

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В.Н. Башкиров

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов всех форм обучения по техническим направлениям подготовки

Томск
2024

УДК 537.87
ББК 32.85
Б-33

Рецензент:

Соловьева Ю.В., доктор физ.-мат. наук, доцент,
зав. каф. физики, химии и теоретической механики ТГАСУ

Башкиров, Вячеслав Николаевич

Б-33 Электромагнитная совместимость электронных устройств: методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов всех форм обучения по техническим направлениям подготовки / В.Н. Башкиров – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 31 с.

Настоящие методические указания по дисциплине «Электромагнитная совместимость электронных устройств» составлены с учетом требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, основных профессиональных образовательных программ по техническим направлениям подготовки.

Методические указания содержат описание основных теоретических положений по рассматриваемым вопросам, примеры выполнения заданий в Mathcad, индивидуальные задания для выполнения обучающимися, темы рефератов, вопросы и тесты для самоконтроля.

Одобрено на заседании кафедры промышленной электроники, протокол № 25 от 16.02.2024.

УДК 537.87
ББК 32.85

© Башкиров В.Н., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Индивидуальные задания	5
2. Темы рефератов.....	25
3. Темы творческих индивидуальных заданий.....	26
4. Вопросы для самоконтроля.....	26
5. Тестовые задания	27
Список рекомендуемой литературы.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электромагнитная совместимость электронных устройств» охватывает актуальные вопросы создания, эксплуатации и развития перспективных технических средств, связанные с обеспечением их электромагнитной совместимости. Согласно государственным стандартам и международным нормам технические средства подвергаются обязательной сертификации на соответствие электромагнитной совместимости, что требует от специалистов, занятых электронных и радиотехнических отраслях, наличие компетенций в этой области.

В дисциплине рассматриваются основные понятия, термины и определения в области электромагнитной совместимости электронных устройств, вопросы распространения электромагнитных помех, методики и типы испытаний на определение параметров электромагнитной совместимости и помехоустойчивости технических средств. Описываются частотные зависимости базовых элементов схем устройств преобразовательной техники, способы борьбы с электромагнитными помехами, фильтрация сетевых цепей питания электронных устройств.

Целью освоения дисциплины «Электромагнитная совместимость электронных устройств» является получение знаний в области обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств радиоэлектронной аппаратуры, как между собой, так и с любыми преобразователями электрической энергии, находящимися в непосредственной близости или подключенными к общему источнику питания.

В результате освоения дисциплины обучающиеся освоят проблематику электромагнитной совместимости электронных устройств, получат знания в области обеспечения их электромагнитной совместимости, освоят основные средства и методы повышения помехозащищенности технических средств и снижения уровня излучаемых от них помех; научатся разрабатывать методики научных исследований на ЭМС в соответствии с областью применения электронного устройства, осуществлять постановку целей и задач исследования устройств силовой энергетической электроники на ЭМС в соответствии с техническими требованиями; будут способны применять опыт системного анализа и исследования электронных устройств на ЭМС с различными функциональными узлами, принципы планирования и методики автоматизации эксперимента с использованием информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение; получат навыки планирования эксперимента с применением принципов и методов автоматизации на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, проведения измерений в реальном времени с применением информационно-измерительных комплексов smv-11, SMV-8.

Материал методических указаний содержит теоретический материал, методические рекомендации по решению задач, типовые задания для решения на практических занятиях и указания для самостоятельной работы в пакете прикладных программ MathCAD, содержащем модули символьных вычислений. Освоение материала сопровождается выполнением индивидуальных заданий и их защитой, в качестве метода тестирования, определяющего уровень усвоения материала дисциплины.

1 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1. Фильтр для подавления радиопомех

Общие сведения о фильтрах

Фильтрация является основным средством ослабления кондуктивных помех, создаваемых в цепях питания, управления или нагрузки при коммутации постоянного и переменного токов устройств промышленной электроники.

Все защитные фильтры могут быть разделены на четыре основные группы:

1. *Емкостные фильтры*, представляющие собой один конденсатор или комбинацию нескольких конденсаторов.
2. *Индуктивные фильтры*, представляющие собой одну катушку индуктивности (дроссель) или комбинацию нескольких катушек.
3. *Индуктивно-емкостные фильтры*, представляющие собой комбинацию из катушек индуктивности и защитных конденсаторов.
4. *Комбинированные фильтры*, представляющие собой комбинацию из первых трех групп фильтров.

В зависимости от числа фильтруемых проводов фильтры могут быть однопроводными, двухпроводными, трехпроводными и т.д.

Из перечисленных выше групп на практике более широкое распространение получила первая группа, а именно группа емкостных фильтров. Это объясняется их простотой в установке и достаточной в большинстве случаев эффективностью защиты, создаваемой этими фильтрами, а также их относительной дешевизной. Однако, когда их эффективности недостаточно, то применяют индуктивные или индуктивно-емкостные фильтры, хотя исходя из габаритных или экономических требований, либо по причине весьма больших токов в защищаемых цепях источника помех это может вызвать осложнения.

Защита питающей сети источника помех емкостной блокировкой

Блокировка питающей сети конденсаторами большой емкости применяется в тех случаях, когда внутреннее сопротивление источника помех и питающей сети велико. Эквивалентная схема источника помех с емкостной блокировкой питающей сети приведена на рисунке 1.

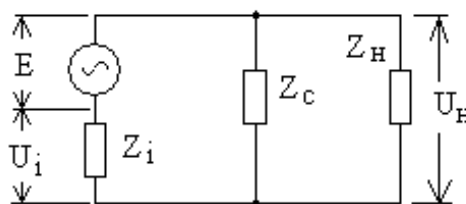


Рисунок 1 – Эквивалентная схема, где E – э.д.с. источника радиопомех по высокой частоте;
 U_i – падение высокочастотного напряжения на внутреннем сопротивлении источника помех;
 $Z_C = 1/\omega C$ – сопротивление блокировочного конденсатора; Z_H – сопротивление нагрузки;
 U_H – падение высокочастотного напряжения на сопротивлении нагрузки

Величины Z_i , Z_C , Z_H практически всегда являются комплексными, так как имеют активную и реактивную составляющие этих сопротивлений.

Упрощенное выражение для расчета коэффициента эффективности защиты от источника помех посредством емкостной блокировки можно записать:

$$k \approx \frac{Z_i}{Z_C}. \quad (1)$$

Защита питающей сети от источника помех катушками индуктивности

Эквивалентная схема источника помех с защитной катушкой индуктивности приведена на рисунке 2. Данная защита используется в случае, если внутреннее сопротивление источника помех или питающей сети мало.

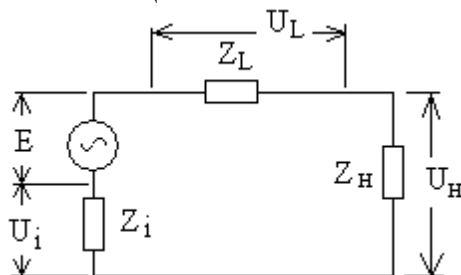


Рисунок 2 – Эквивалентная схема, где U_L – падение напряжения на защитной катушке индуктивности;
 $Z_L = \omega L$ – сопротивление защитной катушки

Коэффициент эффективности защитой катушкой индуктивности определяется отношением:

$$k \approx \frac{Z_H}{Z_i + Z_H} \times \frac{Z_H}{Z_H}. \quad (2)$$

Упрощенный расчет коэффициентов эффективности по формулам (1) и (2) приведен без учета паразитных параметров и резонансных явлений в рассмотренных схемах.

Следует отметить, что на практике фильтры, содержащие катушки индуктивности (дрессели), наиболее широко применяются для небольших токов до 10–15 А. Это объясняется тем, что при больших значениях тока нагрузки на индуктивности фильтра увеличивается падение напряжения и существенно возрастают потери. В фильтрах на токи свыше 30 А применяются катушки с малой индуктивностью, порядка нескольких мкГн, а для токов в несколько сот ампер – используются катушки с индуктивностью меньше одного мкГн, однако при соответствующем увеличении емкости конденсаторов фильтра.

В случае, когда выбранный емкостной или индуктивный фильтр не дает требуемого подавления помех, то применяют более сложную схему фильтра и обеспечивают требуемую эффективность защиты либо путем добавления катушек индуктивности, т.е. использования схемы Г-образного фильтра, либо путем применения дополнительных Г-образных звеньев или добавлением звеньев П-образного фильтра.

Расчет Г-образных индуктивно-емкостных высокочастотных фильтров, предназначенных для подавления промышленных радиопомех

Схему индуктивно-емкостного фильтра (рисунок 3), предназначенного для подавления промышленных радиопомех в цепях питания преобразователей (при учете собственной емкости катушки и собственной индуктивности конденсатора для различных участков диапазона частот), можно представить тремя вариантами.

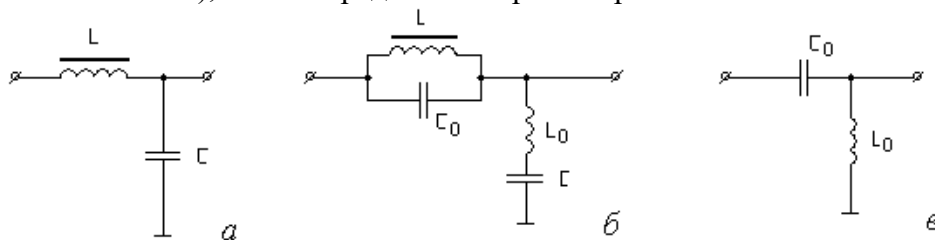


Рисунок 3 – Схемы Г-образного индуктивно-емкостного фильтра с повышением частоты:
 а – схема для диапазона низких радиочастот; б – средних радиочастот; в – высоких радиочастот,
 где C_0 и L_0 – собственные паразитные параметры элементов фильтра

Коэффициент ослабления напряжения радиопомех в цепи с Г-образным фильтром имеет вид:

$$K = \frac{Z_L + Z_C}{Z_C}, \quad (3)$$

где Z_L – высокочастотное сопротивление катушки индуктивности; Z_C – высокочастотное сопротивление конденсатора.

Исходя из формулы (3) и схемы (рисунок 3) и пренебрегая активными сопротивлениями, можно получить следующие выражения для коэффициентов ослабления радиопомех Г-образным фильтром.

Для схемы *a*:

$$K = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{\frac{1}{\omega C}} = \omega^2 LC - 1 = \left(\frac{f}{f_{\text{о.н.}}} \right)^2 - 1, \quad (4)$$

где $f_{\text{о.н.}}$ – собственная частота резонанса фильтра в области низких радиочастот, определяется индуктивностью катушки и емкостью конденсатора.

$$f_{\text{о.н.}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

Для схемы *в* (рисунок 3) имеет аналогичный приведенному выше коэффициенту ослабления, который будет определяться величинами собственной емкости катушки и собственной индуктивностью конденсатора.

$$K = \frac{\frac{1}{\omega C_0} - \omega L_0}{\omega L_0} = \left(\frac{f_{\text{о.в.}}}{f} \right)^2 - 1, \quad (6)$$

где $f_{\text{о.в.}}$ – собственная частота резонанса фильтра в области высоких частот диапазона.

$$f_{\text{о.в.}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (7)$$

Для схемы средних частот *б* (рисунок 3) почти всегда будет удовлетворяться неравенство $Z_L \gg Z_C$, поэтому выражение для коэффициента ослабления может быть записано:

$$K = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_0}} \times \frac{f}{f_{01}}}{1 - \left(\frac{f}{f_{01}} \right)^2} \cdot \frac{\sqrt{\frac{L_0}{C}} \times \left(\frac{f}{f_{02}} \right)^2 - 1}{f_{02}}. \quad (8)$$

где f – текущая частота; f_{01} – частота резонанса индуктивности катушки (L) с ее собственной емкостью (C_0); f_{02} – частота резонанса емкости конденсатора (C) с его собственной индуктивностью (L_0).

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}; \quad (9)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}} \quad (10)$$

Практические рекомендации, для существующих номиналов стандартных емкостей конденсаторов можно найти минимальные значения индуктивностей защитных катушек, которые приведены в таблице:

C , мкФ	10	2	1	0,5	0,25	0,2	0,1	0,05	0,025	0,02	0,01
L , мкГн	1	5	10	20	40	50	100	200	400	500	1000

На рисунке 4 приведена рассчитанная по формуле (8) характеристика коэффициента ослабления помех однозвенного индуктивно-емкостного Г-образного фильтра в зависимости от частоты при следующих параметрах элементов: $L=1000$ мкГн; $C_0=100$ пФ; $C=0,1$ мкФ; $L_0=0,01$ мкГн, где f_1 – собственная частота резонанса фильтра в области низких частот диапазона; f_2 – частота резонанса катушки индуктивности; f_3 – частота резонанса конденсатора; f_4 – собственная частота резонанса фильтра в области высоких частот диапазона.

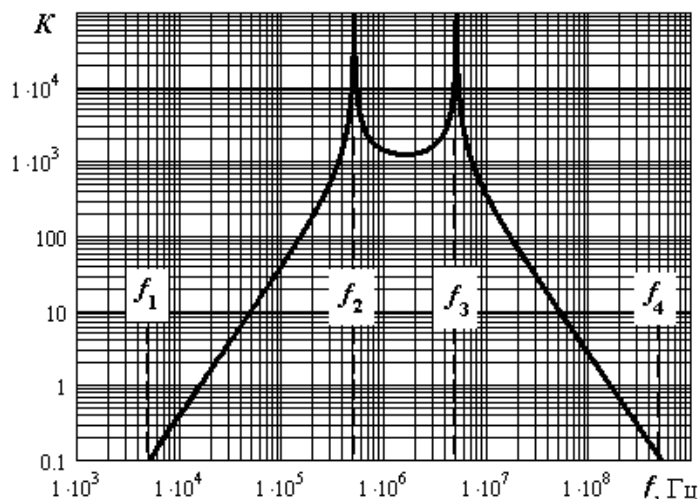


Рисунок 4 – Коэффициент ослабления однозвенного Г-образного LC-фильтра

Расчет многозвенных Г-образных фильтров

Исходя из практического опыта установлено, что для подавления промышленных помех, создаваемых устройствами промышленной электроники, обычно достаточно однозвенного фильтра с эффективностью 20–40 дБ. Однако для источников, имеющих повышенные уровни радиопомех, необходимо использовать более эффективные двухзвенные фильтры (рисунок 5), а иногда и многозвенные.

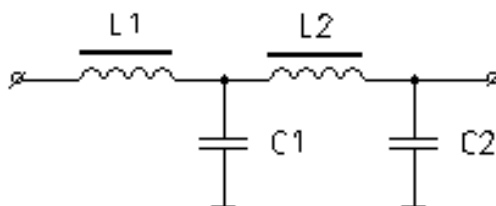


Рисунок 5 – Двухзвенный индуктивно-емкостной Г-образный фильтр

Коэффициент ослабления многозвенного Г-образного фильтра с допустимым для практики приближением является произведением коэффициентов ослабления отдельных звеньев.

Выражение для коэффициента ослабления двухзвенного Г-образного фильтра, очевидно, можно написать в виде:

$$K = \frac{Z_{L1}}{Z_{C1}} \times \frac{Z_{L2}}{Z_{C2}}. \quad (11)$$

В случае, если $L1 = L2 = L$ и $C1 = C2 = C$, то выражение (11) принимает вид:

$$K = \left(\frac{Z_L}{Z_C} \right)^2. \quad (12)$$

Тогда коэффициент ослабления для n -звенного Г-образного фильтра можно записать:

$$K = \left(\frac{Z_L}{Z_C} \right)^n. \quad (13)$$

Расчет коэффициента эффективности П-образного фильтра

Схема П-образного фильтра приведена на рисунке б.

Схема *а* применима для рассмотрения на низких радиочастотах, схема *б* является более полной и используется в широком диапазоне частот.

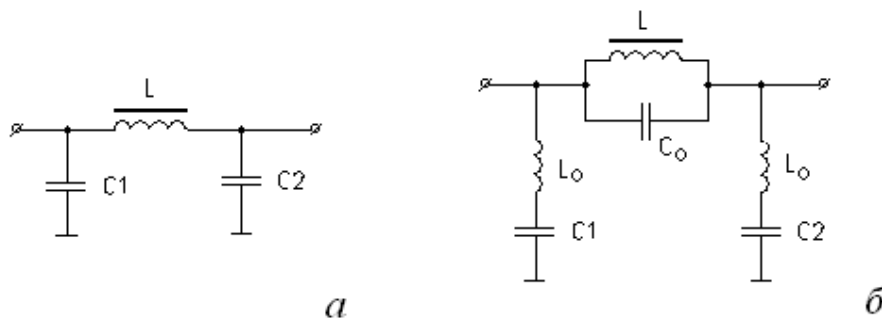


Рисунок б – Схемы П-образного индуктивно-емкостного фильтра:

а – без учета паразитных параметров у катушки индуктивности и конденсатора;

б – с учетом паразитных параметров, где C_0 и L_0 – собственные паразитные параметры элементов фильтра

Коэффициент эффективности П-образного фильтра является произведением коэффициентов эффективности от защиты емкостным фильтром и Г-образным фильтром и, следовательно, для схемы *а* (рисунок б) может быть выражен следующим образом:

$$k \approx \frac{Z_i}{Z_{C1}} \times \frac{Z_L}{Z_{C2}}, \quad (14)$$

где Z_i – индуктивное сопротивление источника помех, подключенного к этому П-образному фильтру.

Следует отметить, что емкость входного конденсатора часто приходится выбирать из соображений обеспечения отсутствия в защищаемом диапазоне частот паразитного резонанса между индуктивным внутренним сопротивлением источника помех и емкостью конденсаторов. В связи с этим в П-образных фильтрах применяются входные конденсаторы емкостью в несколько микрофард, а в отдельных случаях используются электролитические конденсаторы большой емкости – 10 мкФ и более.

Расчет П-образного фильтра практически сводится к расчету его Г-образного звена после экспериментального определения оптимальной емкости входного защитного конденсатора и уровня остаточных помех после его подключения.

Расчет коэффициента эффективности подавления помех многозвенного П-образного фильтра аналогичен расчету для однозвенного с той разницей, что после выбора входного конденсатора применяется не одно Г-образное звено, а два, три и более, в зависимости от требуемой эффективности фильтра.

Расчет Г-образного индуктивно-емкостного фильтра при помощи программы MathCAD

C – емкость конденсатора, [Ф];

L – индуктивность дросселя, [Гн];

C_0 – паразитная емкость дросселя, [Ф];

L_0 – паразитная индуктивность конденсатора, [Гн];

f – диапазон частот, [Гц];

n – число звеньев фильтра.

1. Введите для расчета, согласно полученному заданию, свои исходные данные элементов фильтра, например:

$$C = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ [Ф]}; \quad L = 1000 \cdot 10^{-6} \text{ [Гн]}; \quad C_0 = 100 \cdot 10^{-12} \text{ [Ф]}; \quad L_0 = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ [Гн]};$$

$$f = 1 \cdot 10^3, 2 \cdot 10^3, \dots, 500 \cdot 10^6, \text{ [Гц]}; \quad n = 2.$$

Левый маркер (первый) заготовки ранжированной переменной f соответствует нижней границе диапазона частот, в котором будет проводиться расчет коэффициента ослабления фильтра, правый – верхней границе. Разность между первым и вторым значениями определяет шаг.

2. После ввода новых исходных данных сохраните документ под своим именем.

MathCAD выполняет расчеты в режиме реального времени: любое выражение, введенное в документ, будет сразу же обработано. На рассматриваемом примере программа выдаст следующие результаты:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1,592 \times 10^4 \text{ [Гц]} \text{ – собственная частота резонанса фильтра в области наиболее}$$

низких частот диапазона;

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} = 5,033 \times 10^5 \text{ [Гц]} \text{ – собственная частота резонанса катушки индуктивности};$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}} = 5,033 \times 10^6 \text{ [Гц]} \text{ – собственная частота резонанса конденсатора};$$

$$f_4 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} = 1,592 \times 10^8 \text{ [Гц]} \text{ – собственная частота резонанса фильтра в области наиболее}$$

высоких частот диапазона;

$$K(f) = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_0}} \times \left(\frac{f}{f_2}\right)}{\left|1 - \left[\frac{f}{f_2}\right]^2\right|} \cdot \frac{\left[\frac{f}{f_3}\right]^2 - 1}{\sqrt{\frac{L_0}{C}} \times \left(\frac{f}{f_3}\right)} \text{ – коэффициент ослабления напряжения радиопомех для диапазона}$$

средних частот.

3. Перед выводом на печать построенной в декартовой системе координат зависимости $K(f)$ отформатируйте график.

Непосредственно под крайними значениями (для оси X) или слева от них (для оси Y) появятся цифры, отражающие максимальные и минимальные величины координат узловых точек графика. Чтобы изменить их значения, удалите (точно так же, как при вводе исходных данных для расчета) старые величины и введите новые.

Коэффициент ослабления напряжения радиопомех для однозвенного Г-образного LC-фильтра показан на рисунке 7.

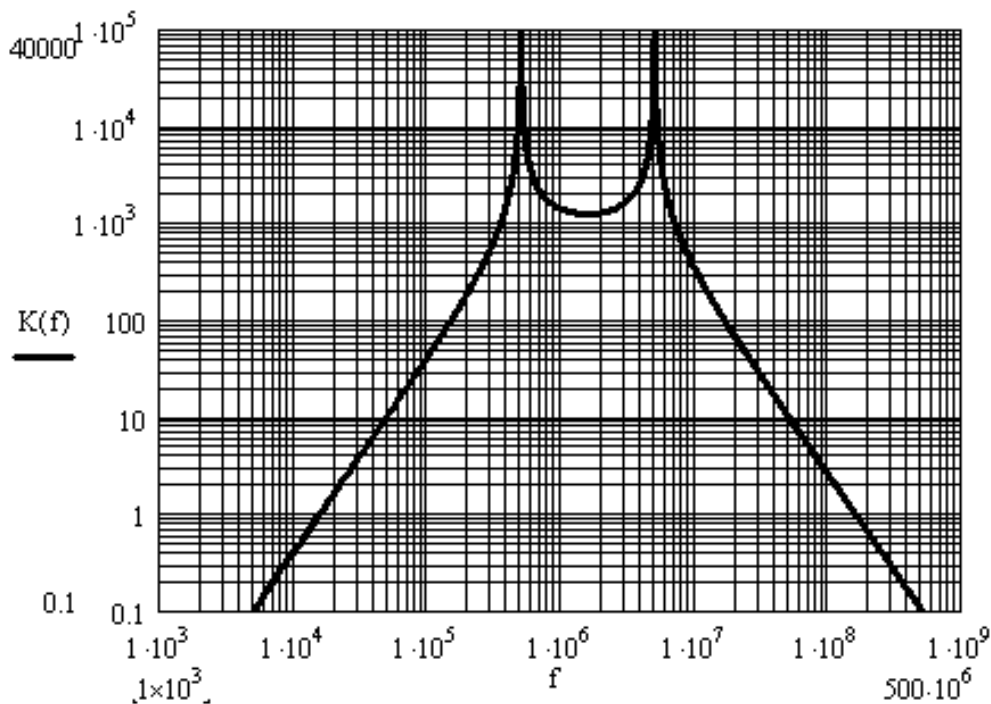


Рисунок 7 – Коэффициент ослабления напряжения радиопомех для однозвенного Г-образного LC-фильтра

Для многозвенных фильтров общий коэффициент ослабления напряжения радиопомех выражается как произведение коэффициентов ослабления отдельных звеньев. В случае, если параметры элементов фильтра одинаковы, для n -звенного Г-образного фильтра $K_n(f)$ имеем:

$$K_n(f) = \left(\frac{\sqrt{\frac{L}{C_0}} \times \left(\frac{f}{f_2} \right)}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_2} \right)^2 \right|} \cdot \frac{\sqrt{\frac{L_0}{C}} \times \left(\frac{f}{f_3} \right)^2 - 1}{\frac{f}{f_3}} \right)^n. \quad (15)$$

Зависимость $K(f)$ более наглядна в линейном масштабе (перевод в дБ):

$$K(f) = 20 \lg(K_n(f)), \text{ или для } n\text{-звенного фильтра: } K_n(f) = 20 \lg(K_n(f)).$$

Варианты индивидуального задания № 1

Номер варианта	Параметры элементов фильтра				Число звеньев фильтра, n
	C , [мкФ]	L , [мкГн]	C_0 , [пФ]	L_0 , [мкГн]	
1	10	1	10	0,1	1
2	6,8	2,5	10	0,01	1
3	2,2	5	20	0,01	1
4	1,5	400	120	0,01	1
5	1,0	500	120	0,01	1
6	0,68	800	200	0,01	1
7	0,47	200	50	0,01	1
8	0,5	20	30	0,005	1
9	0,25	40	40	0,005	1
10	0,2	50	50	0,005	1
11	0,1	100	50	0,005	1
12	0,05	200	100	0,005	1
13	0,025	400	100	0,005	1
14	0,01	1000	200	0,002	1
15	0,01	1000	200	0,002	2
16	0,25	40	40	0,005	2
17	0,47	200	50	0,005	2
18	1,0	800	150	0,005	2
19	1,0	10	10	0,01	3
20	0,1	100	20	0,001	3

Примечания: 1. Перед выводом на печать, после сохранения документа MathCAD под своим именем, отформатируйте графики, а все, что не относится к заданию – удалите.
2. Значения параметров элементов фильтра следует вводить в системе СИ

Задание 2. Защитный экран

Общие сведения о защитных экранах

Экранирование устройств промышленной и силовой электроники – достаточно дорогое техническое решение в улучшении электромагнитных параметров изделий. Для эффективной практической защиты цепей преобразователя от кондуктивных помех необходим возвратный путь для паразитных токов. Полностью замкнутый экран обеспечивает подобный путь, а также защиту технического средства от непосредственного воздействия нежелательного электромагнитного поля на внутренние цепи и проводники. Экранирование заключается в установке проводящей поверхности вокруг критических путей в схеме преобразователя таким образом, чтобы электромагнитное поле, которое создаёт паразитные наводки на них, ослаблялось бы комплексом эффектов отражения и поглощения нежелательной электромагнитной энергии. Экран (в основной части или полностью) должен быть в виде металлического кожуха, если необходим высокий уровень защиты от электромагнитных помеховых полей, особенно на низких частотах. Однако на высокой частоте (более 30 МГц) может быть применен легкий пластик с тонким проводящим покрытием.

Распространение электромагнитного поля описываются уравнениями Максвелла, которые в сферической системе координат имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(E_\varphi \sin(\theta))}{\partial\theta} - \frac{\partial E_\theta}{\partial\varphi} = -j2\pi r f \mu H_r \sin \theta, \\ \frac{\partial(H_\varphi \sin(\theta))}{\partial\theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial\varphi} = \left(\frac{1}{\rho} + j2\pi f \varepsilon\right) r E_r \sin \theta, \\ \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial\theta} = -j2\pi r \mu H_\varphi, \\ \frac{\partial(rH_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial\theta} = \left(\frac{1}{\rho} + j2\pi f \varepsilon\right) r E_\varphi, \\ \frac{\partial E_r}{\partial\varphi} - \sin \theta \frac{\partial(rE_\varphi)}{\partial r} = -j2\pi r f \mu H_\theta \sin \theta, \\ \frac{\partial H_r}{\partial\varphi} - \sin \theta \frac{\partial(rH_\varphi)}{\partial r} = \left(\frac{1}{\rho} + j2\pi f \varepsilon\right) r E_\theta \sin \theta. \end{array} \right. \quad (16)$$

Для однородной среды с удельным сопротивлением ρ [Ом·м], магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0 \mu_r \approx 1,257 \mu_r$ [мкГн/м] и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \approx 8,854 \varepsilon_r$ [пФ/м], волновое сопротивление определяется:

$$Z = \sqrt{j \frac{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \rho}{1 + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \rho}}, \text{ [Ом]}. \quad (17)$$

Постоянная распространения определяется как:

$$\sigma = \sqrt{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{\rho} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon\right)}. \quad (18)$$

Параметры Z и σ позволяют описать распространение в данной среде любого электромагнитного поля.

С расстоянием от источника излучения электромагнитное излучение ослабляется на величину $G = e^{\alpha r}$ и приобретает сдвиг по фазе $\Delta\varphi = \beta \cdot r$, а также, электрическое и магнитное поля обмениваются энергиями, при этом уже в переходной области волновое сопротивление Z_ω стремится к $Z_0 = 377$ Ом (рисунок 8).

У диэлектриков $Z \approx \sqrt{\mu/\varepsilon}$ и $\sigma \approx j \cdot 2\pi \cdot f \sqrt{\mu/\varepsilon}$, поэтому электромагнитное поле в диэлектриках распространяется без потерь, а у проводников $Z \approx \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \rho} + j\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \rho}$ и $\sigma \approx \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu/\rho} + j\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu/\rho}$, следовательно, электромагнитное поле существенно ослабляется.

Толщина скин-слоя определяется:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}, \text{ [м]}. \quad (19)$$

Эффективность экранирования определяется как отношение мощности сигнала без экрана к мощности сигнала с экраном, а при нахождении экрана в воздушной среде отношение напряженностей электрического или магнитного поля.

В большинстве случаев эффективность экранирования корпусных экранов устройств промышленной электроники находится в пределах от 30 до 60 дБ из-за перфораций экрана вентиляционными или приборными отверстиями. Отверстия и зазоры существенно ограничивают эффективность экранирования, особенно высокочастотных электромагнитных полей, однако ослабление низкочастотных магнитных полей определяется в основном

материалом экрана и его толщиной.

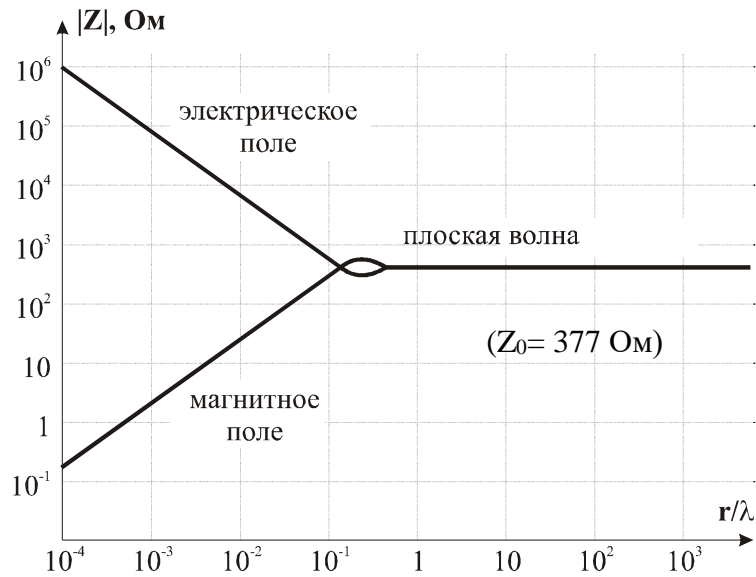


Рисунок 8 – Волновые сопротивления электрического и магнитного полей

Различие в характеристических сопротивлениях экрана и электромагнитной волны приводит к тому, что волна частично отражается на границах сред воздух – экран, а частично проникает через экран, при этом теряя часть энергии, которая превращается в тепло. На границе экран – воздух также происходят переотражения волн обратно в экран, а часть их энергии проходит сквозь него.

Эффективность экранирования выражается в виде:

$$\Xi = R + A + B, \quad (20)$$

где R – потери на начальное отражение; A – потери на поглощение; B – потери на многократное переотражение в материале экрана.

Модель 1

Эта модель экранирования в литературе носит название «модель линии передачи».

$$R_{E(H)} = -20 \lg \left[\frac{4 \cdot |Z_s| \cdot |Z_{\omega E(H)}|}{(|Z_s| + |Z_{\omega E(H)}|)^2} \right], \text{ [дБ]}, \quad (21)$$

$$A = -20 \lg \left[e^{-\frac{T}{\delta}} \right] \approx 8,69 \cdot \frac{T}{\delta}, \text{ [дБ]}, \quad (22)$$

$$B_{E(H)} = 20 \lg \left[1 - \left(\frac{|Z_s| - |Z_{\omega E(H)}|}{|Z_s| + |Z_{\omega E(H)}|} \right)^2 \cdot e^{-\frac{T}{\delta}} \right], \text{ [дБ]}, \quad (23)$$

где Z_s – характеристическое сопротивление экрана; $Z_{\omega E(H)}$ – характеристическое электрического (магнитного) поля; T – толщина экрана; δ – толщина скин-слоя.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}, \text{ [м]}, \quad (24)$$

$$Z_s = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot f \cdot \rho}}{1 - e^{-\frac{T}{\delta}}}, \quad (25)$$

$$Z_{\omega E} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{j \cdot \lambda / 2\pi r + (\lambda / 2\pi r)^2 - j \cdot (\lambda / 2\pi r)^3}{j \cdot \lambda / 2\pi r + (\lambda / 2\pi r)^2}, \quad [\text{Ом}], \quad (26)$$

$$Z_{\omega H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{-\lambda / 2\pi r + j \cdot (\lambda / 2\pi r)^2}{\lambda / 2\pi r - j \cdot (\lambda / 2\pi r)^2 - (\lambda / 2\pi r)^3}, \quad [\text{Ом}], \quad (27)$$

где μ – магнитная проницаемость $\mu = \mu_0 \mu_r \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \mu_r$ [Гн/м]; ε – диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \varepsilon_r$ [Ф/м]; ρ – удельное сопротивление [Ом·м]; $\lambda = c/f$ – длина волны.

Выражения (26) и (27) определяют максимальное электрическое и магнитное поле в точке со сферическими координатами (r, φ, θ) .

Модель 2

На практике используют более простую модель сплошного экрана, которая также учитывает отражение, поглощение и многократное переотражение электромагнитной энергии в материале экрана.

В ближней зоне, когда толщина экрана $T < \frac{\lambda}{2\pi}$:

$$R_E = 322 - 10 \lg \left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \cdot f^3 \cdot r^2 \right), \quad [\text{дБ}], \quad (28)$$

$$R_H = 14,6 + 10 \lg \left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \cdot f \cdot r^2 \right), \quad [\text{дБ}], \quad (29)$$

В дальней зоне, когда толщина экрана $T > \frac{\lambda}{2\pi}$:

$$R_{\text{пл.в.}} = 168 - 10 \lg \left(\frac{\mu_r}{\sigma_r} \cdot f \right), \quad [\text{дБ}]. \quad (30)$$

Потери на поглощение A рассчитываются также как и в предыдущем случае:

$$A = 8,69 \cdot \frac{T}{\delta}, \quad [\text{дБ}].$$

$$B = 20 \lg \left[1 - \exp \left(-2 \cdot \sqrt{\frac{2T}{\delta}} \right) \right], \quad [\text{дБ}], \quad (31)$$

где σ_r – относительная проводимость (для стали $\sigma_r = 0,1$); μ_r – относительная магнитная проницаемость;

$$\delta = \frac{0,0661}{\sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}}, \quad [\text{Ом}]. \quad (32)$$

Расчет сплошного экрана

Магнитная проницаемость:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad [\text{Гн/м}], \quad (33)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, μ_r – определяется материалом экрана (для стали лежит в пределах 80–5000).

Диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad [\Phi/\text{М}], \quad (34)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$, $\mu_r = 1$.

Длина волны:

$$\lambda(f) = \frac{c}{f} \quad [\text{М}], \quad (35)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ – скорость света, f – частота электромагнитного поля.

Коэффициент β :

$$\beta(f) = \frac{\lambda(f)}{2\pi r}, \quad (36)$$

где r – расстояние от экрана [М].

Толщина скин-слоя (глубина проникновения):

$$\delta(f) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \cdot f}}, \quad (37)$$

где ρ – удельное сопротивление материала [Ом·М].

Характеристическое сопротивление экрана:

$$Z_s(f) = \sqrt{\frac{2\pi \mu \cdot f \cdot \rho}{1 - e^{-\frac{T}{\delta(f)}}}}, \quad (38)$$

где T – толщина экрана [М].

Характеристическое сопротивление магнитного и электрического поля:

$$Z_{\omega H}(f) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{-\beta(f) + j \cdot \beta(f)^2}{\beta(f) - j \cdot \beta(f)^2 - \beta(f)^3}, \quad [\text{ОМ}]. \quad (39)$$

$$Z_{\omega E}(f) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{j \cdot \beta(f) + \beta(f)^2 - j \cdot \beta(f)^3}{j \cdot \beta(f) + \beta(f)^2}, \quad [\text{ОМ}]. \quad (40)$$

Начальное отражение магнитного и электрического поля:

$$R_H(f) = -20 \lg \left(\frac{4|Z_s(f)| \cdot |Z_{\omega H}(f)|}{(|Z_s(f)| + |Z_{\omega H}(f)|)^2} \right), \quad [\text{дБ}]. \quad (41)$$

$$R_E(f) = -20 \lg \left(\frac{4|Z_s(f)| \cdot |Z_{\omega E}(f)|}{(|Z_s(f)| + |Z_{\omega E}(f)|)^2} \right), \quad [\text{дБ}]. \quad (42)$$

Ослабление электромагнитного поля:

$$A = -20 \lg \left(e^{-\frac{T}{\delta(f)}} \right), \quad [\text{дБ}]. \quad (43)$$

Потери на многократное отражение магнитного и электрического поля:

$$B_H(f) = -20 \lg \left(1 - \left(\frac{|Z_s(f)| - |Z_{\omega H}(f)|}{|Z_s(f)| + |Z_{\omega H}(f)|} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2T}{\delta(f)}} \right), \quad [\text{дБ}]. \quad (44)$$

$$B_E(f) = -20 \lg \left(1 - \left(\frac{|Z_s(f)| - |Z_{\omega E}(f)|}{|Z_s(f)| + |Z_{\omega E}(f)|} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2T}{\delta(f)}} \right), \text{ [дБ]}. \quad (45)$$

Эффективность экранирования магнитного и электрического поля:

$$\mathcal{E}_H(f) = R_H(f) + A(f) + B_H(f), \text{ [дБ]}. \quad (46)$$

$$\mathcal{E}_E(f) = R_E(f) + A(f) + B_E(f), \text{ [дБ]}. \quad (47)$$

На рисунке 9 показана зависимость эффективности экранирования электрической (верхняя кривая) и магнитной (нижняя кривая) составляющих поля в зависимости от частоты, где граничная частота $f_i = \frac{c}{2\pi}$, которая является конечной частотой расчета при условии $\lambda = 2\pi$ (с параметрами $\mu_r = 400$; $\varepsilon_r = 1$; $T = 2,5 \cdot 10^{-5}$; $\rho = 10^{-7}$; $\sigma_r = 0,1$).

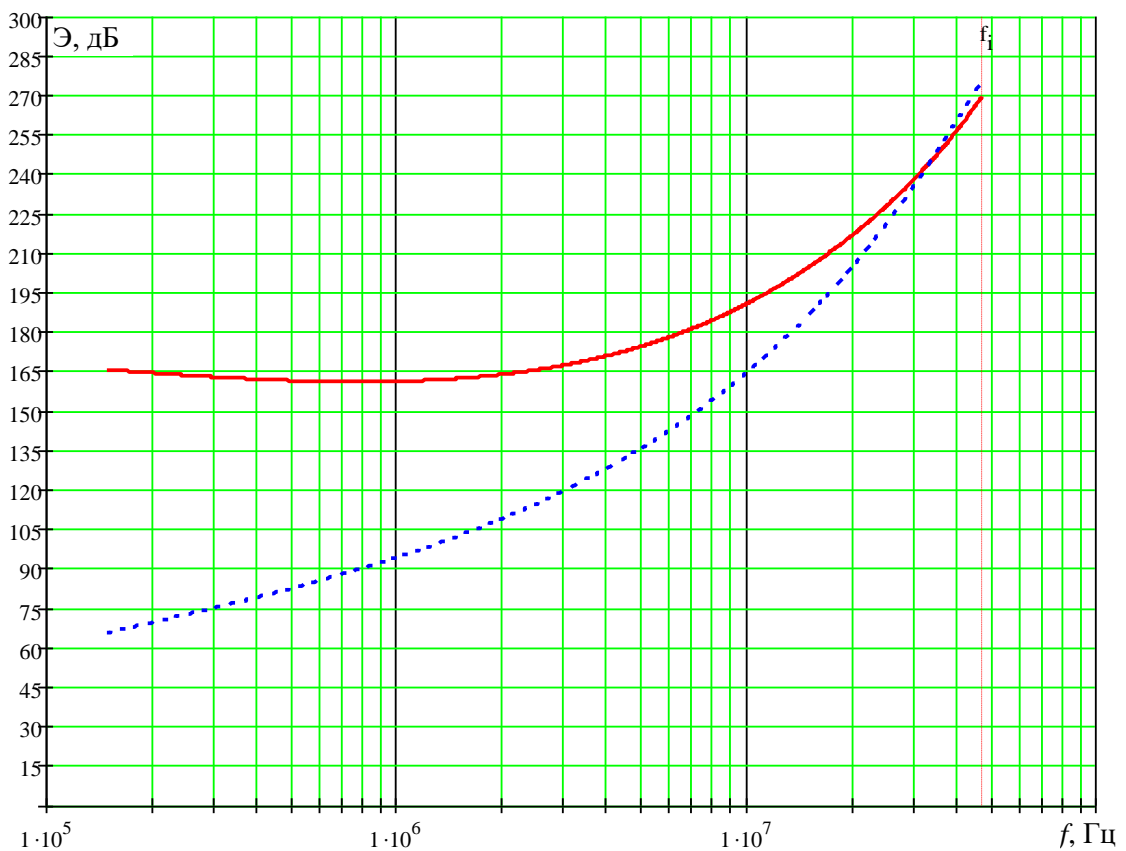


Рисунок 9 – Эффективность экранирования сплошным экраном

Магнитные поля с низким характеристическим сопротивлением $|Z_{\omega}|$ легко проникают сквозь границу раздела воздух – экран, поэтому в случае тонких экранов ослабление магнитного поля значительно ниже, чем ослабление электрического поля.

Обе рассмотренные модели имеют существенное различие в уровнях экранирования, причем это различие зависит от толщины экрана в процентном отношении, около 30 % в диапазоне T от 0,025 до 2 мм. Модель 1 имеет более высокую точность во всем диапазоне частот, т.к. эффективность экранирования имеет зависимости от характеристических сопротивлений экрана и электромагнитного поля. В формулах Модели 2 эффективность

экранирования не зависит от характеристических сопротивлений экрана и электромагнитного поля, что приводит к существенной погрешности в области низких частот.

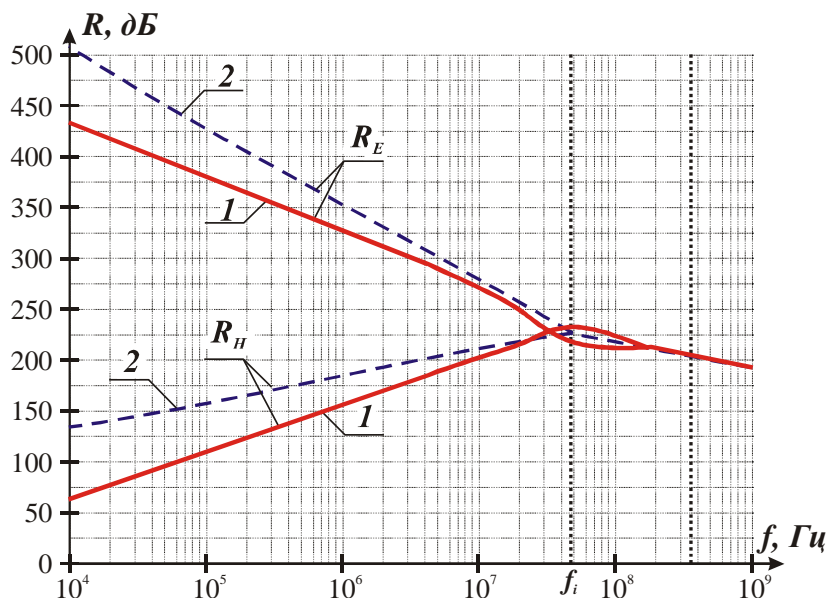


Рисунок 10 – Потери на начальное отражение магнитного поля с учетом (кривые 1) характеристического сопротивления экрана и без учета (кривые 2)

Из рисунка 10 видно, что эффективность экранирования цельным экраном, даже при тонких экранах, для электрической составляющей больше 160 дБ, а для магнитной составляющей поля больше 40 дБ во всем защищаемом диапазоне частот (от 10 кГц до 300 МГц), но на практике такие экраны применяются довольно редко. В основном у экранов преобразовательной техники всегда имеется перфорация в виде вентиляционных отверстий, отверстия под соединительные кабели и под элементы управления, смотровые окна и т.д., которые значительно снижают эффективность экранирования. Также при отсутствии перфорации экрана затруднено естественное охлаждение элементов преобразователей, что значительно усложняет компоновку элементной базы. Следовательно большую ценность для практического использования имеют модели экранов с перфорационными отверстиями.

Модель экрана, имеющего прямоугольное отверстие

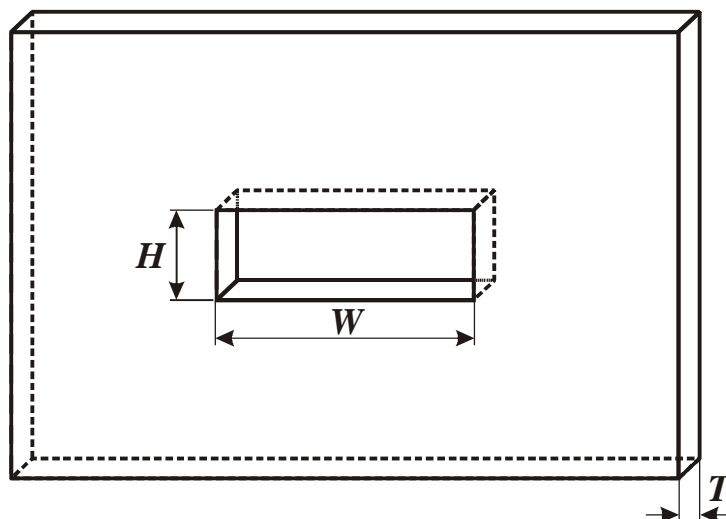


Рисунок 11 – Экран с прямоугольным отверстием

На рисунке 11 показан экран имеющий прямоугольное отверстие, эффективность которого можно рассчитывать по формуле:

$$\Theta = -20 \lg \left(\frac{\sqrt{WH}}{0,24\lambda} \right) - 20 \lg \left(\exp \left[-\frac{\pi T}{W} \sqrt{1 - (2 \cdot \omega \cdot \lambda)^2} \right] \right), \text{ [дБ]}, \quad (48)$$

где W – ширина щели; H – высота щели; T – толщина экрана; $\omega = 2\pi \cdot f$.

Расчет экрана с прямоугольным отверстием

Эффективность экранирования экрана с щелью определяется по формуле:

$$\Theta(f) = -20 \lg \left(\frac{\sqrt{WH}}{0,24\lambda(f)} \right) - 20 \lg \left(\exp \left[-\frac{\pi T}{W} \sqrt{1 - (2 \cdot \omega \cdot \lambda(f))^2} \right] \right), \text{ [дБ]}, \quad (49)$$

где T – толщина экрана; W – ширина отверстия; H – высота отверстия; $\omega = 2\pi f$; $\lambda(f) = \frac{c}{f}$ [м].

На рисунке 12 показана эффективность экранирования стального экрана с прямоугольным отверстием (с параметрами $W = 20 \cdot 10^{-3}$; $H = 5 \cdot 10^{-3}$; $T = 2,5 \cdot 10^{-5}$).

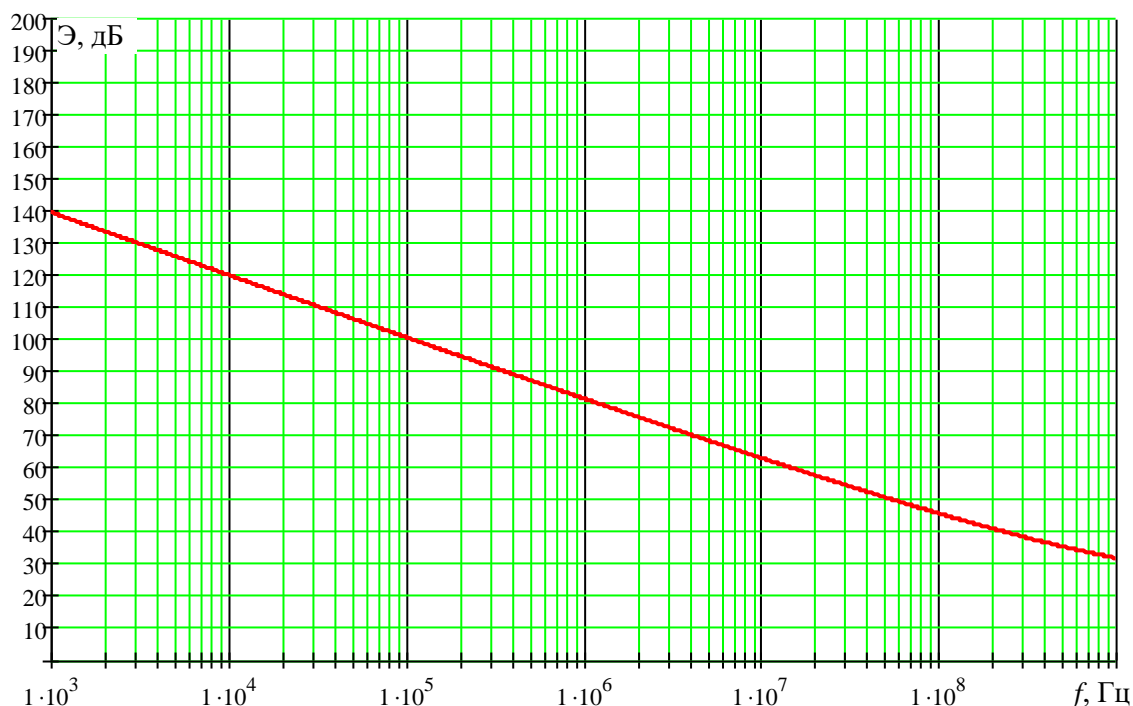


Рисунок 12 – Эффективность экранирования экрана с прямоугольным отверстием

Модель экрана, имеющего круглое отверстие

На рисунке 13 показан экран, имеющий круглое отверстие, эффективность которого рассчитывается по формуле:

$$\Theta = -20 \lg \left(\frac{D}{0,3\lambda} \right) - 20 \lg \left(\exp \left[-\frac{2\pi D}{1,707D} \sqrt{1 - \left(\frac{1,707D}{\lambda} \right)^2} \right] \right), \text{ [дБ]}, \quad (50)$$

где D – диаметр отверстия.

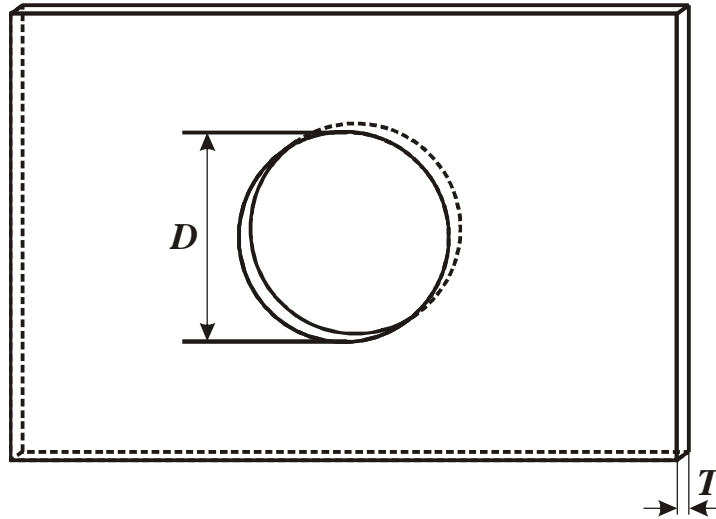


Рисунок 13 – Экран с круглым отверстием

В выражениях первый член описывает влияние отверстия, а второй запредельный волноводный эффект. В общем случае диаметр отверстия не должен превышать $0,05\lambda$.

Расчет экрана с круглым отверстием

Эффективность экранирования экрана с круглым отверстием определяется по формуле:

$$\Theta = -20 \lg \left(\frac{D}{0,3\lambda(f)} \right) - 20 \lg \left(\exp \left[-\frac{2\pi T}{1,707D} \sqrt{1 - \left(\frac{1,707D}{\lambda(f)} \right)^2} \right] \right), \text{ [дБ]}, \quad (51)$$

где T – толщина экрана; D – диаметр отверстия; $\lambda(f) = \frac{c}{f}$ [м].

На рисунке 14 показана эффективность экранирования стального экрана с круглым отверстием (с параметрами $D = 12,62 \cdot 10^{-3}$; $T = 2,5 \cdot 10^{-5}$).

Как правило, на практике экран преобразовательного устройства перфорирован многими прямоугольными отверстиями с размерами a (высота) и b (ширина) (при $b \geq a$), с расстоянием между ними S , которые располагаются матричным способом (рисунок 15, a и b).

Если экран толщиной T изготовлен из металла с удельным сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0 \mu_r \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \mu_r$, а источник помех удалён от него на расстояние r и генерирует сигнал с частотой f и длиной волны $\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{2,998 \cdot 10^8}{f}$, где c – скорость света, тогда эффективность экранирования выражается формулой:

$$\Theta = A_a + R_a + B_a + K_1 + K_2 + K_3, \quad (52)$$

где

$$A_a = 27,3 \frac{T}{b}; \quad R_a = 20 \lg \frac{|1+k|^2}{4|k|}; \quad (53)$$

$$B_a = 20 \lg \left| \frac{1 - (k-1)^2}{(k+1)^2 10^{-2,73 \frac{T}{b}}} \right|. \quad (54)$$

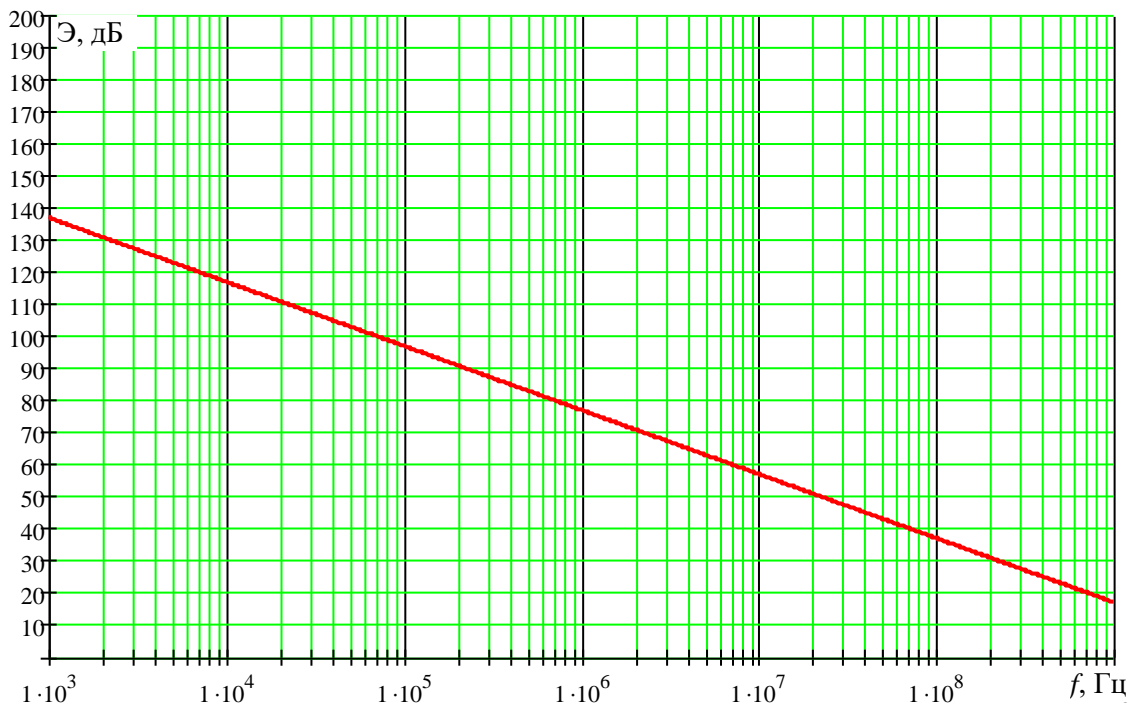


Рисунок 14 – Эффективность экранирования экрана с круглым отверстием

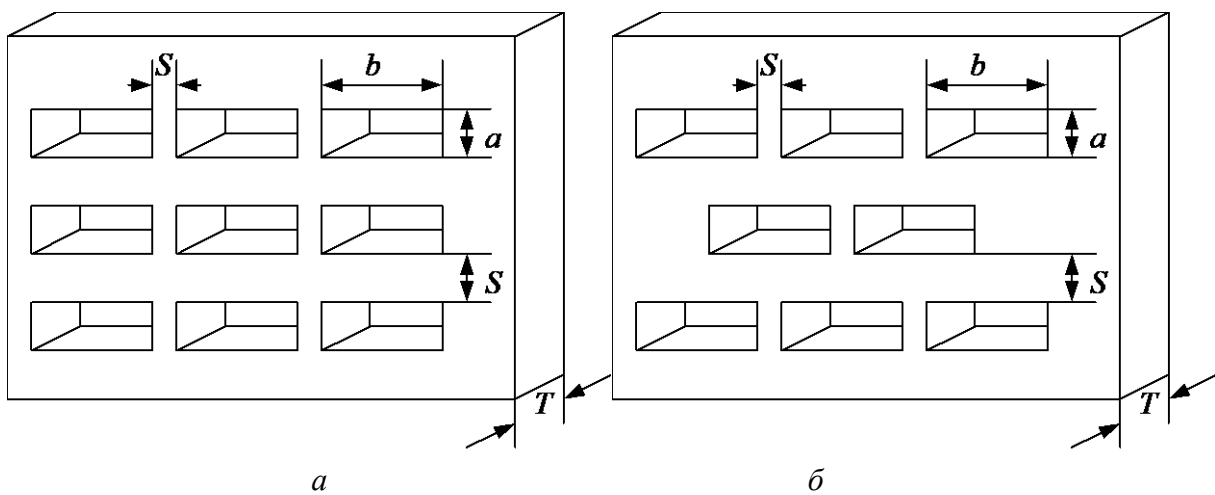


Рисунок 15 – Экраны с матрицей прямоугольных отверстий

В свою очередь,

$$k = \begin{cases} \frac{b}{\pi r} & \text{для магнитных полей;} \\ \frac{j2b}{\lambda} & \text{для плоских волн;} \\ -\frac{4\pi br}{\lambda^2} & \text{для электрических полей;} \end{cases} \quad (55)$$

$$K_1 = 10 \lg \frac{(b+S)(a+S)}{a \cdot b}; \quad (56)$$

$$K_2 = -20 \lg \frac{1+35}{\left(\frac{S}{\delta}\right)^{2,3}}, \quad (57)$$

где глубина проникновения электромагнитного поля δ рассчитывается по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}; \quad (58)$$

$$K_3 = 20 \lg \frac{e^{6,29 \frac{T}{b}} + 1}{e^{6,29 \frac{T}{b}} - 1}. \quad (59)$$

Если источник сигнала находится далеко от экрана (при этом $r \gg b+S$), то следует пользоваться коэффициентом K_1 . По мере приближения источника сигнала к экрану точное расстояние между источником и ближайшей щелью начинает играть всё большую роль. Когда источник помех или воспринимающая их схема расположены вблизи экрана, для большей надёжности можно принять $K_1=0$.

Эффективность экранирования перфорированных экранов (рисунок 16, a и b) с матричным расположением круглых отверстий диаметром D вычисляется также по формуле (52), однако её слагаемые примут вид:

$$A_a = 32 \frac{T}{D}; \quad (60)$$

$$R_a = 20 \lg \frac{|1+k|^2}{4|k|}; \quad (61)$$

$$B_a = 20 \lg \left| \frac{1-(k-1)^2}{(k+1)^2 10^{-3,2 \frac{T}{D}}} \right|; \quad (62)$$

$$k = \begin{cases} \frac{D}{3,682r} & \text{для магнитных полей;} \\ \frac{j2\pi D}{3,682\lambda} & \text{для плоских волн;} \\ -\frac{4\pi^2 Dr}{3,682\lambda^2} & \text{для электрических полей.} \end{cases} \quad (63)$$

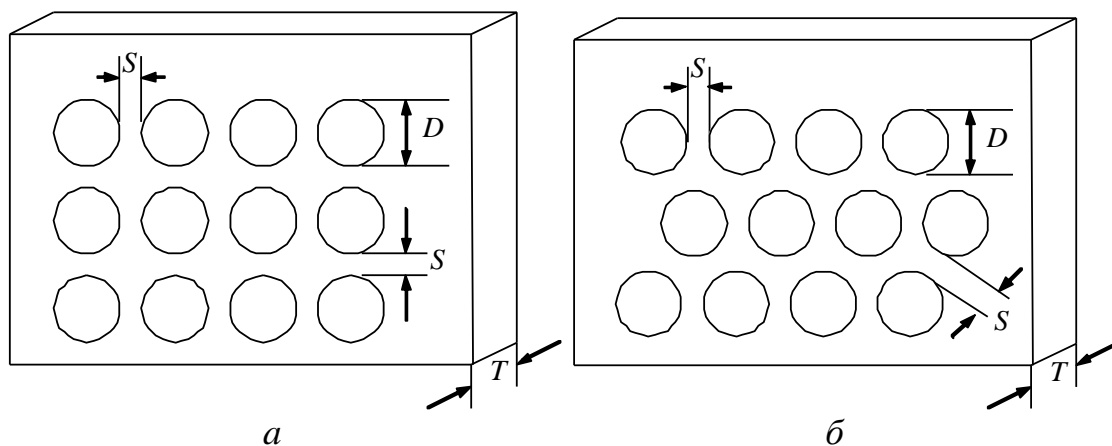


Рисунок 16 – Экраны с матрицей круглых отверстий

$$K_1 = \begin{cases} 10 \lg \frac{4(D+S)^2}{\pi D^2} & \text{(рисунок 6, а);} \\ 10 \lg \frac{3,464(D+S)^2}{\pi D^2} & \text{(рисунок 6, б);} \end{cases} \quad (64)$$

$$K_2 = -20 \lg \frac{1+35}{\left(\frac{S}{\delta}\right)^{2,3}}, \quad (65)$$

$$K_3 = 20 \lg \frac{e^{7,37 \frac{T}{D}} + 1}{e^{7,37 \frac{T}{D}} - 1}. \quad (66)$$

И в этом случае, когда источник помех находится вблизи экрана, для большей надёжности следует принять коэффициент $K_1 = 0$.

При применении проволочных сеток (рисунок 17) следует пользоваться выражениями для экрана с матрицей прямоугольных щелей. При этом $T = d$ (т.е. толщина экрана равна диаметру проволоки) и коэффициент $K_1 = 0$.

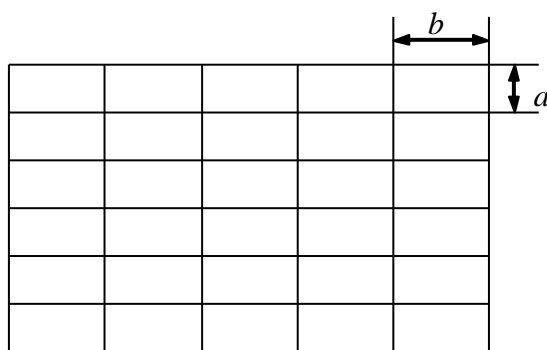


Рисунок 17 – Проволочная сетка (диаметр проволоки d)

Швы в экране должны быть максимально плотными и не иметь щелей. Этим требованиям отвечают сплошные сварные швы, при этом для образования однородного контакта химический состав присадочного прутка (особенно содержание углерода в нём) не должен сильно отличаться от химического состава материала экрана.

Варианты индивидуального задания № 2

Расчет сплошного экрана

Вариант	μ_r	ε_r	T , [м]	ρ , [Ом·м]
1	200	1	$0,05 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}
2	300	1	$0,07 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
3	400	1	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
4	400	1	$0,01 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
5	400	1	$0,025 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
6	500	1	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
7	500	1	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$
8	500	1	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$
9	700	1	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$
10	800	1	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$
11	900	1	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$
12	1000	1	$0,79 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$
13	1200	1	$0,05 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$
14	1300	1	$0,07 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$
15	1400	1	$0,08 \cdot 10^{-3}$	$1,145 \cdot 10^{-7}$
16	1500	1	$0,09 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
17	2000	1	$0,11 \cdot 10^{-3}$	$1,165 \cdot 10^{-7}$
18	2000	1	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$
19	3100	1	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$1,127 \cdot 10^{-7}$
20	3500	1	$0,05 \cdot 10^{-3}$	$1,187 \cdot 10^{-7}$

Расчет экрана с прямоугольным отверстием

Вариант	W , [м]	H , [м]	T , [м]
1	$20 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
2	$30 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^{-3}$
3	$40 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
4	$50 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
5	$60 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$0,025 \cdot 10^{-3}$
6	$70 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
7	$75 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
8	$80 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$
9	$90 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
10	$20 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^{-3}$
11	$30 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,09 \cdot 10^{-3}$
12	$40 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$
13	$50 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
14	$60 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$
15	$70 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$
16	$75 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
17	$80 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$
18	$90 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
19	$50 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$
20	$60 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$

Расчет экрана с круглым отверстием

Вариант	$D, [м]$	$T, [м]$
1	$2 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
2	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^{-3}$
3	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
4	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
5	$1 \cdot 10^{-3}$	$0,025 \cdot 10^{-3}$
6	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
7	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
8	$8 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$
9	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
10	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$
11	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
12	$2 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^{-3}$
13	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
14	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
15	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$0,025 \cdot 10^{-3}$
16	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
17	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
18	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$
19	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
20	$6 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$

2 ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Резисторы и их свойства.
2. Электролитические и неполярные конденсаторы.
3. Биологические аспекты ЭМС.
4. Транзисторы в режиме ключа и их свойства.
5. Полупроводниковые диоды и их свойства в режиме коммутации.
6. Трансформаторы и индуктивности.
7. Источники и воздействие электромагнитных излучений на электронные устройства.
8. Защитные экраны от электромагнитного воздействия.
9. Внутрисистемные помехи.
10. Медицинское оборудование и его влияние на человека.
11. ЭМС и электробезопасность строительных приборов.
12. Защитное заземление и его свойства при защите от электромагнитных помех.
13. Молниезащита электрических сетей.
14. Электромагнитные реле.
15. Медицинские лазеры и их влияние на человека.
16. Стойкость устройств преобразовательной техники к высоковольтным импульсным помехам.
17. Кондуктивная помехоэмиссия в питающую сеть преобразователями параметров электрической энергии.

3 ТЕМЫ ТВОРЧЕСКИХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

1. Эмиссия помех от устройства управления вентиляльным электроприводом.
2. Исследование на электромагнитную совместимость однофазного автотрансформатора с электроприводом.
3. Проверка технических средств на помехоэмиссию от светового оборудования на базе полупроводниковых диодов, применяемого в промышленных зонах.
4. Формирование требований к контроллеру «Деконт» на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю.
5. Проверка на ЭМС силового электронного устройства, применяемого в электрохимических установках.
6. Проверка импульсного источника вторичного электропитания на кондуктивную помехоэмиссию.
7. Требования и методы испытаний терапевтического УВЧ-аппарата на ЭМС.
8. Анализ требований и выбор методик испытаний на ЭМС источников бесперебойного питания «VESTA 1000».
9. Проверка на ЭМС комплекса импульсно-модуляционных усилителей.

4 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение электромагнитной совместимости электротехнического оборудования.
2. Что такое промышленная радиопомеха?
3. Что означает порт между ТС и внешней электромагнитной средой?
4. Какими параметрами характеризуется качество электрической энергии?
5. Какая частота является граничной между НЧ и ВЧ помехой?
6. Дайте определение нежелательному радиоизлучению.
7. Что такое избирательность радио устройства?
8. Что такое фликкер и доза фликкера?
9. Чем отличается симметричная и несимметричная электромагнитная помеха?
10. Дайте определение квазипикового и пикового детектора.
11. Что такое безэховая камера и для чего она необходима?
12. Чем характеризуется симметричная полосовая линия и для чего она нужна?
13. Для чего необходим эквивалент сети и какие они бывают.
14. Назовите три проблемы, которые выделяются при электромагнитной совместимости ТС?
15. В каких полосах частот измеряются напряжения и токи радиопомех, а в каких напряженности электрической и магнитной составляющих поля радиопомех?
16. Какие исследования проводятся на устойчивость технических систем?
17. Несущие частоты. Спектры идеальных и реальных напряжений от преобразователей электрической энергии.
18. Влияние полосы пропускания приемников на измеряемый уровень радиопомех.
19. Ряды Фурье и расчет амплитудных коэффициентов.
20. Волновое сопротивление электромагнитного поля в ближней и дальней зоне излучения.
21. Чем характеризуется высокоомное и низкоомное поле в ближней зоне излучения?
22. Система координат и расчетные формулы для электромагнитного поля излучения от короткого диполя.
23. Система координат и расчетные формулы для электромагнитного поля излучения от контура малой площади.
24. Электромагнитная совместимость систем и пути распространения помех между

источником и рецептором.

25. Электромагнитная связь через общее сопротивление между системами.
26. Магнитная (индуктивная) связь между системами.
27. Электрическая (емкостная) связь между системами.
28. Время задержки распространения сигналов в проводниках печатных плат и волновое сопротивление поверхностной микрополосковой линии.
29. Время задержки распространения сигналов в проводниках печатных плат и волновое сопротивление внутренней полосовой линии.
30. Определение дальней зоны излучения по критерию Релея и Максвелла.
31. Дайте характеристику дифференциальному, синфазному и антенному типам паразитной связи.
32. Преобразование дифференциального сигнала в синфазный.
33. Напишите расчетное выражение напряженности электрического поля, создаваемого от печатной платы преобразователя электрической энергии.
34. Помехоэмиссия от кабелей питания устройств промышленной электроники.
35. Типы фильтров от радиопомех.
36. Что представляет синфазный дроссель и для чего он предназначен?
37. Фильтр сетевого питания.
38. Фильтр ферриты с потерями и их преимущества.
39. Эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в материал экрана.
40. Особенность экранов от магнитных полей низкочастотного диапазона.
41. Синфазные и противофазные токи.
42. Частотные зависимости модуля и фазы импеданса реальных резисторов.
43. Частотные зависимости модуля и фазы импеданса реальных конденсаторов.
44. Защиты контакторов механического ключа для снижения искрения.
45. Диодная защита для индуктивной нагрузки полупроводниковых преобразователей электрической энергии.
46. Возникновение ВЧ-помех в транзисторных широтно-импульсных преобразователях.
47. Схемы замещения транзисторных широтно-импульсных преобразователей с учетом паразитных параметров.
48. Сетевые источники питания на микросхемах Link Switch.
49. Повышение устойчивости синхронизации скремблированием передаваемых данных в слаботочных линиях связи.
50. Снижение уровня излучаемых помех витой пары путем предварительного скремблирования передаваемых данных в слаботочных линиях связи.
51. Преобразовательные устройства на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) и их особенность в снижении электромагнитных помех.
52. Виды испытаний технических средств на помехоэмиссию.
53. Виды испытаний технических средств на помехоустойчивость.

5 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Укажите параметры импульсных сигналов:
 - a) амплитуда, частота;
 - b) длительность, скважность импульсов;
 - c) относительная длительность импульсов, частота, время фронта;
 - d) амплитуда, длительность, время фронтов, спад вершин.

2. Укажите частотный диапазон работы усилителя постоянного тока:
 - a) $f_H = 0, f_B = f_1$;
 - b) $f_H = f_1, f_B = f_2$;
 - c) $f_H = f_B = f$;
 - d) $f_H = 0, f_B = 0$.
3. Укажите задачи, решаемые стабилизатором напряжения:
 - a) компенсирует выходное напряжение при изменении сопротивления нагрузки;
 - b) поддерживает неизменным выходное напряжение при изменении входного;
 - c) обеспечивает неизменность выходной мощности;
 - d) обеспечивает постоянство сопротивления нагрузки.
4. Укажите свойство избирательного усилителя:
 - a) усиливает по постоянному току;
 - b) ослабляет сигнал в заданном диапазоне частот;
 - c) обладает коэффициентом усиления на заданной частоте;
 - d) повторяет входной сигнал.
5. Укажите частотный диапазон работы избирательного усилителя:
 - a) $f_H = 0, f_B = f_1$;
 - b) $f_H = f_1, f_B = f_2$;
 - c) $f_H = f_B = f$;
 - d) $f_H = 0, f_B = 0$.
6. Укажите параметры обеспечиваемые эквивалентом сети:
 - a) сопротивление сети;
 - b) мощность сети;
 - c) импеданс сети.
7. Определите частотный диапазон эквивалента сети NNB-12:
 - a) 50 Гц-150 кГц;
 - b) 150 кГц-30 МГц;
 - c) 30 МГц-3 ГГц.
8. Определите частотный диапазон работы селективного микро вольтметра SMV-11:
 - a) 50 Гц-150 кГц;
 - b) 150 кГц-30 МГц;
 - c) 30 МГц-3 ГГц;
 - d) 9 кГц - 30 МГц.
9. Определите измерительный импеданс эквивалента сети NNB-12:
 - a) 150 Ом;
 - b) 75 Ом;
 - c) 50 Ом.
10. В каком частотном диапазоне проводится измерение квазипиковых импульсных напряжений радиопомех QPI:
 - a) 50 Гц-150 кГц;
 - b) 150 кГц-30 МГц;
 - c) 30 МГц-3 ГГц;
 - d) 10 кГц - 150 кГц.
11. В каком частотном диапазоне проводится измерение квазипиковых импульсных напряжений радиопомех QPII:
 - a) 50 Гц-150 кГц;
 - b) 150 кГц-30 МГц;
 - c) 30 МГц-3 ГГц;

- d) 10 кГц - 150 кГц.
12. В каких единицах проводится измерение уровня помехи на всём частотном диапазоне?
- Ом;
 - В;
 - дБ;
 - А.
13. Какие генераторы, имитирующие высоковольтный электростатический разряд, используются для проведения испытаний на стойкость электронной аппаратуры к электростатическим разрядам:
- ИГЭ 15.2;
 - SMV 11;
 - NNB-12;
 - ИГМ 4.1.
14. Для проведения испытаний на стойкость электронной аппаратуры используются имитационные генераторы высоковольтных импульсных помех, которые обладают возможностью введения кондуктивных помех на порты электропитания:
- ИГЭ 15.2;
 - SMV 11;
 - NNB-12;
 - ИГМ 4.1.
15. Укажите устройство, необходимое для того, чтобы избежать попадания помех на оборудование, не подлежащее испытаниям, которое может быть подключено к тем же линиям электропитания:
- УСР;
 - ИТС;
 - МИП;
 - ФИ.
16. Анализатор качества энергоснабжения МТ-1010 предназначен для измерения мощности, тока, напряжения, частоты, энергии, фазового сдвига, гармонических искажений. Укажите максимальное значение измеряемых гармоник:
- 10;
 - 40;
 - 60.
17. Результаты испытаний на стойкость к внешним воздействиям классифицируются, исходя из прекращения выполнения функций или ухудшения качества функционирования в сравнении с установленным уровнем. Укажите самый жесткий критерий качества функционирования:
- А;
 - В;
 - С;
 - Д.
18. Укажите параметры импульсной последовательности:
- амплитуда, частота;
 - длительность, скважность импульсов;
 - относительная длительность импульсов, частота, время фронта;
 - амплитуда, длительность, время фронтов, спад вершин.
19. Укажите помехи, которые представляют собой токи, текущие по проводящим конструкциям и земле:
- кондуктивные помехи;

- b) микросекундные импульсные помехи;
 - c) индуктивные помехи;
 - d) электромагнитные помехи.
20. Что понимается под коммутационными переходными процессами?
- a) переключения в мощных системах электроснабжения;
 - b) резонансные колебания в электрических сетях;
 - c) дуговые разряды в электрических установках.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заболоцкий, А.М. Электромагнитная совместимость: преднамеренные силовые электромагнитные воздействия: Учебное пособие [Электронный ресурс] / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, С.П. Куксенко. – Томск: ТУСУР, 2018. – 114 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8163> (дата обращения: 16.05.2024).
2. Миловзоров, О.В. Электроника : учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2024. – 407 с.– Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/544569> (дата обращения: 03.06.2024).
3. Седельников, Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учебное пособие для вузов / Ю.Е. Седельников, Д.А. Веденькин ; под редакцией Ю.Е. Седельникова. – М. : Юрайт, 2024. – 318 с.– Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/540403> (дата обращения: 29.05.2024).
4. Тихомиров, А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учебное пособие [Электронный ресурс] / А.А. Тихомиров, В.И. Ефанов. – Томск: ТУСУР, 2012. – 229 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/748> (дата обращения: 10.05.2024).
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры : учебное пособие : в 2 частях / Р.Г. Галеев, А.С. Волошин, И.В. Говорун [и др.]. – Красноярск : СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, 2023 – Часть 1 – 2023. – 82 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/400577> (дата обращения: 09.06.2024).