.), вводят понятия плотности стороннего электрического тока  $\bar{\delta}_{см.э}$  и плотности стороннего магнитного тока  $\bar{\delta}_{см.м}$ .

В результате система уравнений Максвелла для среды, заполненной веществом, принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \gamma_V \bar{E} + \bar{\delta}_{см.э}, \\ \text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{\delta}_{см.м}, \\ \text{div} \bar{D} = \rho, \\ \text{div} \bar{B} = 0, \\ \text{div} \bar{\delta} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Если электромагнитные поля изменяются во времени по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , то система уравнений (8) может быть записана в комплексной форме относительно амплитуд векторов  $\bar{E}, \bar{D}, \bar{H}, \bar{B}$  и сторонних токов  $\bar{\delta}_{см.э}, \bar{\delta}_{см.м}$ .

В результате система уравнений Максвелла в комплексной форме приобретает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \dot{\bar{H}} = j\omega \dot{\bar{\epsilon}}_a \dot{\bar{E}} + \dot{\bar{\delta}}_{см.э}, \\ \text{rot} \dot{\bar{E}} = j\omega \dot{\bar{\mu}}_a \dot{\bar{H}} - \dot{\bar{\delta}}_{см.м}, \\ \text{div} \dot{\bar{D}} = \dot{\rho}, \\ \text{div} \dot{\bar{B}} = 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

Входящие в эти уравнения комплексные диэлектрические  $\dot{\bar{\epsilon}}_a$  и магнитные  $\dot{\bar{\mu}}_a$  проницаемости представлены в форме

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_a = \varepsilon'_a - j\varepsilon''_a, \\ \dot{\mu}_a = \mu'_a - j\mu''_a, \end{cases} \quad (10)$$

в которых мнимые части характеризуют необратимые превращения части энергии электромагнитного поля в энергию теплового движения. Выделение тепла может происходить как за счет токов проводимости, так и за счет внутреннего трения, сопровождающего процессы поляризации и перемagnetничивания.

Если потери в среде связаны только с наличием токов проводимости, то

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_a = \varepsilon_a - j \frac{\gamma_V}{\omega}, \\ \dot{\mu}_a = \mu_a. \end{cases} \quad (11)$$

Для произвольных механизмов тепловых потерь энергии электромагнитного поля:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_a = \varepsilon_a (1 - j \operatorname{tg} \alpha_s), \\ \dot{\mu}_a = \mu_a (1 - j \operatorname{tg} \alpha_m), \end{cases} \quad (12)$$

где величины  $\alpha_s$  и  $\alpha_m$  носят название углов диэлектрических и магнитных потерь соответственно.

Частной формой существования электромагнитного поля является плоская электромагнитная волна. Она существует в однородном пространстве, бесконечно протяженном, хотя бы по одной координате, и удовлетворяет уравнениям Гельмгольца:

$$\begin{cases} \nabla^2 \dot{\vec{E}} + k^2 \dot{\vec{E}} = 0, \\ \nabla^2 \dot{\vec{H}} + k^2 \dot{\vec{H}} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь

$$k = \omega \sqrt{\dot{\varepsilon}_a \cdot \dot{\mu}_a} = \beta - j\alpha \quad (14)$$

носит название комплексного коэффициента распространения;  $\beta$  – коэффициент фазы,  $\alpha$  – коэффициент ослабления.

Если  $\dot{\mu}_a = \mu_0$ ,  $\dot{\varepsilon}_a = \varepsilon_a (1 - j \operatorname{tg} \alpha_s)$ ,

$$\text{то } \beta = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_s}}{2}},$$

$$\beta = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + tg^2 \alpha_s}}{2}} = \beta tg \frac{\alpha_s}{2}, \quad (15)$$

где  $\lambda_0$  – длина плоской волны в вакууме.

Длина плоской волны  $\lambda$  (далее просто длина волны) есть расстояние, на котором фаза гармонических колебаний при распространении плоской волны изменяется на  $2\pi$  :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (16)$$

Плоскость равных фаз плоской волны называется фазовым фронтом. Скорость перемещения фазового фронта волны называется фазовой скоростью:

$$V_\phi = \frac{\omega}{\beta}. \quad (17)$$

Комплексные амплитуды  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в случае плоской волны пропорциональны друг другу:

$$\vec{E} = Z_c \cdot \vec{H}, \quad (18)$$

причем множитель  $Z_c$ , называемый характеристическим сопротивлением среды, связан с ее параметрами  $\varepsilon_a$  и  $\mu_a$  соотношением

$$Z_c = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_a}{\dot{\varepsilon}_a}}. \quad (19)$$

Если существует две плоские волны  $\vec{E}_x = \dot{E}_x \bar{1}_x$  и  $\vec{E}_y = \dot{E}_y \bar{1}_y$ , то в силу линейности уравнений Максвелла волна

$$\vec{E} = \dot{E}_x \bar{1}_x + \dot{E}_y \bar{1}_y \quad (20)$$

также является плоской.

В общем случае волна (20) называется волной с эллиптической поляризацией, т. к. конец вектора  $\vec{E}$  в этом случае перемещается по некоторому эллипсу с эксцентриситетом  $k_{эл}$ , называемым коэффициентом эллиптичности.

Если  $\dot{E}_x$  и  $\dot{E}_y$  синфазны, то волна (20) носит название волны с линейной поляризацией.

Если  $\dot{E}_x$  и  $\dot{E}_y$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$  и равны по амплитуде, то



$\dot{E}_y = \pm jE_x$ . Такая волна называется волной с круговой поляризацией.

Различают следующие волны круговой поляризации:

$$\dot{E}_+ = \dot{E}(\bar{1}_x + j\bar{1}_y) \text{ — волна с правой поляризацией}$$

и

$$\dot{E}_- = \dot{E}(\bar{1}_x - j\bar{1}_y) \text{ — волна с левой поляризацией.}$$

### 3.2 Задачи, связанные с определением параметров полей и волн

3.2.1 Дан прямолинейный бесконечный провод круглого сечения радиуса  $R$ , по которому протекает ток  $I$ , равномерно распределенный по сечению проводника. Найти индукцию магнитного поля в произвольной точке пространства с проводником.

3.2.2 Решить задачу 3.2.1, если проводник имеет кольцевое сечение с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ .

3.2.3 Найти электрическое поле нити, равномерно заряженной с плотностью  $\tau$ .

3.2.4 Найти поле точечного электрического заряда  $q$ .

3.2.5 Найти поле проводящего шара радиуса  $R$ , равномерно заряженного с плотностью  $\sigma$ .

3.2.6 Найти поле равномерно заряженного с плотностью  $\rho$  диэлектрического шара радиусом  $R$ , материал которого имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ .

3.2.7 Дана идеально проводящая заряженная труба, сечение которой задано радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Линейная плотность заряда  $\tau$ . Определить напряженность электрического поля в произвольной точке пространства с трубой.

3.2.8 В идеально проводящую заполненную вакуумом трубу с внутренним радиусом  $R_1$  вставлен идеально проводящий стержень радиуса  $R_2$ . Полагая систему проводников коаксиальной, определить напряженность электрического поля в пространстве между проводниками и погонную емкость получившегося конденсатора, если заряды проводников противоположны по знаку и имеют равную по абсолютной величине линейную плотность заряда  $\tau$ .

3.2.9 Решить задачу 3.2.8, если пространство между проводниками заполнено двухслойным диэлектриком с границей раздела, заданной

цилиндрической поверхностью  $R_2 < R_n < R_1$ . Слои диэлектрика имеют диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

3.2.10 В условиях задачи 3.2.8 найти магнитное поле в произвольной точке пространства, если внешняя труба имеет толщину  $t$ , токи (равные по абсолютному значению) текут по проводникам навстречу друг другу и равномерно распределены по сечению проводника.

Найти емкость сферического конденсатора, образованного сферами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , размещенными в безграничной диэлектрической среде с проницаемостью  $\varepsilon$ .

3.2.11 Найти емкость уединенного проводящего шара радиуса  $R$ , размещенного в вакууме.

3.2.12 Найти магнитное поле прямолинейной нити с током  $I$ , размещенной в вакууме.

3.2.13 Определить составляющие электрического поля плоской волны, если известна величина магнитного поля  $H$  и ориентация вектора  $\vec{H}$ , совпадающего с осью  $z$  декартовой системы координат.

3.2.14 Электромагнитное поле задано вектором магнитного поля

$$\vec{H} = 2 \frac{a}{\lambda_b} H_0 \cdot \sin \pi \frac{x}{a} \cos \omega t \cdot \vec{1}_x + H_0 \cdot \cos \pi \frac{x}{a} \sin \omega t \cdot \vec{1}_z.$$

Определить геометрическое место точек круговой поляризации.

3.2.15 Показать, что коэффициент эллиптичности не изменяется при прохождении волной однородной изотропной среды с потерями.

3.2.16 Определить коэффициент эллиптичности волны с правой поляризацией  $H_1^+$  и волны с левой поляризацией  $H_2^-$ , сдвинутых по фазе на угол  $\varphi$ .

3.2.17 Определить коэффициент эллиптичности плоской волны, образованной сложением вертикально поляризованной  $\vec{H}_1 = H_0 \cdot \vec{1}_y$  и горизонтально поляризованной  $\vec{H}_2 = 2H_0 \cdot e^{j\pi/2} \vec{1}_x$  волн.

3.2.18 Определить частоту, обеспечивающую фазовый набег  $\Delta\varphi = 4\pi$  для плоской волны, прошедшей расстояние  $\Delta Z = 3\text{ см}$  в непроводящей среде с параметрами  $\varepsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ .

3.2.19 Какова величина набега фазы при распространении электромагнитной волны с  $\lambda = 10\text{ см}$  на расстоянии  $Z = 2\text{ см}$ ?

3.2.20 Вычислить глубину проникновения волны с частотой  $10\text{ МГц}$  в среду с параметрами  $\mu = \mu_0$ ,  $\varepsilon' = 100\varepsilon_0$ ,  $\gamma_V = 2 \cdot 10^{-2}\text{ См/м}$ .

3.2.21 Выбрать толщину листов для наборного сердечника трансформатора, работающего на частоте 50 Гц. Материал сердечника имеет параметры  $\mu = 1000\mu_0$ ,  $\gamma_V = 10^7 \text{ См/м}$ .

3.2.22 Определить фазовую скорость, длину волны, напряженность магнитного поля и коэффициент затухания для плоской однородной волны с частотой 100 МГц, распространяющейся в полиэтилене с параметрами  $\varepsilon' = 2,2\varepsilon_0$ ,  $\text{tg}\alpha_s = 4 \cdot 10^4$ . Напряженность электрического поля в начале пути  $E = 1 \text{ мВ/м}$ .

3.2.23 Решить задачу 3.2.22 для частоты 10 ГГц.

3.2.24 Определить затухание плоской волны частотой 100 кГц на пути 10 мкм в металле с  $\varepsilon = \varepsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ,  $\gamma_V = 6 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ .

3.2.25 Определить предельную плотность потока мощности, переносимой плоской волной в воздухе с пробивной прочностью 30 кВ/м.

3.2.26 Найти удельные потери в коаксиальной воздушной линии с радиусами проводников  $R_1$  и  $R_2$ . Проводники медные, частота 1 ГГц.

3.2.27 Показать, что при полном отражении прошедшая волна не является поперечной.

3.2.28 Амплитуда напряженности магнитного поля волны, распространяющейся в воздухе, равна 0,1 А/м, частота – 10 МГц.

Определить мгновенную и среднюю плотности потока переносимой волной энергии.

3.2.29 Напряженность электрического и магнитного полей сферической волны в свободном пространстве описывается соотношениями:

$$\vec{E} = \vec{e}_\theta \frac{A \cdot W_0 \cdot \sin \theta}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right),$$

$$\vec{H} = \vec{e}_\varphi \frac{A \cdot \sin \theta}{r} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right).$$

Показать, что в единице объема содержится одинаковое количество энергии электрического и магнитного полей.

3.2.30 Плоская линейно-поляризованная по оси Z волна с частотой 10 МГц распространяется вдоль оси Y в несовершенном диэлектрике ( $\gamma_V = 10^{-2} \text{ См/м}$ ,  $\varepsilon' = 10\varepsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ). В точке  $X = Y = Z = 0$  амплитуда напряженности электрического поля равна  $5 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$ . Численно показать, что среднее за период значение вектора Пойнтинга через замкнутую поверхность куба со стороной 1 м равно мощности тепловых потерь в объеме этого куба.

### 3.3 Направляющие системы

Для передачи электромагнитных волн наиболее часто применяются волноводы прямоугольного и круглого сечений. Под волноводом будем понимать проводящую трубу произвольного сечения, внутри которой могут распространяться электромагнитные волны. Наиболее часто применяются волноводы прямоугольного и круглого сечений.

В волноводах с идеально проводящими стенками могут распространяться волны электрического типа ( $E$ -типа), у которых продольная составляющая электрического поля  $H_z \neq 0$ , а продольная составляющая магнитного поля  $H_z = 0$ , и магнитного типа ( $H$ -типа), у которых  $H_z \neq 0$ ,  $E_z = 0$ . Поскольку спектр волн дискретен, в обозначении конкретной волны ставятся 2 индекса по образцу  $E_{mn}$  или  $H_{mn}$ .

Каждый конкретный тип волны в волноводе может распространяться в том случае, если  $\lambda_0 < \lambda_{kp} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ , где  $\lambda_0$  – длина волны генератора,  $\lambda_{kp}$  – параметр, называемый критической длиной волны,  $\epsilon_r, \mu_r$  – параметры среды, заполняющей волновод.

Если  $\lambda_{kp}^{mn} < \lambda_{kp}^{pq}$  (где  $m, n, p, q$  – индексы соответствующего типа волны), то волна с индексами  $m, n$  называется низшей по отношению к волне с индексами  $p, q$ . Самая низшая волна называется основной.

Для прямоугольного волновода:

$$\lambda_{kp}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (21)$$

где  $a$  и  $b$  – наибольший и наименьший размеры сечения соответственно.

Для круглого волновода с волнами типа  $E_{mn}$ :

$$\lambda_{kp}^{mn} = 2\pi R / v_{mn}, \quad (22)$$

где  $R$  – радиус волновода,  $v_{mn}$  –  $n$ -й корень функции Бесселя порядка  $m$ , т.е. решение уравнения  $J_m(v_{mn}) = 0$ .

Для круглого волновода с волнами типа  $H_{mn}$ :

$$\lambda_{kp}^{mn} = 2\pi R / \mu_{mn}, \quad (23)$$

где  $J'(\mu_{mn}) = 0$ ,  $J'_m = \frac{dJ_m(x)}{dx}$  – производная функции Бесселя.

Фазовая скорость волны в волноводе, заполненном непроводящей средой с  $\mu_r$  и  $\varepsilon_r$ , определяется продольным волновым числом

$$h = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{xp}}\right)^2}. \quad (24)$$

Тогда фазовая скорость

$$V_\phi = \omega / h. \quad (25)$$

Длина волны в волноводе

$$\lambda_g = 2\pi / h. \quad (26)$$

Характеристическим сопротивлением волновода называется отношение поперечных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , обозначаемое как  $Z_g$ .

Для волн типа E:

$$Z_g^E = W_{cp} \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{xp})^2}. \quad (27)$$

Для волн типа H:

$$Z_g^H = W_{cp} / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{xp})^2}. \quad (28)$$

В (27), (28)  $W_{cp} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ , где  $\mu$ ,  $\varepsilon$  – параметры среды, заполняющей волновод.

Если максимальная напряженность электрического поля волны, бегущей в волноводе, равна  $E_0$ , то мощность  $P$ , переносимая волной, рассчитывается по формулам:

– для прямоугольного волновода сечением  $a \times b$  ( $a > b$ ) на волне  $H_{10}$

$$P = \frac{ab \sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2}}{4W_{cp}} E_0^2; \quad (29)$$

– для круглого волновода с радиусом  $R$  и волной  $H_{11}$ :

$$P = \frac{\pi R^2 E_0^2}{4,28 \cdot W_{cp}} \sqrt{1 - (\lambda / 3,41R)^2}. \quad (30)$$

Если поверхностное сопротивление стенки волновода равно  $R_s$ , то коэффициент ослабления волны  $h'$  в волноводе определяется по формулам:

– для прямоугольного волновода сечением  $a \times b$  ( $a > b$ ):

на волне  $H_{10}$ :

$$h' = \frac{R_S \left[ 1 + \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \frac{2b}{a} \right]}{W_{cp} b \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}}; \quad (31)$$

на волне  $H_{mn} (n > 0)$ :

$$h' = \frac{2R_S}{W_{cp} b \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2}} \left\{ \left( 1 + \frac{b}{a} \right) \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2 + \frac{\frac{b}{a} \left( \frac{b}{a} n^2 + m^2 \right)}{\frac{b^2 - n^2}{a^2} + m^2} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{cp}} \right)^2 \right] \right\}; \quad (32)$$

на волне  $E_{mn}$

$$h' = \frac{2R_S \left[ h^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 + m^2 \right]}{W_{cp} \cdot b \left[ n^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 + m^2 \right] \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2}}; \quad (33)$$

– для круглого волновода радиуса  $R$ :

для волн  $H_{mn}$

$$h' = \frac{R_S}{W_{cp} \cdot R \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2}} \left[ \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2 + \frac{m^2}{\mu_{mn}^2 - m^2} \right]; \quad (34)$$

для волн  $E_{mn}$

$$h' = \frac{R_S}{W_{cp} \cdot R \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{cp}} \right)^2}}. \quad (35)$$

Для передачи энергии электромагнитных волн часто применяется направляющая система из двух коаксиальных цилиндров (коаксиальная линия).

Основной волной коаксиальной линии является чисто поперечная волна типа  $T$  с  $\lambda_{кр} = \infty$ . Ближайшая к ней высшая волна – волна типа  $H$  с

$\lambda_{\text{вп}} = \pi(R_1 + R_2)$ , где  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ) - радиусы проводников коаксиальной линии.

Коаксиальная линия характеризуется волновым сопротивлением (здесь  $I$  и  $U$  - ток и напряжение соответственно):

$$\rho = \frac{U}{I_m} = \frac{W_{\text{вп}}}{2\pi} \ln R_2 / R_1. \quad (36)$$

Напряженность магнитного поля на расстоянии  $r$  от оси коаксиальной линии:

$$\bar{H}_m = \bar{i}_a \frac{I_m}{2\pi r}, \quad (37)$$

где  $I_m$  - амплитуда тока в линии.

Напряженность электрического поля на расстоянии  $r$  от оси коаксиальной линии:

$$\bar{E}_m = \bar{i}_r \frac{U_m}{r \cdot \ln(R_2 / R_1)}, \quad (38)$$

где  $U_m$  - амплитуда напряжения в линии.

Затухание основной волны в коаксиальной линии, заполненной диэлектриком с параметрами  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  и образованной проводниками с поверхностным сопротивлением  $R_s$ , находится по формуле

$$\dot{h} = \frac{\gamma_V}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} + \frac{R_s(R_1 + R_2)}{2W_{\text{вп}} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (39)$$

### 3.4 Задачи, связанные с определением параметров направляющих систем

3.4.1 Определить, какие типы волны могут распространяться в заполненном воздухом прямоугольном волноводе сечением  $2,5 \times 5 \text{ см}^2$  на частоте 7,5 ГГц.

3.4.2 Определить для идеального волновода сечением  $2,3 \times 1 \text{ см}^2$  длину волны, на которой произойдет пробой волновода, если волновод заполнен воздухом ( $E_{\text{max}} = 29 \text{ кВ/см}$ ), а передаваемая мощность равна 700 кВт.

3.4.3 Показать, что в волне основного типа прямоугольного волновода центр семейства магнитных линий совпадает с максимумом тока смещения.

3.4.4 Ввиду того, что поперечные и продольные компоненты поля направляемой волны сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , в прямоугольном волноводе могут существовать точки с круговой поляризацией магнитного поля. Найти геометрическое место этих точек на основном типе волны.

3.4.5 Волна  $H_{11}$  распространяется в пустом круглом волноводе радиуса 5 мм. Найти длину волны в волноводе, фазовую и групповую скорость для частоты 20 ГГц.

3.4.6 Мощность, передаваемая волной основного типа круглого волновода, равна 1 Вт. Найти амплитуду вектора  $\vec{E}$ , если радиус волновода равен 7,5 мм, а частота 16,6 ГГц.

3.4.7 Показать, что в круглом волноводе не могут существовать волны типа  $H_{m0}$ .

3.4.8 Показать, что в круглом волноводе не могут существовать волны типа  $E_{m0}$ .

3.4.9 Вычислить затухание основной волны прямоугольного волновода сечением  $4,5 \times 2 \text{ см}^2$ , заполненного полистиролом ( $\epsilon' = 2,6\epsilon_0$ ;  $\epsilon'' = 5 \cdot 10^{-4}\epsilon_0$ ). Волновод выполнен из меди ( $\gamma_\nu = 5,65 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ) и работает на частоте 3 ГГц.

3.4.10 Круглый волновод радиуса 1,2 см сделан из алюминия ( $\gamma_\nu = 3,54 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ) и заполнен вакуумом. Найти затухание его основной волны на частоте 10 ГГц.

3.4.11 Во сколько раз затухание волны  $H_{01}$  больше затухания волны  $H_{11}$  пустого круглого волновода радиуса 2,8 см, выполненного из меди ( $\gamma_\nu = 5,65 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ ), если работа ведется на частоте 7,5 ГГц.

3.4.12 В приближении электростатики получить соотношение для погонной емкости коаксиальной линии.

3.4.13 В приближении магнитостатики получить соотношение для погонной индуктивности коаксиальной линии.

3.4.14 Рассчитать размеры коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом, если наивысшая рабочая частота равна 1 ГГц.

3.4.15 Какова наивысшая рабочая частота коаксиальной линии с размерами  $R_1 = 5 \text{ см}$ ,  $R_2 = 10 \text{ см}$ ?

3.4.16 По коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом передается мощность 10 Вт. Найти амплитуды  $E_m$  и  $H_m$  поля в линии.



### 3.5 Задачи, связанные с определением параметров антенн и антенных комплексов

3.5.1 Определить начало и протяженность переходной зоны для параболической антенны с диаметром 9 метров в направлении  $10^\circ$  относительно главного направления излучения. Рабочая частота равна 1 ГГц.

3.5.2 Определить коэффициент усиления антенны в ближней зоне на расстоянии 30 метров от плоскости раскрыва параболической антенны диаметром 3 м, работающей на частоте 10 ГГц и обладающей номинальным коэффициентом усиления 45 дБ.

3.5.3 Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X = Y = 0$ ,  $Z = 30$  м. Антенна источника имеет ширину диаграммы направленности  $\alpha = \beta = 5^\circ$ , а направление основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 2^\circ$  и углом места  $\theta = 20^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y = 8$  км,  $Z = 60$  км, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Находится ли источник помехи на основном направлении рецептора помехи?

3.5.4 (В условиях задачи 3.5.3). Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X = Y = 0$ ,  $Z = 30$  м. Антенна источника имеет ширину диаграммы направленности  $\alpha = \beta = 5^\circ$ , а направление основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 2^\circ$  и углом места  $\theta = 20^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y = 8$  км,  $Z = 60$  км, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Определить вероятность совпадения главных лепестков диаграмм направленности рецептора и источника, если осуществляется сканирование вокруг вертикальной оси диаграммы направленности источника помехи.

3.5.5 (В условиях задачи 3.5.3). Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X = Y = 0$ ,  $Z = 30$  м. Антенна источника имеет ширину диаграммы направленности  $\alpha = \beta = 5^\circ$ , а направление основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 2^\circ$  и углом места  $\theta = 20^\circ$ . Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y = 8$  км,  $Z = 60$  км,

а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Определить вероятность совпадения осей главных лепестков диаграмм направленности рецептора и источника, если осуществляется сканирование вокруг вертикальной оси направленности рецептора помехи.

3.5.6 Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X=Y=0$ ,  $Z=30$  м. Параболическая антенна источника помехи работает на частоте 10 ГГц, имеет номинальный коэффициент усиления 45 дБ и направление ее основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 1^\circ$  и  $\theta = 64^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y = 8$  км,  $Z = 60$  м, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Находится ли рецептор помехи на основном направлении излучения источника помехи?

3.5.7 (В условиях задачи 3.5.6). Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X=Y=0$ ,  $Z=30$  м. Параболическая антенна источника помехи работает на частоте 10 ГГц, имеет номинальный коэффициент усиления 45 дБ, направление её основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 1^\circ$  и  $\theta = 64^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y=8$  км,  $Z = 60$  м, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Определить, будет ли находиться рецептор помехи на основном направлении излучения источника помехи, если при сохранении геометрического подобия переместить рецептор в ближнюю зону источника помехи в точку с координатами  $X = 44$  м,  $Y = 22$  м,  $Z = 60$  м.

3.5.8. (В условиях задачи 3.5.7). Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X=Y=0$ ,  $Z=30$  м. Параболическая антенна источника помехи работает на частоте 10 ГГц, имеет номинальный коэффициент усиления 45 дБ, направление её основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 1^\circ$  и  $\theta = 64^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y=8$  км,  $Z = 60$  м, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Определить, будет ли находиться рецептор помехи на основном направлении излучения источника помехи, если коэффициент усиления антенны источника помехи уменьшится до 36 дБ.

3.5.9 (В условиях задачи 3.5.7). Источник помехи находится в точке с декартовыми координатами  $X=Y=0$ ,  $Z=30$  м. Параболическая антенна источника помехи работает на частоте 10 ГГц, имеет номинальный коэффициент усиления 45 дБ и направление её основного излучения задается углом азимута  $\zeta = 1^\circ$  и  $\theta = 64^\circ$ .

Рецептор помехи находится в точке с координатами  $X = 16$  км,  $Y=8$  км,  $Z = 60$  м, а антенна рецептора и направление основного приема задаются углами  $\alpha = \beta = 10^\circ$ ,  $\zeta = 0^\circ$ ,  $\theta = 245^\circ$ .

Определить, будет ли находиться рецептор помехи на основном направлении излучения источника помехи, если при постоянных размерах параболоида рабочую частоту антенны источника помехи уменьшить в 20 раз (т.е. до 500 МГц).

3.5.10 В системе связи используется параболическая приемная антенна с синфазной апертурой и равномерным распределением поля в раскрыве. В направлении максимума первого бокового лепестка диаграммы приемной антенны наблюдается помеха. Для подавления помехи предлагается использовать затенение апертуры. Определить требуемое распределение поля на апертуре, полагая, что в направлении на помеху результирующая диаграмма направленности имеет нулевой уровень принимаемого сигнала.

3.5.11 В системе связи используется параболическая приемная антенна с синфазной апертурой и параболическим распределением поля  $f(r)=1-r \cdot r$ , где  $r$  – нормированное отклонение точки апертуры от центра. В направлении максимума первого бокового лепестка диаграммы приемной антенны наблюдается помеха. Для подавления помехи предлагается использовать затенение апертуры. Определить требуемое распределение поля на апертуре, полагая, что в направлении на помеху результирующая диаграмма направленности имеет нулевой уровень принимаемого сигнала.

3.5.12 В системе связи используется параболическая приемная антенна с синфазной апертурой и параболическим на пьедестале  $H$  распределением поля

$$f(r) = 1 - (1 - H) \cdot r \cdot r,$$

где  $r$  – нормированное отклонение точки апертуры от центра,  $H$  – пьедестал. Для данной антенны пьедестал  $H$  равен 0,3. В направлении максимума первого бокового лепестка диаграммы приемной антенны наблюдается помеха. Для подавления помехи предлагается использовать затенение апертуры. Определить требуемое распределение поля на апертуре, полагая, что в направлении на помеху результирующая диаграмма направленности имеет нулевой уровень принимаемого сигнала.

3.5.13 В системе связи используется линейная приемная антенна с распределением поля

$$f(x) = 1,$$

где  $x$  – нормированное отклонение точки на антенне от её геометрического центра. Во время сеансов связи предполагается появление помехи в секторе углов наблюдения от  $u = 6$  до  $u = 12$  (здесь  $u$  – нормированный угол наблюдения):

$$u = b \cdot A \cdot \sin(i),$$

где  $b$  – волновое число;  $A$  – модуль абсцисс краев антенны, если абсцисса геометрического центра антенны равна 0;  $i$  – угол наблюдения). Для подавления помехи предлагается использовать пару одинаковых дополнительных линейных излучателей, фазовые центры которых совпадают с концами основного раскрыва. Определить относительную длину дополнительных излучателей и распределение тока на них.

3.5.14 В системе связи используется линейная приемная антенна с распределением поля

$$f(x) = 1 - x \cdot x,$$

где  $x$  – нормированное отклонение точки на антенне от её геометрического центра  $x = s/A$ , где  $s$  – отклонение от центра;  $A$  – модуль абсцисс краев антенны, если абсцисса геометрического центра антенны равна 0. Во время сеансов связи предполагается появление помехи в секторе углов наблюдения от  $u=3$  до  $u=9$  (здесь  $u$  – нормированный угол наблюдения):

$$u = b \cdot A \cdot \sin(i),$$

где  $b$  – волновое число;  $A$  – модуль абсцисс краев антенны, если абсцисса геометрического центра антенны равна 0;  $i$  – угол наблюдения. Для подавления помехи предлагается использовать пару одинаковых дополнительных линейных излучателей, фазовые центры которых

совпадают с концами основного раскрыва. Определить относительную длину дополнительных излучателей и распределение тока на них.

3.5.15 В системе связи используется линейная приемная антенна с распределением поля

$$f(x) = 1,$$

где  $x$  – нормированное отклонение точки на антенне от её геометрического центра. Во время сеансов связи предполагается появление помехи в секторе углов наблюдения  $u_1 < u < u_2$  (здесь  $u$  – нормированный угол наблюдения):

$$u = b \cdot A \cdot \sin(i),$$

где  $b$  – волновое число;  $A$  – модуль абсцисс краев антенны, если абсцисса геометрического центра антенны равна 0;  $l$  – угол наблюдения. Для подавления помехи используют пару одинаковых дополнительных линейных излучателей с относительной длиной  $2 \cdot k = b \cdot l$  ( $l$  – геометрическая длина дополнительного излучателя), фазовые центры которых совпадают с концами основного раскрыва. Определить границы сектора подавления помехи  $u_1, u_2$ , если  $k = 0,16$ .

3.5.16 В системе связи используется линейная призмная антенна с распределением поля  $f(x) = 1 - x \cdot x$ , где  $x$  – нормированное отклонение точки на антенне от её геометрического центра. Во время сеансов связи предполагается появление помехи в секторе углов наблюдения  $u_1 < u < u_2$  (здесь  $u$  – нормированный угол наблюдения):

$$u = b \cdot A \cdot \sin(i),$$

где  $b$  – волновое число;  $A$  – модуль абсцисс краев антенны, если абсцисса геометрического центра антенны равна 0;  $l$  – угол наблюдения. Для подавления помехи используют пару одинаковых дополнительных линейных излучателей с относительной длиной  $2 \cdot k = b \cdot l$  ( $l$  – геометрическая длина дополнительного излучателя), фазовые центры которых совпадают с концами основного раскрыва. Определить границы сектора подавления помехи  $u_1, u_2$ , если  $k = 0,12$ .

### 4.1 Параметры и основные характеристики экранов

Экранирование имеет свои специфические особенности, обусловленные его физической сущностью, принципом действия и конкретными условиями хранения, что находит свое выражение в количественной оценке эффективности экранирования. Электромагнитный экран, защищая элементы и узлы РЭУ от помех, одновременно оказывает существенное влияние на соответствующие параметры экранированных элементов, перераспределяя внутреннее электромагнитное поле и изменяя условия прохождения сигналов по этим цепям.

Для оценки функциональных качеств экранов и электрогерметичных корпусов наиболее широко используются следующие параметры:

- коэффициент экранирования  $K_3$ , равный отношению напряженности электрического  $E_1$  или магнитного  $H_1$  поля в данной точке при наличии экрана к напряженностям  $E_0$ ,  $H_0$  в той же точке без экрана:

$$K_3 = |E_1|/|E_0| = |H_1|/|H_0|, \quad (40)$$

- экранное затухание:

$$A_3 = -20 \lg K_3, \quad (41)$$

- коэффициент реакции экрана  $R_3$ , характеризующий изменение собственных параметров экранированных элементов.

Коэффициент экранирования и коэффициент реакции экрана органически связаны и могут быть математически определены один из другого. Только совместное рассмотрение обоих коэффициентов может дать полное представление о процессах экранирования системы и позволяет выбрать оптимальную конструкцию экрана.

Полную эффективность экранирования  $A_3$  удобно оценивать в децибелах как сумму относительного ослабления поля помехи полным действием экрана, т.е. за счет потерь на поглощение  $A_{3\text{погл}}$ , и относительных потерь на отражение от наружной поверхности экрана  $A_{3\text{отп}}$ , поэтому

$$A_3 = A_{3\text{погл}} + A_{3\text{отп}}. \quad (42)$$

В зависимости от частотного диапазона помехи, материала экрана,

его конструкции и некоторых других факторов соотношение слагаемых (42) может значительно меняться.

Кроме основных характеристик экрана, возможно использование других видоизмененных параметров или новых критериев, которые помогут радиоконструктору более полно оценить качество ЭМС в различных типах конструкций.

## 4.2 Определение основных характеристик экранирования

При использовании волнового метода предполагаем, что поле помехи существует в виде распространяющихся волн и форма экрана со стороны помехи соответствует фронту падающей волны. Метод основан на рассмотрении явлений экранирования с использованием концепции падающих, отраженных и прошедших волн на границах раздела «диэлектрик – металл» и «металл – диэлектрик».

Процесс отражения и преломления электромагнитных волн представлен в следующем виде. На поверхность экрана (рис. 1) падает волна, имеющая амплитуду электрического поля, равную единице. На границе раздела часть энергии отразится обратно в область I и может быть выражена через коэффициент отражения  $\Gamma_1$ . После прохождения первой границы единичная волна будет распространяться в материале экрана с амплитудой  $A_1$ . Дойдя до второй границы, волна частично отразится с амплитудой  $B_1 = A_1 \Gamma_2$ , а частично пройдет в экранированное пространство в виде волны  $C_1 = A_1 + B_1$ . Отраженная волна  $B_1$ , дойдя до первой границы, частично пройдет в область I с амплитудой  $D_1$ , частично вновь отразится, но уже с амплитудой  $A_2$ . Эта волна будет действовать, как и волна  $A_1$ .

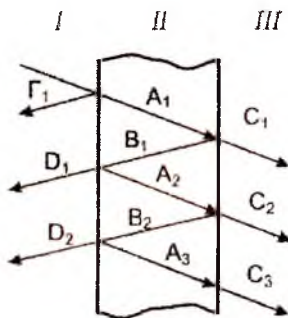


Рис. 1. Взаимодействие экрана с электромагнитным полем

В результате в системе установятся следующие последовательности волн:

$D_i$  – распространяющиеся от первой границы в свободное пространство;

$A_i$  – распространяющиеся от первой границы ко второй;

$B_i$  – распространяющиеся от второй границы к первой;

$C_i$  – распространяющиеся от второй границы в экранированное пространство.

Комплексные амплитудные фракции волн этих последовательностей связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} A_1, & & B_1 = A_1 \Gamma_2, & & C_1 = A_1 + B_1, & & D_1; \\ A_2 = B_1 e^{-2K_3 l_3} \Gamma_1, & & B_2 = A_2 \Gamma_2, & & C_2 = A_2 + B_2, & & D_2 = B_1 + A_2; \end{aligned} \quad (43)$$

---


$$A_n = \Gamma_1 B_{n-1} e^{-2(n-1)K_3 l_3}, \quad B_n = A_n \Gamma_2, \quad C_n = A_n + B_n, \quad D_n = B_{n-1} + A_n;$$

Каждая последовательность представляет убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем  $\Gamma_2^2$ .

Вычисляя предельные значения сумм этих прогрессий, найдем результирующие амплитудные функции отраженной от экрана волны:

$$E^- = E^+ \left[ \Gamma_1 + \frac{A_1 C_1 \Gamma_2 e^{-2K_3 l_3}}{1 - \Gamma_2^2 e^{-2K_3 l_3}} \right] \quad (44)$$

и волны, прошедшей в экранируемое пространство:



$$E^n = E^+ \frac{A_1 C_1 e^{-K_3 t_3}}{(1 - \Gamma_2^2) e^{-2K_3 t_3}}, \quad (45)$$

где  $E^+$  – комплексная амплитуда падающей волны;  $K_3$  – коэффициент распространения в материале стенки экрана;  $t_3$  – толщина стенки экрана.

Для металла:

$$K_3 = \sqrt{j\omega\sigma\mu_a}; \quad (46)$$

для диэлектрика:

$$K_3 = j\omega\sqrt{\mu_a\sigma}. \quad (47)$$

Преобразуя полученные выражения для определения коэффициентов экранирования  $K_3$  и реакции экрана  $R_3$ , имеем:

$$Q_3 = \frac{E^n}{E^+} = \frac{A_1 C_1 e^{-K_3 t_3}}{(1 - \Gamma_2^2) e^{-2K_3 t_3}} = \frac{1}{(chK_3 t_3) \left[ 1 + \left( \frac{Z_{c0} + Z_{c3}}{Z_{c0} - Z_{c3}} \right) \frac{thK_3 t_3}{2} \right]}, \quad (48)$$

$$R_3 = \frac{E}{E^+} = \Gamma_1 + \frac{A_1 C_1 \Gamma_2 e^{-2K_3 t_3}}{(1 - \Gamma_2^2) e^{-2K_3 t_3}} = \frac{0,5 \left( \frac{Z_{c0} + Z_{c3}}{Z_{c0} - Z_{c3}} \right) thK_3 t_3}{\left[ 1 + \left( \frac{Z_{c0} + Z_{c3}}{Z_{c0} - Z_{c3}} \right) \frac{thK_3 t_3}{2} \right]}. \quad (49)$$

В выражениях (48), (49)

$$A_1 = \frac{2Z_{c3}}{Z_{c3} + Z_{c0}}, \quad C_1 = \frac{2Z_{c0}}{Z_{c3} + Z_{c0}}, \quad (50)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_{c0} - Z_{c3}}{Z_{c3} + Z_{c0}}, \quad \Gamma_2 = \frac{Z_{c3} - Z_{c0}}{Z_{c3} + Z_{c0}}, \quad (51)$$

где  $Z_{c3}$  – характеристическое сопротивление материала экрана.

С учетом формул (41) и (42) для основной составляющей электрического поля экранное затухание  $A_3$  запишем в виде двух составляющих:

$$A_3 = A_{3\text{погл}} + A_{3\text{отр}} = 20 \lg [chK_3 t_3] + 20 \lg \left[ 1 + \left( \frac{Z_{c0} + Z_{c3}}{Z_{c0} - Z_{c3}} \right) \frac{thK_3 t_3}{2} \right]. \quad (52)$$

Первое слагаемое  $A_{3\text{погл}} = 20 \lg [chK_3 t_3]$  описывает затухание волны при распространении помехи в материале экрана.

Второе слагаемое  $A_{3\text{отр}} = 20 \lg \left[ 1 + \left( \frac{Z_{c0} + Z_{c3}}{Z_{c0} - Z_{c3}} \right) \frac{thK_3 t_3}{2} \right]$  экранного

затухания обусловлено отражением волны помехи от стенки экрана в зависимости от характеристических сопротивлений материала экрана  $Z_{cэ}$  и диэлектрика  $Z_{c0}$ , окружающего экран. Множитель  $thK_{э}t_{э}$  определяет степень влияния второй границы стенки экрана. Слагаемое  $A_{эполн}$  практически не зависит от вида поля и имеет однозначное значение для всего диапазона частот от нуля до СВЧ.

Рассмотрим более подробно основные характеристики экранов в различных режимах их использования.

## 4.3 Расчет экранов и электрогерметичных корпусов

### 4.3.1 Экранирование электрического и магнитного полей

Электромагнитостатический режим относится к стационарным полям и охватывает поля с частотным диапазоном от нуля до 4 кГц.

Для определения характеристик экранов в этом режиме преобразуем формулу (52). Для постоянного тока и низких частот затухание энергии в стенке экрана весьма мало. В этом частотном диапазоне  $K_{э}t_{э} \leq \frac{1}{4}$ ,  $chK_{э}t_{э} \rightarrow 1$  и  $A_{эполн} \rightarrow 0$ , т.е. потери в стенке экрана можно не учитывать.

Экранное затухание рассчитывается по формуле

$$A_{э} = A_{эотп} = 20 \lg \left[ 1 + \left( \frac{Z_{c0}}{Z_{cэ}} + \frac{Z_{cэ}}{Z_{c0}} \right) \frac{K_{э}t_{э}}{2} \right], \quad (53)$$

где  $Z_{c0}$  – характеристическое сопротивление окружающей среды.

Для электрического поля:

$$Z_{c0}^E = \frac{1}{j\omega\epsilon r_э}; \quad (54)$$

для магнитного поля:

$$Z_{c0}^H = j\omega\mu r_э; \quad (55)$$

для плоской волны:

$$Z_{c0} = \sqrt{Z_{c0}^E Z_{c0}^H}, \quad Z_{cэ} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}; \quad K_{э} = \sqrt{j\omega\sigma\mu}; \quad (56)$$

$r_э$  – определяющий размер экрана.

Для электростатического поля:

$$\frac{Z_{c0}^E \gg Z_{c0}}{Z_{c0}} \text{ и } A_{\text{Э}}^E = 20 \lg \left[ 1 + \frac{Z_{c0}^E K_{\text{Э}} t_{\text{Э}}}{Z_{c0} 2} \right] \quad (57)$$

или

$$A_{\text{Э}}^E = 20 \lg \left[ 1 + 0.5 Z_{c0}^E \sigma t_{\text{Э}} \right]. \quad (58)$$

Для режима магнитоэстатического поля необходимо учитывать магнитную проницаемость материала экрана.

Для магнитных экранов:

$$\frac{Z_{c0}^H > Z_{c0}^H}{Z_{c0}^H} \text{ и } A_{\text{Э}}^H = 20 \lg \left[ 1 + \frac{\mu t_{\text{Э}}}{2r_{\text{Э}}} \right]. \quad (59)$$

Для немагнитных экранов:

$$\frac{Z_{c0}^H > Z_{c0}^H}{Z_{c0}^H} \text{ и } A_{\text{Э}}^H = 20 \lg \left[ 1 + 0,5 Z_{c0}^H \sigma t_{\text{Э}} \right]. \quad (60)$$

На рис. 2 показана частотная зависимость экранного затухания для медного и стального экранов относительно электрического и магнитного полей.

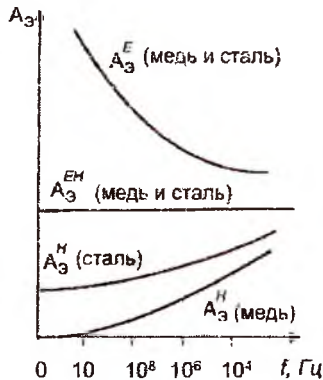


Рис. 2. Частотная зависимость экранного затухания

Экранирующий эффект электростатического экрана с ростом частоты уменьшается из-за частотной зависимости  $Z_0^E$ . Экраны из магнитных и немагнитных материалов в одинаковой степени локализуют поле помех и особых требований к типу материала, его толщине и проводимости не предъявляется. Обязательным условием высокой эффективности электростатического экранирования является заземление [4].

Эффективность магнитостатического экранирования тем больше, чем больше магнитная проницаемость  $\mu$  и чем больше толщина стенки экрана.

Для повышения экранного затухания стенки экрана делают сравнительно толстыми или применяют составные экраны из металлов с большой магнитной проницаемостью.

#### 4.3.2 Электромагнитное экранирование

Электромагнитный режим экранирования охватывает частотный диапазон от  $1 \div 10$  кГц до  $0,1 \div 1$  ГГц при размерах экрана меньше глубины проникновения. Расчет электромагнитных экранов осуществляется по формулам (48), (49) и (57). Если экран является электрически толстым ( $K_{\text{Э}}t_{\text{Э}} > 15\delta_{\text{Б}}$ ), второй границей отражения можно пренебречь и формула экранного затухания упростится:

$$A_{\text{Э}} = 20 \lg [chK_{\text{Э}}t_{\text{Э}}] + 20 \lg \left[ 1 + \frac{Z_{\text{С0}}}{Z_{\text{СЭ}}} \frac{thK_{\text{Э}}t_{\text{Э}}}{2} \right]. \quad (61)$$

Составляющая поглощения  $A_{\text{Эпогл}} = 20 \lg [chK_{\text{Э}}t_{\text{Э}}]$  обусловлена тепловыми потерями на вихревые токи. Очевидно, чем выше частота поля помехи и больше толщина экрана, тем больше эффект экранирования.

Составляющая отражения, как и в магнитостатическом режиме, определяется степенью несоответствия волновых характеристик материалов экрана и диэлектрика, окружающего экран. Составляющая отражения существенно зависит от вида поля, что обусловлено различием характеристических сопротивлений  $Z_{\text{С0}}$  и  $Z_{\text{СЭ}}$ .

На рис. 3 приведены расчетные данные составляющих экранного затухания для медного экрана. Сравнивая эффект одноразовых экранов при различных типах волн, можно констатировать, что электрическое поле экранируется лучше, чем магнитное (т.к.  $Z_{\text{С0}}^E > Z_{\text{С0}}^H$ ). Плоская электромагнитная волна по эффекту экранирования занимает промежуточное положение. Таким образом, при конструировании экранов определяющим является наличие магнитных полей и от них в первую очередь необходимо защищать РЭУ.

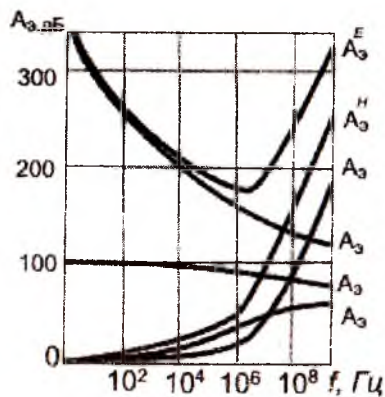


Рис. 3. Составляющие экранного затухания для медного экрана

На рис. 4 приведены значения экранного затухания для магнитных экранов из различных материалов. Анализируя представленные результаты, можно отметить, что в частотном диапазоне до 1 МГц наилучшие результаты дают медные и алюминиевые экраны, а на более высоких частотах преимущество остается за стальными экранами. Однако в ряде случаев из-за больших потерь  $A_{Эпогл}$  сталь непригодна для изготовления однослойных экранов.

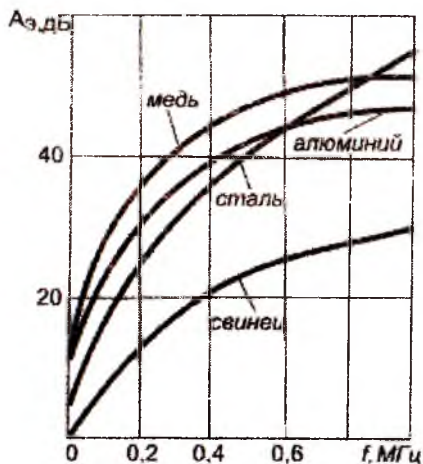


Рис. 4. Составляющие экранного затухания для магнитного экрана

Увеличение  $\mu$  обычно приводит к существенному увеличению экранного затухания ( $A_{Эпогл}$ ).  $A_{Эотр}$  при этом изменяется несущественно. С увеличением толщины экрана растет его экранирующий эффект, причем характер этого роста у магнитных и немагнитных материалов различен. Так, при изменении толщины экрана с 0,1 до 0,2 мм экранное затухание возрастает у меди на 20%, а у стали на 70%. Это объясняется тем, что в исследуемом спектре частот у магнитных материалов значительную роль играет  $A_{Эпогл}$ , а у немагнитных материалов эта составляющая очень мала.

### 4.3.3 Волновой режим экранирования

Пределом разграничения электромагнитного и волнового режимов является соизмеримость  $\lambda$  с определяющим размером экрана. В волновом режиме при определении экранного затухания исходят из полных уравнений электродинамики с учетом волн высшего порядка  $E$  и  $H$ . При расчете экранов в этом режиме следует пользоваться формулой (61), где все значения, кроме характеристических сопротивлений волн относительно электрических и магнитных полей, одинаковы, что и при электромагнитном режиме работы. Освоенностью волнового режима является колебательный характер изменения экранного затухания с ростом частоты, что связано с волновой природой СВЧ-поля (с резонансными явлениями при  $\lambda \leq D_3$ ).

На рис. 5 приведены значения экранного затухания электрического  $A_3^E$  и магнитного  $A_3^H$  СВЧ-полей и частотная зависимость составляющей поглощения  $A_{Эпогл}$ . Составляющая поглощения для обоих полей одинакова и имеет плавно возрастающий характер. Экранное затухание  $A_3$  имеет колебательный характер, что обусловлено соответствующим изменением составляющей отражения.

Сравнение формул для расчета экранного затухания в электромагнитном и волновом режимах показывает, что приращение экранного затухания сравнительно невелико. Это позволяет в СВЧ-диапазоне с достаточной для практики точностью пользоваться формулами электромагнитного режима.

В полученных формулах для расчета экранов не учитываются резонансы внутренней полости экранов и корпусов. Эти явления могут возникать при расположении источника колебаний как внутри, так и вне объема экрана и приводить к недопустимому снижению его эффективности.

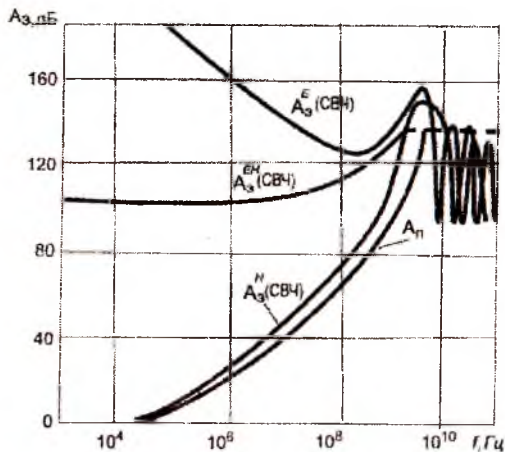


Рис. 5. Частотные зависимости экранного затухания для разных типов полей в диапазоне СВЧ

Экранное затухание при резонансе может быть представлено формулой

$$A_{з\text{рез}} = A_з - 20 \lg |R_з| = A_з - A_{\text{рез}}, \quad (62)$$

где  $A_{\text{рез}} = 20 \lg |R_з|$  – составляющая экранного затухания, обусловленная резонансными явлениями. На СВЧ коэффициент реакции экрана равен коэффициенту отражения экрана, т.е.  $R_з = \Gamma_з$ .

Для металлических экранов коэффициент отражения для плоской волны

$$\Gamma_з = - \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \omega}{\sigma_n}} \right), \quad (63)$$

где  $\sigma_n$  – эффективная поверхностная проводимость экрана.

С учетом формулы (64) значение резонансной составляющей экранного затухания представлено как

$$A_{\text{рез}} = 10 \lg \left| \frac{\sigma_n}{\varepsilon_0 \omega} \right| - 6 \text{дБ}. \quad (64)$$

Низкая резонансная частота экрана обычно вычисляется в зависимости от эквивалентного радиуса  $R$ , определяемого по формуле

$$f_{\text{рез}} \approx 1,38 \cdot 10^8 / r_з, \quad (65)$$

где  $r_3 = 0,62\sqrt{v_3}$ ,  $v_3$  – объем внутренней полости экрана.

Резонансные частоты реальных экранов не всегда соответствуют расчетным из-за наличия в экране элементов и узлов РЭУ.

Для учета сдвига резонансных частот экрана можно применять неравенство

$$\lambda_{рез} < \sqrt[3]{v_3 - v_d}, \quad (66)$$

где  $v_d$  – объем экранируемого элемента.

Собственные резонансные длины волн экранов определяются из условия  $\lambda_{рез} \approx 4r_3 / m$ , при  $m = 1, 2, 3, \dots$

Изменяя внутренние размеры экрана, можно изменять его резонансные частоты. При конструировании экранов и корпусов необходимо выбирать такие внутренние размеры полости, чтобы длина волны помехи не попадала в спектр собственных длин волн экрана (была бы больше наибольшей длины волны внутренней полости экрана).

Другая возможность изменить резонансные частоты экрана – подбор конфигурации его внутренней полости. Положительный эффект дает применение рифленого материала стенок. Кроме того, реальная поверхностная проводимость из-за конечной чистоты обработки поверхности намного меньше проводимости основного металла.

#### 4.3.4 Сравнение экранов различных конструкций

При конструировании экранов и корпусов чаще сталкиваются с конструкциями, имеющими следующие соотношения между основными геометрическими размерами:

- один из размеров намного меньше других;
- два поперечных размера сравнимы друг с другом и намного меньше третьего;

– все размеры соизмеримы друг с другом.

При расчете характеристик экранов с приемлемыми допущениями можно заменить экраны сложной формы эквивалентными экранами простой формы, т.е. плоскими, цилиндрическими и сферическими.

Характеристическое сопротивление свободного пространства при распространении электромагнитных волн полей помехи зависит от их структуры. Если характеристическое сопротивление для плоской, цилиндрической и сферической структур волн обозначить через  $Z_{C0}^n$ ,  $Z_{C0}^u$ ,  $Z_{C0}^c$  соответственно, то соотношение между ними выражается в виде

$$Z_{C0}^n : Z_{C0}^u : Z_{C0}^c = 1 : 1/2 : 1/3. \quad (67)$$



Подставляя эти соотношения в формулу (48), можно установить связь между коэффициентами экранирования для плоского, цилиндрического и сферического экранов, изготовленных из одного и того же материала и имеющих одинаковую толщину стенок.

Имеем

$$Q_3^n : Q_3^y : Q_3^c = 1 : 2 : 3. \quad (68)$$

Принимая экранное затухание плоского экрана за исходное, можно установить, что

$$\left. \begin{aligned} A_3^n &= 20 \lg |1/2Q_3^n| = A_3^n - 6\delta\text{Б}. \\ A_3^c &= 20 \lg |1/3Q_3^c| = A_3^n - 9,6\delta\text{Б}. \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

Экранное затухание однородных экранов обычно не менее 100дБ, поэтому видно, что конструктивная форма мало влияет на параметры экранирования. Решающее значение имеет материал, из которого изготовлен экран, толщина стенки и определяющий размер экрана. Незначительное влияние формы экрана на его характеристики позволяет при конструировании выбирать форму экранов и корпусов, исходя только из требований к компоновке элементов РЭУ и его технологичности.

В то же время это дает возможность, заменяя реальную форму ближайшей эквивалентной, создавать унифицированные ряды конструкций однородных экранов и корпусов.

С учетом выражений (62) и (70) экранное затухание можно записать в виде

$$A_{\Sigma} = A_{\Sigma\text{полн}} + A_{\Sigma\text{отр}} - A_{\text{рез}} - A_{\phi}, \quad (70)$$

где  $A_{\phi}$  – составляющая экранного затухания, обусловленная формой экрана ( $A_{\phi}^n = 0$ ;  $A_{\phi}^y = 6\delta\text{Б}$ ;  $A_{\phi}^c = 9,6\delta\text{Б}$ ).

Приведем два примера расчета параметров экрана.

**П р и м е р 1.** Определить экранное затухание алюминиевого экрана рефлектометра, работающего на частоте 100 -110 МГц. Исходные данные: экран цилиндрический диаметром 65 мм, высотой 70 мм и толщиной стенки 0,05 мм.

Тип волны не задан, поэтому расчет выполняем для  $E$  – волны в электромагнитном режиме. Размеры экрана соизмеримы. В качестве эквивалентной формы принимаем сферу с определяющим размером  $r_3 = 0,62\sqrt[3]{V_3} = 6,48\text{м}^2$ .

Определяем составляющую  $A_{\Sigma\text{полн}}$  экранного затухания по формуле:

$$A_{\Sigma\text{полн}} = 20 \lg |chK_3 t_3| = 20 \lg 223 = 47\delta\text{Б},$$

$$\text{где } K_3 = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = \sqrt{j} = 17,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}, \quad K_3 t_3 = 8,56\sqrt{j}.$$

Так как  $|K_{ЭтЭ}| \gg 1$ , то второй границей отражения можно пренебречь. Составляющую  $A_{Эотр}$  определим по формуле

$$A_{Эотр} = 20 \lg \left| 1 + \frac{Z_{c0}^H}{Z_{cЭ}} \frac{thK_{ЭтЭ}}{2} \right| = 20 \lg(3,94 \cdot 10^3) 72 \text{ дБ},$$

$$Z_{c0}^H = j \frac{\omega l \mu \varepsilon_0}{\sqrt{2}} = j 36,25 \text{ Ом}, \quad Z_{cЭ} = \sqrt{j \frac{\omega \mu}{\sigma}} = 4,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{j} \text{ Ом}, \quad thK_{ЭтЭ} = 1.$$

Определяем суммарное экранное затухание

$$A_{Э} = A_{Этолн} + A_{Эотр} = 47 + 72 = 119 \text{ дБ}.$$

**Пример 2.** Рассчитать параметры экрана для измерительного преобразователя мощности СВЧ. Исходные данные:  $A_{Э} = 150 \text{ дБ}$ , частота помехи – 8 – 12 ГГц, экран прямоугольный с размерами 250 x 43 x 30 мм, материал экрана – медь.

В качестве эквивалентной формы принимаем цилиндрическую, для которой  $A_{Ф} = 6 \text{ дБ}$ .

Низшую резонансную частоту внутренней полости экрана определим по формуле

$$f_{мп} = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{e}\right)^2}}, \quad f_{рез} = 8,1 \text{ ГГц}.$$

Определим резонансную составляющую экранного затухания:

$$A_{рез} = 10 \lg \left| \frac{\sigma}{\varepsilon_0 10} \right| - 6 = 10 \lg |8,3 \cdot 10^7| - 6 = 73 \text{ дБ}.$$

В заданном диапазоне частот  $K_{ЭтЭ} \gg 1$ ,  $thK_{ЭтЭ} = 1$ .

По формуле (61) рассчитаем составляющую отражения:

$$A_{Эотр} = 20 \lg \left| 1 + 0,5 \frac{Z_{c0}^H}{Z_{cЭ}} thK_{ЭтЭ} \right| = 20 \lg 1,86 \cdot 10^4 = 85 \text{ дБ}.$$

Из формулы (71) определим составляющую:

$$A_{Этолн} = A_{Э} - A_{Эотр} + A_{рез} + A_{Ф} = 150 - 85 + 73 + 6 = 144 \text{ дБ}.$$

Минимальную толщину стенки экрана определим по формуле (61).

#### 4.4. Задачи

4.4.1 Сетевой трансформатор экранируется плоским (П-образным) экраном шириной 100 мм и толщиной 2 мм. Экран выполнен из стального листа с магнитной проницаемостью  $\mu = 400$ . Определить эффективность экранирования.

4.4.2 Сетевой трансформатор экранируется плоским (П-образным) экраном шириной 100 мм и толщиной 4 мм. Экран выполнен из стального листа с магнитной проницаемостью  $\mu = 400$ . Определить эффективность экранирования.

4.4.3 Определить толщину плоского экрана из листовой стали ( $\mu = 400$ ) шириной 100 мм для экранирования сетевого трансформатора. Эффективность экранирования равна 80 дБ.

4.4.4 Определить толщину плоского экрана из листовой стали ( $\mu = 400$ ) шириной 100 мм для экранирования сетевого трансформатора. Эффективность экранирования равна 40 дБ.

4.4.5 Для ослабления индуктивной связи между двумя одинаковыми катушками индуктивности, выполненными на цилиндрических сердечниках со средним диаметром намотки, равным 2 см, применяется плоский металлический медный экран толщиной 1 мм. Считая, что катушки расположены соосно, определить коэффициент ослабления связи на частоте 10 кГц.

4.4.6 Как изменится ослабление индуктивной связи, если при условиях задачи 4.4.5 заменить медный экран на алюминиевый?

4.4.7 Рассчитать частотную зависимость коэффициента ослабления индуктивной связи между двумя одинаковыми соосно размещенными катушками индуктивности, выполненными на цилиндрических сердечниках со средним диаметром намотки, равным 2 см. Расчет провести до частоты 10 кГц, считая, что применяется плоский металлический медный экран толщиной 1 мм.

4.4.8 Для экранирования усилителя высокой частоты используется экран на принципе вытеснения магнитного поля в виде цилиндра радиусом 50 мм и толщиной 1 мм, выполненный из проводникового алюминия марки

A5 (проводимость 35.4 МСм/м). Рассчитать частотную зависимость эффективности экранирования в диапазоне частот 0,02+2 МГц.

4.4.9 Рассчитать частотную зависимость эффективности экранирования в условиях задачи 4.4.8, если экран выполнен из отожженной меди (проводимость 58.1 МСм/м). Какова причина отличий в частотных зависимостях задач 4.4.8 и 4.4.9?

4.4.10 Определить диаметр цилиндрического экрана на принципе вытеснения магнитного поля для экранирования усилителя с диапазоном рабочих частот 450+480 кГц, выполненного из проводникового алюминия марки А5 (проводимость 35.4 МСм/м) толщиной 1 мм, если требуемая эффективность экранирования равна 60 дБ.

4.4.11 Определить диаметр цилиндрического экрана на принципе вытеснения магнитного поля для экранирования усилителя с диапазоном рабочих частот 50+150 кГц, выполненного из проводникового алюминия марки А5 (проводимость 35.4 МСм/м) толщиной 1 мм, если требуемая эффективность экранирования равна 120 дБ.

4.4.12 Определить диаметр цилиндрического экрана на принципе вытеснения магнитного поля для экранирования усилителя с диапазоном рабочих частот 50+150 кГц, выполненного из отожженной меди (проводимость 58.1 МСм/м) толщиной 1 мм, если требуемая эффективность экранирования равна 120 дБ.

4.1.13 Определить наименьший диаметр цилиндрического экрана, считая, что при экранировании высокочастотного колебательного контура вносимые экраном потери колебательной мощности не должны превышать 0.01 Р, где Р – колебательная мощность, равная 10 мВт. Катушка колебательного контура имеет радиус 1 см, длина намотки 5 см, число витков катушки равно 300, по катушке протекает ток 10 мА с частотой 1 МГц. Экран выполнен из проводникового алюминия марки А5 (проводимость 35.4 МСм/м).

4.4.14 Устранение емкостной связи между источником и рецептором помехи осуществляется с помощью плоских металлических листов (электростатический экран). Считая источник и рецептор сферами с радиусом 2 см, удаленными друг от друга на 5 см, определить эффективность экранирования на частоте 1 МГц, если экран равноудален от рецептора и источника.

4.4.15 (Для условий задачи 4.4.14). Устранение емкостной связи между источником и рецептором помехи осуществляется с помощью плоских металлических листов (электростатический экран). Считая источник и рецептор сферами с радиусом 2 см, удаленными друг от друга на 5 см, определить эффективность экранирования, если в экране сделано отверстие диаметром 1 см с центром, лежащим на прямой, соединяющей источник и рецептор помехи. Считать, что источник является электрическим излучателем.

4.4.16 Как изменится эффективность экранирования экрана для условий задачи 4.4.15, если в экране сделать два отверстия диаметром 0,7 см, центры которых расположены симметрично относительно оси, соединяющей сферы источника и приемника на расстоянии 2 см от оси.

4.4.17 Определить размеры волноводного (сотового) экрана минимальной длины с эффективностью экранирования не менее 52 дБ на частоте 27 МГц, если сотовый экран предназначен для защиты воздуховода с общим сечением  $0,8 \cdot 0,8 \text{ м}^2$ .

4.4.18 Для защиты оператора применяется сетчатый металлический экран с отношением шага сетки к радиусу проволоки  $s/r=10$ . На частоте 1 ГГц определить эффективность экранирования, если шаг сетки равен 1 мм.

4.4.19 Определить толщину пленки алюминия, напыленной на стекло для защиты глаз оператора при работе на частоте 10 ГГц, обеспечивающей эффективность экранирования не менее 30 дБ.

4.4.20 Определить для частоты 220 МГц эффективность экранирования алюминиевым листом из однородной фольги толщиной 80 мкм, если листы фольги соединены внахлест по длине 5 см. Параметры материала, заполняющего промежутки между листами – слой окислов толщиной 300 мкм с диэлектрической проницаемостью, равной 5.

4.4.21 В технике сверхвысоких частот для уменьшения переходного сопротивления между фланцами волноводов применяют контактные прокладки со щеточным контактом. Определить переходное сопротивление, обеспечиваемое прокладкой, если контактное нажатие равно 10 Н.

4.4.22 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры реализуется через контактные системы различной конструкции. Определить тип пружинящего контакта контактной системы, чтобы при контактном нажатии в 3 Н обеспечить переходное сопротивление 0,2 миллиОм.

## 5 РЕАКЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ РЭА НА ЭКРАНИРОВАНИЕ

5.1 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А. Как изменится добротность контура, если катушку поместить в цилиндрический алюминиевый экран радиуса 20 мм?

5.2 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц. Как изменится резонансная частота контура, если катушку поместить в цилиндрический алюминиевый экран радиуса 20 мм?

5.3 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц. Какова полоса пропускания контура до и после экранирования катушки контура цилиндрическим алюминиевым экраном радиуса 20 мм?

5.4 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 90 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А. Каким должен быть радиус алюминиевого экрана, чтобы добротность контура изменилась после экранирования не более чем на 5 процентов?

5.5 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц.

Каким должен быть радиус алюминиевого экрана, чтобы резонансная частота контура изменилась после экранирования не более чем на 1 процент?

5.6 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц.

Как нужно изменить величину емкости конденсатора контура, чтобы после экранирования катушки алюминиевым экраном радиуса 18 мм резонансная частота контура осталась бы неизменной?

5.7 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Катушка помещена в экран, выполненный из проводникового алюминия марки А5 (проводимость 35.4 МСм/м). Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А. Как изменится добротность контура, если в качестве материала экрана выбрать отожженную медь (проводимость 58.1 МСм/м)?

5.8 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Катушка помещена в алюминиевый экран. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц. Как изменится резонансная частота контура, если катушку поместить в цилиндрический алюминиевый экран радиуса 30 мм?

5.9 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц. Какова полоса пропускания контура до и после экранирования катушки контура цилиндрическим алюминиевым экраном радиуса 30 мм?

5.10 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А. Каким должен быть радиус алюминиевого экрана, чтобы добротность контура изменилась после экранирования не более чем на 5 процентов?



Каким должен быть радиус алюминиевого экрана, чтобы добротность контура изменилась после экранирования не более чем на 5 процентов?

5.11 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц.

Каким должен быть радиус алюминиевого экрана, чтобы резонансная частота контура изменилась после экранирования не более чем на 3 процента?

5.12 Катушка индуктивности мощного колебательного контура имеет 20 витков радиуса 15 мм, намотанных на непроводящий цилиндр с длиной намотки 70 мм. Добротность контура равна 100, колебательная мощность 100 Вт, действующее значение тока в катушке равно 2 А, резонансная частота равна 1 МГц.

Как нужно изменить величину емкости конденсатора контура, чтобы после экранирования катушки алюминиевым экраном радиуса 28 мм резонансная частота контура осталась бы неизменной?

5.13 Микрополосковый СВЧ-фильтр нижних частот выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет верхнюю частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Как изменится верхняя частота полосы пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.14 Микрополосковый СВЧ-фильтр нижних частот выполнен на подложке из материала СТ-5 (относительная диэлектрическая проницаемость 5.0) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет верхнюю частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Как изменится верхняя частота полосы пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм? Сравнить полученный результат с результатом задачи 5.13. В чем причина расхождения результатов?

5.15 Микрополосковый СВЧ-фильтр нижних частот выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет верхнюю частоту полосы пропускания, равную

1 ГГц. Каково должно быть расстояние от проводников микрополосковой линии до крышки корпуса, чтобы после ее установки верхняя частота полосы пропускания изменилась бы не более, чем на 1 процент?

5.16 Микрополосковый СВЧ-фильтр верхних частот выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет нижнюю частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Как изменится нижняя частота полосы пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.17 Микрополосковый СВЧ-фильтр верхних частот выполнен на подложке из материала СТ-5 (относительная диэлектрическая проницаемость 5.0) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет нижнюю частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Как изменится нижняя частота полосы пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм? Сравнить полученный результат с результатом задачи 5.16. В чем причина расхождения результатов?

5.18 Микрополосковый СВЧ-фильтр верхних частот выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет нижнюю частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Каково должно быть расстояние от проводников микрополосковой линии до крышки корпуса, чтобы после ее установки нижняя частота полосы пропускания изменилась бы не более, чем на 1 процент?

5.19 Микрополосковый полосно-пропускающий СВЧ-фильтр выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет центральную частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц при полосе пропускания в 50 МГц. Как изменятся границы полосы пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.20 Микрополосковый полосно-пропускающий СВЧ-фильтр выполнен на подложке из материала СТ-5 (относительная диэлектрическая проницаемость 5.0) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет центральную частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Как изменится центральная частота полосы

пропускания, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.21 Микрополосковый полосно-пропускающий СВЧ-фильтр выполнен на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм. Фильтр размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке имеет центральную частоту полосы пропускания, равную 1 ГГц. Каково должно быть расстояние от проводников микрополосковой линии до крышки корпуса, чтобы после ее установки центральная частота полосы пропускания изменилась бы не более, чем на 1 процент?

5.22 Микрополосковый фазовращатель, выполненный на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм, размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке обеспечивает дополнительный набег фазы в 90 градусов на частоте 1 ГГц. Как изменится указанный набег фазы после установки крышки, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.23 Микрополосковый фазовращатель, выполненный на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм, размещен в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке обеспечивает дополнительный набег фазы в 90 градусов на частоте 1 ГГц. Каково должно быть расстояние от проводников микрополосковой линии до крышки корпуса, чтобы после ее установки указанный набег фазы изменился бы не более, чем на 5 процентов?

5.24 Для согласования активной нагрузки 40 Ом с 50-омным сопротивлением источника сигнала используется четвертьволновый отрезок микрополосковой линии, выполненный на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм, размещаемый в качестве одного из компонентов СВЧ-устройства в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке обеспечивающий требуемое согласование. Найти коэффициент отражения в месте подключения источника сигнала к четвертьволновому отрезку после установки крышки, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

5.25 Источник СВЧ-сигнала с 50-омным внутренним сопротивлением отдает в активную 40-омную нагрузку, связанную с источником сигнала

согласующим отрезком линии передач, 1 мВт мощности на частоте 1 ГГц. В качестве устройства согласования используется четвертьволновый отрезок микрополосковой линии, выполненный на подложке из поликора (относительная диэлектрическая проницаемость 9.6) толщиной 1 мм, размещаемый в качестве одного из компонентов СВЧ-устройства в рамочном корпусе из латуни Л63 и при снятой крышке обеспечивающий требуемое согласование. Найти мощность, отдаваемую в нагрузку после установки крышки, если крышка удалена от проводников микрополосковой линии на расстояние в 1 мм?

6.1 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций), устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов [1].

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) и его поверхность покрыта отверстиями диаметром 5 мм, разнесенными друг от друга в среднем на 10 мм. Толщина материала, из которого выполнен корпус, равна 2 мм.

Определить эффективность экранирования, если автомобиль проезжает на расстоянии 50 м от антенны типа электрического вибратора, создающей электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.2 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций), устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) и его поверхность покрыта отверстиями диаметром 5 мм, разнесенными друг от друга в среднем на 10 мм. Толщина материала, из которого выполнен корпус, равна 2 мм.

Определить эффективность экранирования, если автомобиль проезжает на расстоянии 50 м от антенны типа магнитного вибратора, создающей электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.3 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций) устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) из сплошных листов толщиной 3 мм, укрепленных по ребрам корпуса на каркасе с помощью винтов с шагом, близким к 40 мм. При такой технологии соединения в сплошной поверхности экрана появляются паразитные щели с эффективной высотой 0.5 мм и длиной «от винта до винта» (то есть 40 мм).

Определить эффективность экранирования, если автомобиль проезжает на расстоянии 50 м от антенны типа электрического вибратора, создающей электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.4 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций), устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) из сплошных листов толщиной 3 мм, укрепленных по ребрам корпуса на каркасе с помощью винтов с шагом, близким к 40 мм. При такой технологии соединения в сплошной поверхности экрана появляются паразитные щели с эффективной высотой 0.5 мм и длиной «от винта до винта» (то есть 40 мм).

Определить эффективность экранирования, если автомобиль проезжает на расстоянии 50 м от антенны типа магнитного вибратора, создающей электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.5 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций) устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) и его поверхность покрыта отверстиями диаметром 5 мм, разнесенными друг от друга в среднем на 10 мм. Толщина материала, из которого выполнен корпус, равна 2 мм.

Считая допустимым эффективность экранирования 60 дБ, рассчитать местоположение точек ближайшей к антенне границы парковки автомобиля, если источником электромагнитного поля является несимметричный вертикальный электрический вибратор (Г-антенна) высотой 50 м, создающий электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.6 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций) устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) и его поверхность покрыта отверстиями

диаметром 5 мм, разнесенными друг от друга в среднем на 10 мм. Толщина материала, из которого выполнен корпус, равна 2 мм.

Считая допустимым эффективность экранирования 60 дБ, рассчитать местоположение точек ближайшей к антенне границы парковки автомобиля, если источником электромагнитного поля является симметричный горизонтальный электрический вибратор с длиной плеч по 100 м, создающий электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.7 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций) устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) из сплошных листов толщиной 3 мм, укрепленных по ребрам корпуса на каркасе с помощью винтов с шагом, близким к 40 мм. При такой технологии соединения в сплошной поверхности экрана появляются паразитные щели с эффективной высотой 0.5 мм и длиной «от винта до винта» (то есть 40 мм).

Считая допустимым эффективность экранирования 60 дБ, рассчитать местоположение точек ближайшей к антенне границы парковки автомобиля, если источником электромагнитного поля является несимметричный вертикальный электрический вибратор (Т-антенна) высотой 50 м, создающий электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.8 Для защиты микропроцессорных устройств, размещаемых в автомобилях, от воздействия сильных электромагнитных полей (например, от полей радиостанций) устройства размещают в корпусах, играющих роль электромагнитных экранов.

Пусть микропроцессорное устройство размещается в корпусе с размерами  $80 \times 110 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Корпус выполнен из алюминиевого сплава Д16 (проводимость 22.7 МСм/м) из сплошных листов толщиной 3 мм, укрепленных по ребрам корпуса на каркасе с помощью винтов с шагом, близким к 40 мм. При такой технологии соединения в сплошной поверхности экрана появляются паразитные щели с эффективной высотой 0.5 мм и длиной «от винта до винта» (то есть 40 мм).

Считая допустимым эффективность экранирования 60 дБ, рассчитать местоположение точек ближайшей к антенне границы парковки автомобиля, если источником электромагнитного поля является симметричный горизонтальный электрический вибратор с длиной плеч по 100 м, создающий электромагнитное поле с частотой 300 кГц.

6.9 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры реализуется через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из листов стали с проводимостью 2.37 МСм/м, причем листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 10 см. При этом образуются щели с эффективной высотой 10 мм и длиной «от болта до болта» (то есть 10 см).

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

6.10 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры реализуется через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из листов алюминиевого сплава с проводимостью 22.7 МСм/м, причем листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 10 см. При этом образуются щели с эффективной высотой 10 мм и длиной «от болта до болта» (то есть 10 см).

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

6.11 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры происходит через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из полотна латунной сетки с проводимостью 13 МСм/м, причем полотна натянуты на деревянный каркас и пропаяны. Такая технология изготовления приводит к появлению отверстий с диаметром около 3 мм, разнесенных на 10 мм вдоль ребер каркаса. Шаг сетки 0.25 мм, диаметр проволок сетки 0.045 мм.

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы



эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

6.12 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры реализуется через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из полотен стальной сетки с проводимостью 1.3 МСм/м, причем полотна натянуты на деревянный каркас и пропаяны. Такая технология изготовления приводит к появлению отверстий с диаметром около 3 мм, разнесенных на 10 мм. Шаг сетки 2.5 мм, диаметр проволок сетки 0.125 мм.

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

6.13 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры происходит через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из листов фанеры, закрепленной на деревянном каркасе. Внутренняя поверхность камеры покрыта токопроводящей краской с поверхностным сопротивлением 5 Ом на квадрат.

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

6.14 Для настройки мощных радиопередающих устройств применяют экранированные камеры. Вход в эти камеры осуществляется через двери, контакт полотна которых с корпусом камеры происходит через контактные системы различной конструкции. Пусть камера имеет размеры  $2 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$  и служит для испытания устройств РЭА в диапазоне длин волн от 1 км до 30 м. Камера выполнена из листов алюминиевого сплава с проводимостью 22.7 МСм/м, причем листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 10 см. При этом образуются щели с эффективной высотой 10 мм и длиной «от болта до болта» (то есть 10 см). Для обеспечения надежного воздухообмена задняя стенка камеры

перфорирована с шагом 15 мм. Диаметр отверстий в зоне перфорации равен 10 мм.

Рассчитать эффективность экранирования в указанном диапазоне длин волн. Полагая допустимой из соображений безопасной работы эффективность экранирования 90 дБ, указать участки спектра, для которых допустимо испытание устройств РЭА в этой камере.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Контактные пары

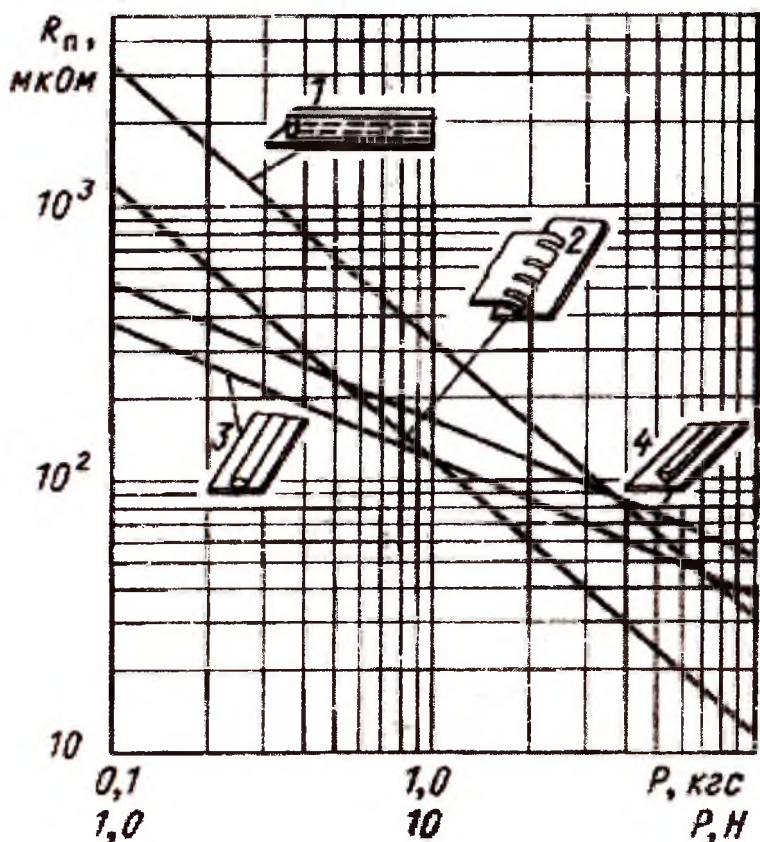


Рис. П.1. Зависимость переходного сопротивления от контактного нажатия: 1 – при плоских контактных поверхностях; 2 – для плоской поверхности со щеточным контактом; 3 – для плоской поверхности с цилиндрическим контактом; 4 – для плоской поверхности с пирамидальным контактом

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### НЕОДНОРОДНЫЕ ЭКРАНИРУЮЩИЕ ОБОЛОЧКИ

#### Б.1 РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНЫХ ЭКРАНОВ

Все ранее приведенные формулы выведены из условия однородности стенок экрана. Однако на практике редко удается создать однородную замкнутую оболочку из-за трудностей технологического и конструктивного характера. Стенки экранов конструируются из отдельных элементов, что приводит к появлению щелей, кроме того, на экранах располагают крышки для доступа к узлам РЭА, отверстия для соединительных проводов и кабелей, разъемов, переключателей, а также вентиляции. Образующиеся дополнительные пути проникновения электромагнитных помех (ЭМП) могут полностью нарушить электрогерметичность однородной экранирующей оболочки.

Класс применяемых в настоящее время экранирующих оболочек с неоднородными параметрами велик. Эффективность экранирования их в значительной степени определяется конструктивными особенностями неоднородностей.

Для учета влияния неоднородностей на эффективность экранирования рассмотрим процесс проникновения ЭМП через однородный экран и через неоднородности независимо друг от друга, для этих целей введем понятие коэффициента влияния  $k_{э}$  неоднородности, который определим по аналогии с коэффициентом экранирования через отношение напряженности  $E_j$  или  $H_j$  поля в какой-либо точке экранированного пространства при данной неоднородности на идеальном экране ( $k_{э0} = 0$ ) к напряженности поля  $E_0$  или  $H_0$  в той же точке при отсутствии этого экрана с неоднородностью.

Имеем:

$$k_{э} = \frac{E_j}{E_0} \quad \text{или} \quad k_{э} = \frac{H_j}{H_0}.$$

Введение коэффициента влияния  $k_{э}$  позволяет представить неоднородность как некоторый эквивалентный экран, имеющий коэффициент экранирования, равный коэффициенту влияния.

Используя теорию электромагнитной индукции, эквивалентный экран

можно представить тонкостенным и идеально проводящим, а электромагнитное поле (ЭМП), проникающее через такой экран, определяется как поле эквивалентного электрического или магнитного диполя, расположенного на поверхности этой оболочки [2].

Результирующее значение коэффициента экранирования неоднородной оболочки представим в виде суммы коэффициентов экранирования однородного экрана  $k_{\Sigma 0}$  и коэффициента влияния  $k_{\Sigma j}$  неоднородности:

$$k_{\Sigma} = k_{\Sigma 0} + \sum_{j=0}^n k_{\Sigma j}.$$

Значение полей ЭМП внутри эквивалентного экрана в ближней ( $R \ll \lambda/2\pi$ ) и дальней ( $R \gg \lambda/2\pi$ ) зонах определяется по формулам (44), (45), которые в этом случае представлены следующим образом:

а) для электрического диполя:

при  $R \ll \lambda/2\pi$

$$E_{\theta} = \frac{E p_{\Sigma}}{\epsilon_a R^3} \sin \theta; \quad H_{\varphi} = \frac{\omega E p_{\Sigma}}{R^2} \sin \theta; \quad (\text{П.1})$$

при  $R \gg \lambda/2\pi$

$$E_{\theta} = \frac{E p_{\Sigma}}{\epsilon_a R} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sin \theta; \quad H_{\varphi} = \frac{\omega E p_{\Sigma}}{R} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta; \quad (\text{П.2})$$

б) для магнитного диполя:

при  $R \ll \lambda/2\pi$

$$H_{\theta} = \frac{H \rho_{\Sigma}}{R^3} \sin \theta; \quad E_{\varphi} = \frac{\mu_a \omega H \rho_{\Sigma}}{R^2} \sin \theta; \quad (\text{П.3})$$

при  $R \gg \lambda/2\pi$

$$H_{\theta} = \frac{H \rho_{\Sigma}}{R} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sin \theta; \quad E_{\varphi} = \frac{\mu_a \omega H \rho_{\Sigma}}{R} \sin \theta, \quad (\text{П.4})$$

где  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного полей в месте расположения отверстия для сплошного экрана:  $p_{\Sigma}$ ,  $\rho_{\Sigma}$  – электрическая и магнитная поляризуемости отверстия.

Электрическая и магнитная поляризуемости щелевого отверстия зависят от его формы и геометрических размеров и в общем случае, когда  $a$  – длина, а  $b$  – ширина, определяются [2] с помощью формул:

$$\rho_3 = \frac{S^{3/2} \epsilon_a}{64(a/b + b/a)^{1/2}}; \quad \rho_m = S^{3/2} (b/a)^{1/2} \Phi / 64, \quad (\text{П.5})$$

где  $S = ab$  – площадь отверстия;  $\Phi = 1$  для  $b/a < 1$ ;  $\Phi = 2.23$  для  $b/a = 5$ .

Для больших отношений  $b/a$ :

$$\Phi = b / [2a \ln(0,628b/a)] \text{ для } b/a \gg 5. \quad (\text{П.6})$$

Как видно из формул, электрическая и магнитная поляризуемости квадратного и круглого отверстий одинаковой площади равны, а электрическое и магнитное поле через узкую щель проникает слабее, чем через круговое и квадратное отверстия той же площади. Но при этом, если величина проникающего электрического поля не зависит от ориентации щели, то величина магнитного поля зависит от расположения щели по отношению к вектору напряженности магнитного поля. Магнитная поляризуемость минимальна при расположении щели вдоль вихревых токов. При конструктивной необходимости расположения длинной стороны щели перпендикулярно возбуждающим токам ее необходимо разделить с помощью перемычек на ряд отверстий.

Для определения влияния нескольких неоднородностей на эффективность экранирования полагаем, что проникновение поля через каждую неоднородность происходит независимо друг от друга. Заменяв каждое отверстие эквивалентным диполем, будем считать, что в экранированной области пространства векторы напряженности поля складываются синфазно. Тогда систему отверстий в экране можно заменить эквивалентным отверстием, поляризуемость которого в  $n$  раз больше поляризуемости одного отверстия. Так как, согласно формуле (П.5), поляризуемость одного отверстия пропорциональна  $S^{3/2}$ , то при одной и той же площади перфорации эффективность экранирования будет выше у экрана с большим числом отверстий.

## Б.2 КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКРАНОВ

### Б.2.1 Выбор материалов и покрытий

При выборе материалов экранов и электрогерметичных корпусов стремятся получить наилучшие сочетания противоречивых значений показателей качества по эффективности экранирования  $k_{11}$  и механической прочности  $k_{24}$ , с одной стороны, и по массогабаритным  $k_{21}$  и  $k_{22}$  характеристикам, стоимости  $k_{35}$  и технологичности, с другой стороны.

Для изготовления стенок экранов и корпусов могут применяться металлы, поглощающие материалы и диэлектрики, а в многослойных экранах – диэлектрики, металлы, поглощающие материалы и полупроводники в разных сочетаниях.

#### *Металлические материалы*

Для электромагнитного экранирования успешно применяют тонколистовые материалы из стали, меди, алюминия и латуни. Требованию устойчивости против коррозии удовлетворяют все указанные металлы при использовании соответствующих защитных покрытий.

Эффективность экранирования магнитными и немагнитными материалами зависит от частоты и структуры поля. Пока экран работает в магнитостатическом режиме, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных. В полосе более высоких частот, где эффективность экранирования за счет отражения больше составляющей поглощения, немагнитные материалы, обладающие большой проводимостью по сравнению с магнитными, обеспечивают большую эффективность. На еще более высоких частотах, где экранирующие свойства проявляются больше за счет поглощения, влияние магнитных материалов на общую эффективность экранирования усиливается. В реальных экранах указанные свойства магнитных и немагнитных материалов проявляются слабо. Преимущественное применение стали здесь определяется условиями экономичности и технологичности конструкции.

Преимущество магнитных материалов теряется при экранировании элементов РЭУ, критичных к вносимым в них потерям.

Практика доказала, что в широком диапазоне частот для обеспечения экранного затухания в 100 дБ более целесообразно применять листовую сталь, позволяющую при изготовлении и монтаже экранов использовать

сварку. Толщина стали выбирается из назначения конструкции экрана и условий его сборки.

При изготовлении экранов необходимо учитывать, что электротехнические свойства металлов в значительной мере зависят от вида механической обработки. Удельная проводимость и магнитные свойства при деформации металла из-за наклепа существенно ухудшаются, что приводит к снижению эффективности экранирования, поэтому технология изготовления должна предусматривать операции отжига с целью восстановления электротехнических свойств материала.

### ***Фольговые материалы***

На радиочастотах только малая часть стенок металлических экранов нужна для обеспечения необходимого экранирования, остальная часть обеспечивает прочность конструкции. Естественно, возникает сомнение в целесообразности применения дорогостоящего металла, тем более, что во многих случаях представляется возможной его замена. С этой целью для экранирования успешно могут быть использованы фольговые материалы, монтаж которых на диэлектрическом основании осуществляется приклеиванием.

Фольговые материалы толщиной 0,01-0,05 мм изготавливаются из диамагнитных материалов (алюминий, латунь, медь, цинк). Клей выбирается с учетом условий эксплуатации экрана, к которым, в первую очередь, следует отнести температурный режим, влажность, вибрационные перегрузки.

Эффективность фольговых материалов достаточно высока при работе экранов в электростатическом или электромагнитном полях. Магнитную составляющую такие материалы ослабляют сравнительно мало и тем меньше, чем больше длина волн.

Металлизация поверхностей наиболее часто осуществляется распылением расплавленного металла струей сжатого воздуха. Покрытие состоит из наслоения различного размера частиц металла и окисных пленок. Металлы наносятся на картон, дерево, пластмассу и другие материалы. Слой металла держится прочно в пределах тех механических нагрузок и деформации, для которых не разрушается подложка.

Наиболее технологично цинковое покрытие, обеспечивающее сравнительно высокую эффективность экранирования и обладающее достаточной механической прочностью. Так, для получения экранного затухания более 100 дБ на частоте 100 МГц толщина цинкового покрытия должна составлять 0,1 мм. У алюминиевого покрытия эффективность экранирования на 20 дБ выше, но оно менее технологично, чем цинковое.

Металлизация поверхности может применяться для экранирования



отдельных отсеков РЭУ при неметаллических несущих конструкциях, пластмассовых корпусах аппаратуры, кабин. На металлизированные поверхности можно впаять контакты заземления.

Токопроводящие краски создаются на основе диэлектрических пленкообразующих материалов с добавлением в них проводящих составляющих, в ряде случаев – пластификатора и отвердителя. В качестве токопроводящих составляющих используются коллоидное серебро, графит, сажа, окислы металлов, порошковая медь и алюминий, наилучшие результаты дает использование ацетиленовой сажи и графита. Металлические порошки при смешивании с пленкообразующими материалами и растворителем окисляются и проводимость покрытия существенно уменьшается.

Использование токопроводящих красок исключает необходимость проведения сложных и трудоемких работ по монтажу экранов. Они имеют хорошую адгезию к металлу, текстолиту, пластмассе, устойчивы и сохраняют свои начальные свойства в условиях резких климатических изменений и механических нагрузок. При этом обеспечивается эффективность экранирования не менее 50 дБ в широком диапазоне частот.

Сеточные материалы широко используются при экранировании вентиляционных отверстий, вводимых в высокочастотные блоки для улучшения теплообмена. Экранирующие свойства металлических сеток определяются дифракционным отражением электромагнитного поля от их поверхности. Экранное затухание сетки зависит от шага сетки  $S$ , диаметра проволоки  $d$  и проводимости материала. Его значение для латунной сетки определяется как

$$A_s = \frac{\lambda}{25 \ln(\pi d / S)}. \quad (\text{П.7})$$

При сплошном экранировании для электрических и электромагнитных полей можно получить ослабление электромагнитного поля около 60 дБ в широком диапазоне частот.

Эффективность экранирования уменьшается при появлении коррозии, поэтому при конструировании сетчатых экранов необходимо предусматривать антикоррозийное покрытие.

Стекла с токопроводящим покрытием должны обеспечивать необходимую эффективность экранирования при ухудшении их оптических свойств не более чем на 20 дБ. Наибольшее распространение получили пленки из окиси олова, которые являются химически устойчивыми, механически прочными и имеют хорошую адгезию со стеклом, выпускаемые промышленностью стекла с токопроводящим покрытием имеют поверхностное сопротивление не менее 6 Ом. Эффективность их экранирования составляет не менее 30 дБ в радиочастотном диапазоне.

Стекла с таким покрытием предназначены для установки в измерительные приборы, смотровые окна и шкальные системы РЭУ.

Радиопоглощающие материалы применяют в том случае, когда от экрана наряду с обеспечением высоких экранирующих качеств требуется минимальное значение коэффициента отражения. Его применяют для покрытия производственных помещений с целью проведения испытаний в условиях, приближающихся к свободному пространству. В таких помещениях отраженное поле может быть ослаблено в 500-1000 раз и будет существовать только поле падающей волны.

Радиопоглощающие материалы изготавливают на основе диэлектрика с добавлением мелкодисперсных веществ со средней удельной проводимостью. Промышленностью выпускаются поглощающие материалы, рассчитанные для работы в узком и широком диапазоне частот.

Для работы в узком диапазоне частот применяют поглощающий материал на металлической основе (например типа ХВ). В этом случае достижимо нулевое отражение, если толщину слоя поглотителя выбрать равной  $\lambda/4\sqrt{\epsilon\mu}$ . Достоинство таких материалов – малая толщина.

Для работы в широком диапазоне частот применяют однородный поглощающий материал с рельефной поверхностью в виде выступов (например типа В2Ф2). Размер выступов обычно составляет  $\lambda/4$ . Широкодиапазонные экраны – поглотители могут иметь многослойную конструкцию. Принцип действия таких экранов основан на переотражении и постоянном затухании волны помехи в толщине поглотителя.

## Б.2.2 Контактные устройства и стыковочные соединения элементов экранов

При внутриблочном экранировании экран в общем случае может представлять собой сложный комплекс, образующий физически неоднородную структуру и включающий корпус прибора, разделительные перегородки, панели, кронштейны. Когда экранирующие перегородки состоят из отдельных элементов (разборных и неразборных), в местах механического соединения должен обеспечиваться надежный электрический контакт.

Контактные соединения в экранах по выполняемым функциям и конструкции отличаются от обычных электрических контактов, размеры соединений в экране велики и часто пересекают значительную часть его поверхности. В этих условиях площадь соприкосновения, качество контактных поверхностей, контактное усилие, износостойчивость и другие факторы имеют существенное значение.

По своему назначению контактные соединения экранов разделяют на четыре группы: неразъемные, разъемные, скользящие и соединения открывающих частей экрана.

Неразъемные контактные соединения предназначены для постоянного соединения частей и элементов экрана. Они обычно выполняются сваркой или пайкой, которые практически не увеличивают переходное сопротивление металла. Используются три разновидности сварки: электродуговая, электрическая контактная и холодная сварка давлением (рис. П.2).

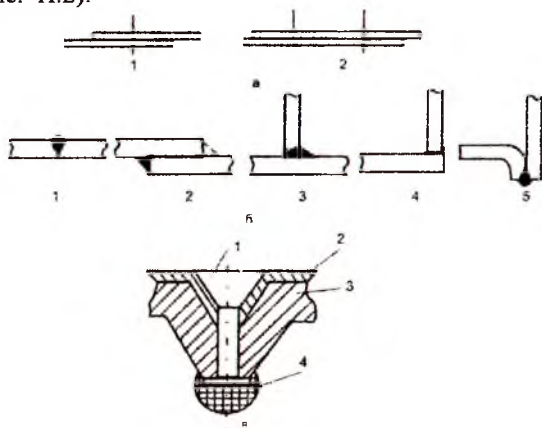


Рис. П.2. Конструкции сварных соединений:

- а – контактная : 1 – однорядная; 2 – двухрядная; б – электродуговая: 1 – встык, 2 – внахлест, 3 – Т-образная, 4 – угловая, 5 – краевая; в – холодносварная: 1 – заклепка, 2 – листок, 3 – экран, 4 – компаунд

Хорошие результаты дает лазерная сварка. Она позволяет сваривать алюминий и его сплавы, нержавеющую сталь, латунь, медь. При этом не требуется специальной защиты от атмосферы. Выбором режима сварки можно обеспечить соединение материалов с различными температурами плавления.

Для качества паяного соединения большое значение имеет выбор припоя и зазора между металлами, детали из меди и ее сплавов хорошо паяются припоями на основе олова, никеля, серебра; детали из стали – на основе цинка, олова, свинца. Сопротивление припоя обычно не превышает сопротивления основных металлов, поэтому общее сопротивление не возрастает.

Высокая эффективность экранирования обеспечивается при применении неразъемных обжимных швов, позволяющих избегать сварки

или пайки. При использовании листовых или фольговых металлов их соединение производится в фалец, с зачисткой перед обжатием контактных поверхностей (рис. П.3).



Рис. П.3. Неразъемный обжимной шов

Защита неразборных контактных соединений от проникновения влаги осуществляется путем герметизации компаундами, лакированием и окрашиванием. Соединения деталей из магниевых сплавов перед окрашиванием грунтуют.

Неразъемное соединение, осуществляемое с помощью точечной сварки или заклепками, имеет невысокую эффективность экранирования, т.к. существующие между поверхностями неровности приводят к увеличению переходного сопротивления. К такому виду соединения следует прибегать в том случае, когда требования к электрогерметичности невысоки.

Разъемные контактные соединения обычно осуществляются винтами и болтами. Для повышения эффективности экранирования в соединениях применяют электромагнитные уплотняющие прокладки, которые обеспечивают электрическую непрерывность и исключают возможность появления щелей [2].

Необходимое давление соединяемых деталей определяется из условия создания низкоомного переходного сопротивления, возможности образования на них окисных пленок и упругости прокладки.

В настоящее время применяются прокладки четырех типов: плетеные проволочные; из диэлектрика, армированного проволокой; из проводящей пластмассы и гребенчатые. Наиболее широко применяется первый тип прокладок. Они изготавливаются из тонкой проволоки монеля, алюминия, латуни и могут быть пустотелыми или заполненными для гибкости неопреном, резиной. Плетеные проволочные прокладки применяют для установки экранов с длиной контура более 100 мм.

Уплотняющие прокладки из диэлектрика, армированного монелевой или алюминиевой проволокой, а также из проводящей пластмассы характеризуются малым контактным давлением, малой остаточной деформацией и могут работать в широком интервале температур. Применение таких прокладок обеспечивает как электромагнитную, так и общую герметизацию.

Гребенчатые прокладки различной конфигурации изготавливают из тонкой листовой термически обработанной бериллиевой бронзы. По всему контуру прокладка имеет упругодеформированные зубцы, разведенные в разные стороны (рис. П.4).

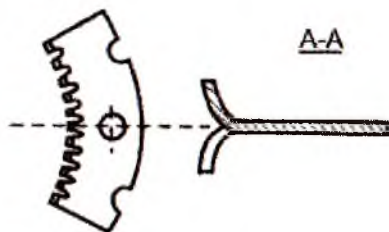


Рис. П.4. Гребенчатая прокладка

При монтаже прокладки устанавливаются между соединяемыми деталями или вставляются в паз. При установке в паз следует предусматривать гарантированный зазор, обеспечивающий возможность ее усадки по ширине (рис. П.5). Плетеные проволочные прокладки на металлическом основании крепятся с помощью точечной сварки или заклепок.

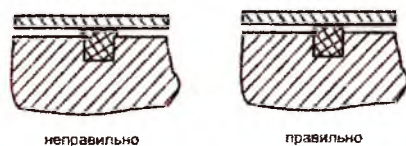


Рис. П.5. Установка эластичных проводящих прокладок

Применение уплотняющих прокладок позволяет получить в широком частотном диапазоне экранное затухание не ниже 90 дБ.

Скользящие контактные соединения применяются при установке на экранах и электрогерметичных корпусах органов управления, имеющих вращательное или поступательное движение, отверстия на них нарушают однородность экрана, для повышения экранного затухания выводы металлических осей регулировок следует защищать пружинными контактными кольцами, а неметаллических осей – с помощью втулок, образующих заперделные волноводы (рис. П.6). Однородность экрана можно не нарушить, если для управления использовать магниты (рис. П.7).

Наиболее сложной является задача обеспечения надежных разъемных

контактных соединений из алюминиевых и магниевых сплавов, т.к. из-за высокой коррозионности непосредственный контакт деталей из этих сплавов является ненадежным. Обеспечение высокой эффективности экранирования достигается применением в стыковочных устройствах промежуточных контактных элементов: съемного и несъемного. Несъемный контактный элемент выполняется из тонкой листовой меди, латуни или биметалла АМП, технически чистового алюминия, плакированного с одной стороны медью. Съемный контактный элемент представляет собой гребенчатую прокладку из бериллиевой бронзы.

К экрану и крышке, выполненным из алюминиевого сплава, несъемные контактные элементы привариваются. По конфигурации несъемные контактные элементы соответствуют вырезу в экране и форме крышки. По периметру крышки приклепывается промежуточный съемный контактный элемент.

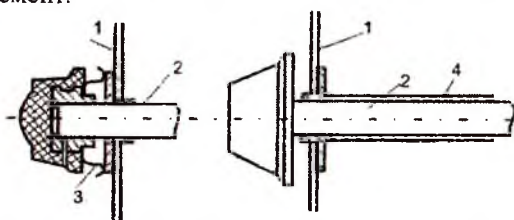


Рис. П.6. Электромагнитная герметизация ручек управления:  
1 – экран, 2 – ось, 3 – контактное кольцо, 4 – втулка

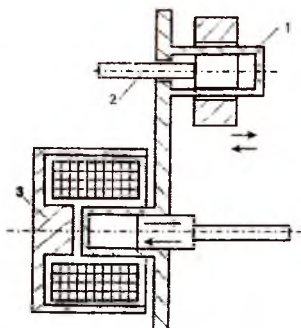


Рис. П.7. Электрогерметизация с помощью электромагнитов:  
1 – магнит, 2 – шток, 3 – электромагнит

При стыковке экрана и крышки зубцы съемного контактного элемента деформируются и в местах их вдавливания создается электрический контакт по всему периметру стыка.

Для гребенчатого съемного контактного элемента применяют никелевое покрытие. Покрывают никелем и несъемные контактные элементы с целью получения электрического контакта из однородных металлов, обеспечивающего высокую коррозионную стойкость. На рис. П.8 показан пример конструкции крышки лючка, устанавливаемой на электрогерметичном корпусе блока РЭУ.

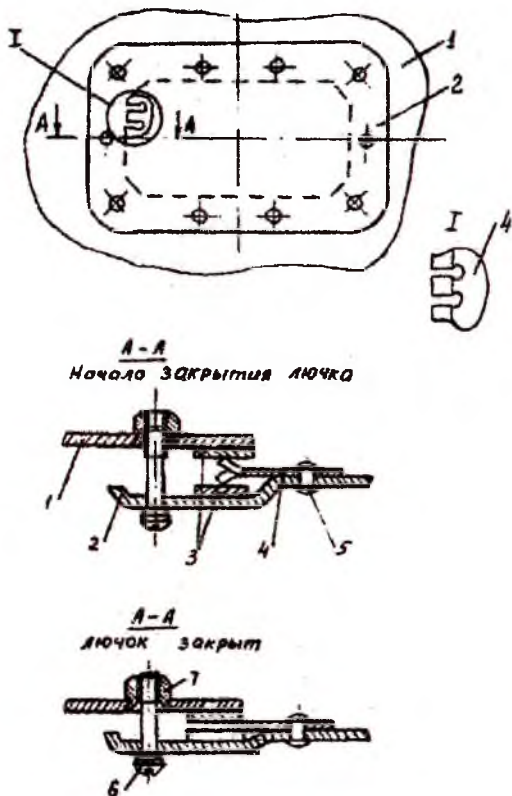


Рис. П.8. Конструкция крышки лючка:

- 1 – корпус блока, 2 – крышка лючка, 3 – несъемный контактный элемент,  
4 – гребенчатая прокладка, 5,6,7 – заклепки

### Б.2.3 Экранирование вентиляционных отверстий

Для улучшения теплоотдачи от экранированных РЭУ или элементов, расположенных в экранах, предусматривают вентиляционные отверстия. Размеры и расположение отверстий определяют исходя из назначения и конструкции экранов, их эксплуатационных характеристик. Для обеспечения требуемой эффективности экранирования отверстия закрываются сетчатыми материалами или выполняются по принципу предельных волноводов.

Важным требованием, предъявляемым к сетчатым экранам, является обеспечение надежного контакта с основным экраном, для этой цели сетчатый материал соединяют с корпусом пайкой с использованием промежуточных контактных элементов из меди, латуни или АМП. На рис. П.9 показан вентиляционный сетчатый экран, установленный на экране из листового алюминия. Для соединения сетки с корпусом используется промежуточный контактный элемент из АМП в виде рамки. Контактное соединение рамки с экраном осуществляется сваркой.

Вентиляционное отверстие, выполненное по принципу предельного волновода, вносит минимальное затухание, определяемое формулой

$$L_{\min} = \frac{54,6}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - (\lambda_{кр} / \lambda_{\min})^2}. \quad (\text{П.8})$$

При прямоугольном сечении отверстия для волны типа  $H_{10}$

$$\lambda_{кр} = 2a.$$

Поэтому

$$L_{\min} = \frac{27,3}{a} \sqrt{1 - (2a / \lambda_{\min})^2}. \quad (\text{П.9})$$

Отсюда видно, что у вентиляционных отверстий имеет место противоречие между аэродинамическим сопротивлением и эффективностью экранирования. Для разрешения этого противоречия применяют волноводный фильтр типа «сотовод» решетки (рис. П.10). В такой конструкции общий волновод разбивают на отдельные ячейки. В случае одинаковых ячеек при  $a \ll \lambda_{\min}$  экранное затухание определяется формулой

$$A_s = 27,3 + 20 \lg \sqrt{n}, \quad (\text{П.10})$$



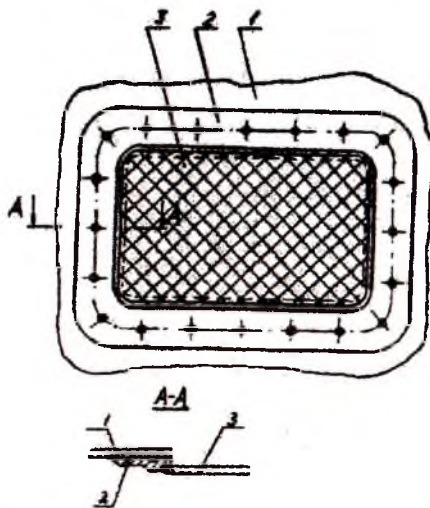


Рис. П.9. Вентиляционный сетчатый экран:  
1 – корпус, 2 – рамка из АПМ, 3 – сетчатый экран

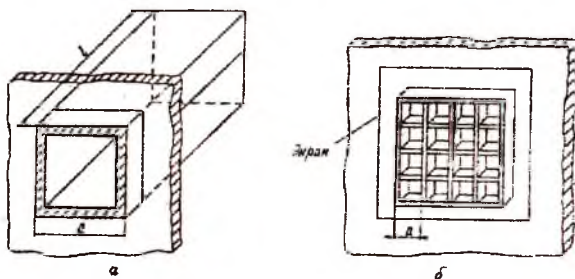


Рис. П.10. Волноводные фильтры:  
а – предельный волновод, б – «сотовая» розетка

где  $27,3$  – экранное затухание одной ячейки при толщине экрана, равной  $a$ ;  
 $n$  – число ячеек. Необходимая толщина экрана

$$l = (A_3 - 20 \lg \sqrt{n}) / L_{\min} \quad (\text{П.11})$$

В этом случае, если общее сечение волновода  $a < \lambda_{\min}$ , то экранное затухание и толщина экрана определяются по следующим формулам:

$$A_3 = 27,3 - 20 \lg(\ln n), \quad (\text{П.12})$$

$$l = (A_3 + 20 \lg n) / L_{\min}.$$

Отверстия типа «сотовая решетка» в конструкциях РЭУ нередко выполняют роль коммуникационных отверстий для управления, связи, сигнализации и каналов для передачи разного рода усилений и жидкостей.

Предельный волновод к экрану крепят сваркой или пайкой по периметру канала (рис. П.10), он может быть расположен как внутри экрана, так и вне его.

## Б.3 ЭКРАНИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭУ

### Б.3.1 Катушки индуктивности

При проектировании экранов высокочастотных катушек индуктивности и контуров необходимо учитывать не только коэффициент экранирования, но и влияние экрана: вносимые потери и изменение индуктивности. Форма экранов обычно цилиндрическая или прямоугольная.

Выбор размеров и материала экрана определяется противоречивыми требованиями сокращения габаритов, массы и стоимости, с одной стороны, и уменьшения влияния экрана на параметры катушки индуктивности, с другой стороны. Компромиссными являются такие размеры экрана, когда индуктивность катушки уменьшается на 5 – 20%, при этом отношение радиусов экрана  $R$  и катушки  $R_k$  представлено как  $R_k/R = 0,5 - 0,6$  (рис. П.11). Для однослойной катушки высота экрана определяется по заданному коэффициенту изменения индуктивности:

$$\beta = \left[ 1 - \left( \frac{R_k}{R} \right)^3 \right] \left[ 1 - \left( \frac{l_k}{2l_3} \right)^2 \right]. \quad (\text{П.13})$$

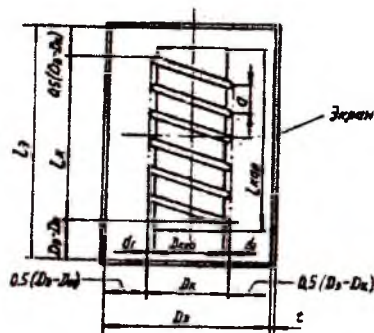


Рис. П.11. Экранирование катушки индуктивности

Для уменьшения вносимых потерь экраны выполняют из хорошо проводящего материала. На практике чаще используют немагнитные материалы: медь, латунь, алюминий. Следует учитывать, что применение заземленного экрана приводит к увеличению собственной емкости катушки за счет добавления к ней емкости относительно экрана.

Нередко к элементам катушки необходим доступ. Тогда экран изготавливают с открытым торцом, представленным в виде предельного волновода. Необходимая величина экранного затухания достигается увеличением длины экрана или установкой «сотовой решетки».

### Б.3.2 Микросхемы

Проблема обеспечения ЭМС в микросхемах осложнена тем, что при плотной компоновке элементов постановка экранов и экранирующих перегородок внутри общего корпуса затруднена. Поэтому основным способом обеспечения ЭМС является рациональная компоновка элементов на подложке с целью уменьшения связей между ними [2].

В высокочастотных микросхемах экранировка между печатными проводниками осуществляется прокладкой между взаимодействующими проводниками третьего, заземленного, или расположением на малом расстоянии от них заземленного металлизированного слоя. В конструкциях микросхем роль заземленного проводника может выполнять крышка корпуса или проводящий слой в многослойных платах. Оба способа позволяют уменьшить емкостную связь в 5 – 10 раз.

Для уменьшения влияния корпуса на параметры микросхем его размеры выбирают из условия  $(H-h)/h > 5$ , где  $H$  – высота корпуса,  $h$  – высота навесных элементов, но при выборе размеров необходимо

учитывать возможность возникновения резонансов, существенно снижающих эффективность экранирования. Резонансные эффекты отсутствуют, если корпус является запредельным волноводом:  $a, b < \lambda/2$ , где  $a, b$  – размеры основания микросхемы.

Микросхемы в пластмассовых корпусах при необходимости экранируются внешними металлическими колпачками или перегородками. В другом случае на пластмассовый корпус наносят проводящее покрытие.

Для уменьшения влияния ЭМП на межъядеечную коммутацию в блоках микроэлектронных устройств применяют гибкие кабели, покрытые пластиком из поливинилхлорида с высокой диэлектрической проницаемостью.

### Б.3.3 Провода и кабели

Экранированные провода применяют для монтажа цепей, работающих на частотах вплоть до десятков мегагерц. На более высоких частотах применяют гибкие кабели, обеспечивающие малые потери.

В качестве экранирующих оболочек проводов и кабелей наиболее широко используют медную оплетку. В области низких частот (до 10 кГц) потери в экранирующей оболочке практически отсутствуют и экранное затухание определяется составляющей отражения  $A_0^{E,H}$ . В квазистатическом режиме составляющая  $A_0^E$  велика и оплетка, заземленная с одного конца, обеспечивает высокую эффективность экранирования электрического поля, из-за малого значения  $A_0^H$  совершенно не обеспечивается защита от магнитного поля ЭМП. Для повышения эффективности экранирования магнитного поля оплетку необходимо заземлять с двух концов. При этом весь обратный ток экранируемой цепи направляется через оплетку, создавая дополнительное экранирующее действие, величина которого может достигать 20 дБ. Наиболее эффективно действие этой составляющей на частотах до 15–20 кГц. При дальнейшем росте частоты увеличиваются составляющие  $A_0^H$ ,  $A_n$  и экранное затухание определяется поглощением и отражением.

В областях низких частот экраны могут быть комбинированными, изготовленными из свинца, меди, стали, алюминия и их сочетаний.

Экранированные провода и кабели громоздки и неудобны при монтаже. Длина их должна быть значительно меньше четверти длины

волны. В другом случае кабель должен быть включен на согласованную нагрузку.

Электрическое сопряжение радиоблоков в общую схему радиоустройства выполняют с помощью разъемов. В области низких частот корпуса применяемых многотыревых низкочастотных разъемов являются экранами и должны иметь надежный электрический контакт с общей шиной или корпусом прибора, а зазоры между разъемом и корпусом должны быть закрыты электромагнитными уплотняющими прокладками.

В области высоких частот коаксиальные кабели должны быть согласованы по волновому сопротивлению с используемым разъемом. При необходимости разъем закрывается специальным экраном.

Обычные контактные соединения экранов кабелей с корпусом блока прибора из алюминиевого и магниевое сплава не обеспечивают требуемой эффективности экранирования. На рис. П.12 показана конструкция устройства экранирования кабельного ввода в корпус из листового алюминия. На корпусе блока устанавливают резьбовое зажимное устройство, состоящее из корпуса 6 и зажима 5. С помощью зажимного устройства создается надежный электрический контакт наконечника экрана с корпусом блока через промежуточный контактный элемент.

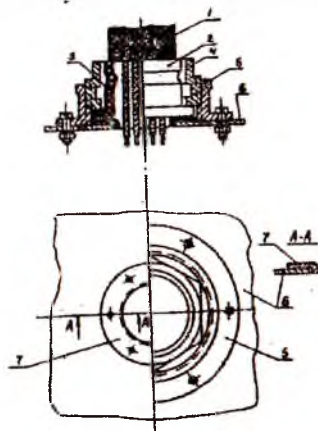


Рис. П.12. Кабельный ввод в корпус из алюминиевого сплава:

- 1 – оплетка, 2, 3 – наконечники, 4 – зажим, 5 – корпус,  
6 – корпус прибора, 7 – контактный элемент

Общий экран 4-кабельного жгута заделан в две детали (внешний 2 и внутренний 3 наконечники), выполненные из тонкой листовой меди или латуни. К корпусу блока приварен точечной электросваркой

промежуточный контактный элемент 7 из АМП. Плакированная поверхность контактного элемента покрыта никелем.

На корпусе электрический контакт наконечника экрана с корпусом блока через промежуточный контактный элемент. При установке кабельного ввода на литой корпус промежуточный контактный элемент соединяется с корпусом аргоно-дуговой сваркой.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Маркелов, С.А.* Сборник задач по электромагнитной совместимости: учеб. пособие. [Текст] / *С.А. Маркелов* – Самара: СГАУ, 2000.

2. *Пахомов, В.В.* Средства защиты радиоэлектронных устройств от электромагнитных помех: учеб. пособие [Текст] / *В.В. Пахомов, С.А. Маркелов, Н.М. Галдина* – Самара: СГАУ, 1994.

3. *Галдина, Н.М.* Задачи по технической электродинамике: метод. указания к практическим занятиям [Текст] / *Н.М. Галдина, С.А. Маркелов, В.В. Пахомов* – Самара: СГАУ, 1995.

4. *Шевель, Д.М.* Электромагнитная безопасность [Текст] / *Д.М. Шевель* – Киев: ВЕК, 2002.

5. *Маслов, О.Н.* Электромагнитная безопасность радиоэлектронных средств [Текст] / *О.Н. Маслов* – М.: ООО «Мобильные коммуникации», 2000.

*Учебное издание*

*Маркелов Сергей Александрович*

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ  
В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ**

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Доверстка И. И. С п и р и д о н о в а

Подписано в печать 05.02.09. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 5,0.

Тираж 100 экз. Заказ *л 8 . Арт. С - 19/09.*

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.