

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**"Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники"
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств

**ЭКРАНИРОВАНИЕ УЗЛОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

**Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
210302**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники"
ТУСУР**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)**

**Утверждаю
Зав. кафедрой СВЧиКР
_____ С.Н. Шарангович
" __ " _____ 2011**

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств

**ЭКРАНИРОВАНИЕ УЗЛОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

**Руководство к лабораторной для студентов специальности
210302**

**Разработчики:
проф. каф. СВЧиКР
_____ А.А. Тихомиров
проф. каф. СВЧиКР
_____ В.И. Ефанов**

2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ВВЕДЕНИЕ.....	4
3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ.....	4
3.1. Физическая сущность экранирования.....	4
3.2. Структура электромагнитного поля.....	5
3.3. Эквивалентный радиус экрана.....	6
3.4. Влияние материала экрана на эффективность экранирования.....	7
4. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ.....	8
5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	10
6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	12
8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	13

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование эффективности экранирования источника вторичного питания экранами, выполненными из разных материалов различной толщины.

2. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры, средств и систем при решении задач электромагнитной совместимости во многих случаях на практике решается путем применения экранов. Экранирование является конструкторским способом ослабления электромагнитного поля в пределах пространства, задаваемого формой и размерами экрана. Основным назначением экранов является локализация поля помех в месте их возникновения, либо защита чувствительных к помехам элементов радиоэлектронных средств от внешних полей.

Возможны три случая экранирования:

- 1) Экранируются отдельные элементы, узлы и субблоки устройства, форма и размеры которых определяют конструкцию экрана.
- 2) Внешний металлический корпус отдельного блока, прибора, устройства служит экраном.
- 3) Металлический экран является самостоятельным сооружением для защиты от внешних электромагнитных полей или локализации помех всего радиоэлектронного комплекса (здание, сооружение).

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

3.1. Физическая сущность экранирования

Эффективность экранирования электрической S_E и магнитной S_H составляющих поля обычно выражается в децибелах и определяется формулой

$$S_E = 20 \lg(E_0/E_1), \quad S_H = 20 \lg(H_0/H_1), \quad (1)$$

где E_0 , H_0 – величины напряженности электрического и магнитного поля в заданной точке пространства при отсутствии экрана, а E_1 , H_1 – при его наличии. Обычно для защиты от помех и наводок величина S_E (S_H) должна составлять 30÷60 дБ, однако в ряде случаев необходимо обеспечить эффективность экранирования порядка 100÷120 дБ. Отметим, что экран не только локализует и ослабляет поле помех, но и искажает поле источника. Поэтому при экранировании необходимо учитывать реакцию экрана на защищаемые цепи и элементы устройств.

Физическая сущность экранирования сводится к двум эффектам: 1) отражение электромагнитной волны от поверхностей как внутри, так и вне экрана и 2) поглощение поля в материале экрана.

Под действием источника поля на внешней стороне экрана, обращенного к источнику, возникают заряды, а в его стенках – токи, поля которых близки к полю источника, а по направлению противоположны ему и поэтому происходит отражение электромагнитной волны. Эффективность экранирования тем выше, чем больше отличие характеристического сопротивления диэлектрика (воздуха) от характеристического сопротивления материала экрана.

По мере распространения волны в толще экрана поле, многократно отражаясь от стенок, затухает за счет поглощения, вызванного тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов.

В общем случае электромагнитные экраны можно классифицировать по трем признакам:

- а) типу поля помехи;
- б) конструктивной форме;
- в) материалу и конструкции стенок экрана.

3.2. Структура электромагнитного поля

Физические свойства электромагнитного поля, как и поля помехи, различны в дальней и ближней зонах источника излучения. Поэтому, в зависимости от частоты f (длины волны λ) источника поля и его расстояния r до экрана различают условно три режима экранирования: электрический, магнитный и электромагнитный.

В дальней зоне ($r > \lambda / 2\pi$) фронт волны можно считать плоским, а характеристическое (волновое) сопротивление диэлектрической среды равным

$$Z_{\text{д}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}, \quad (2)$$

где значения диэлектрической проницаемости вакуума $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и магнитной проницаемости $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, ϵ_r и μ_r – значения относительных проницаемостей среды. В этом случае имеет место электромагнитный режим работы экрана.

В ближней зоне ($r < \lambda / 2\pi$) необходимо выделять преобладающий вид энергии электромагнитного поля и соответственно применять экранирование электрической или магнитной составляющей поля.

Из курса электродинамики известно, что вблизи элементарного

электрического излучателя (диполя Герца) создается поле, основная энергия которого сосредоточена в электрической составляющей и она убывает с расстоянием как $E \sim 1/r^3$, в то время как $H \sim 1/r^2$.

Вблизи элементарного магнитного излучателя (рамки с током) создается поле, основная энергия которого сосредоточена в магнитной составляющей. При этом $H \sim 1/r^3$, а $E \sim 1/r^2$.

Волновое сопротивление в ближней зоне для электрического излучателя $Z_{\text{д}}^E$ велико, а для магнитного $Z_{\text{д}}^H$ мало и может быть определено как

$$Z_{\text{д}}^E = \frac{Z_0}{1 + \alpha^2} \sqrt{\frac{1 + \alpha^6}{\alpha^2}}, \quad Z_{\text{д}}^H = Z_0 (1 + \alpha^2) \sqrt{\frac{\alpha^2}{1 + \alpha^6}}, \quad (3)$$

где $\alpha = 2\pi r/\lambda$; $Z_0 = 120\pi = 377$ Ом. При $\alpha \ll 1$, $Z_{\text{д}}^E \cong Z_0/\alpha$, $Z_{\text{д}}^H \cong Z_0\alpha$, и $Z_{\text{д}}^E \gg Z_{\text{д}}^H$. На рис. 1 показаны эти зависимости.

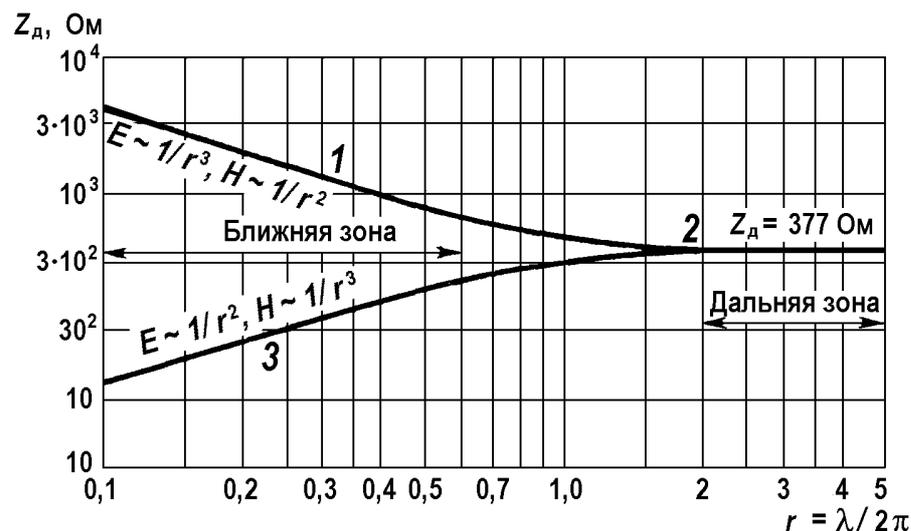


Рис. 1. Зависимость волнового сопротивления воздуха от расстояния до излучателя: 1 – область преобладания электрического поля ($Z_{\text{д}}^E \sim 1/r$); 2 – область дальней зоны с плоской поперечной волной; 3 – область преобладания магнитного поля ($Z_{\text{д}}^H \sim r$)

3.3. Эквивалентный радиус экрана

Для сравнения экранов различных форм вводится обобщенный параметр – эквивалентный радиус $R_{\text{э}}$. Экран прямоугольной формы объемом $V = a \cdot b \cdot h$ имеет эквивалентный радиус

$$R_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V} = 0,62 \sqrt[3]{a \cdot b \cdot h}, \quad [\text{м}] \quad (4)$$

а экран цилиндрической формы высотой h и диаметром D имеет

$$R_{\text{Э}} = 0,57 \sqrt[3]{D^2 \cdot h}, [\text{м}] \quad (5)$$

Для сферического экрана диаметром D величина $R_{\text{Э}} = 0,5D$.

Необходимо учитывать, что форма экрана влияет на его резонансные свойства. Если длина волны поля близка к геометрическим размерам экрана, то происходит резкое увеличение напряженности поля внутри экрана. Режим работы экрана, когда проявляются его резонансные свойства, называют волновым.

3.4. Влияние материала экрана на эффективность экранирования

Материал, из которого делаются стенки экрана, оказывает наибольшее влияние на эффективность экранирования. Величиной, характеризующей экранирующее действие материала, является глубина δ проникновения поля в металл и его характеристическое сопротивление $Z_{\text{М}}$.

Расстояние, на котором электромагнитное поле в металле затухает в $e = 2,718$ раз, принято называть глубиной проникновения или толщиной скин-слоя.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}, \quad (6)$$

где σ – проводимость материала стенок экрана.

Характеристическое сопротивление металла выражается следующей зависимостью

$$Z_{\text{М}} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \mu_r}{\sigma}} = \frac{1}{\delta \sigma}, \quad (7)$$

На высоких частотах величина $Z_{\text{М}}$ много меньше характеристического сопротивления вакуума Z_0 , и в этом случае проявляются хорошие отражающие свойства металлов. В табл. 1. представлены значения проводимости наиболее часто используемых материалов, а на рис. 2, a – зависимость $S_{\text{Н}}$ от частоты.

Таблица 1

Материал	серебро	медь	алюминий	цинк	латунь	сталь
$\sigma, \text{См/м}$	$6,25 \cdot 10^7$	$5,65 \cdot 10^7$	$3,57 \cdot 10^7$	$1,71 \cdot 10^7$	$1,38 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$

Для немагнитных материалов $\mu_r = 1$, а для магнитных зависит от частоты. Для экранов из стали эта зависимость может быть учтена следующим образом: при $f < 4$ МГц $\mu_r = 150 - 30f$, где значение частоты подставляется в мегагерцах.

Конструкция стенок экрана в значительной степени влияет на его эффективность. Наиболее применимы в радиоаппаратуре сплошные, перфорированные, многослойные, сетчатые экраны и экраны из фольги.

4. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Строгий теоретический расчет эффективности экранирования весьма сложен и эта задача решена для трех случаев:

1. Плоский однородный бесконечный экран при падении на него плоской монохроматической электромагнитной волны.
2. Длинный цилиндр с источником поля в виде тонкого проводника.
3. Сферический идеально проводящий экран с источником поля в центре.

В результате решения уравнений Максвелла в первом случае для металлического экрана толщиной t получено следующее выражение

$$S = 20 \lg \left\{ \operatorname{ch} kt \left[1 + 0,5 \left(\frac{Z_{\text{д}}}{Z_{\text{м}}} + \frac{Z_{\text{м}}}{Z_{\text{д}}} \right) \operatorname{th} kt \right] \right\}, \quad (8)$$

где $k = \sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r} = \sqrt{2}/\delta$ – значение волнового числа в металле, м^{-1} ; $\operatorname{ch}x$ и $\operatorname{th}x$ – гиперболические косинус и тангенс. Выражение (8) можно представить в виде суммы трех слагаемых и анализировать отдельно

$$S^{\Sigma} = A + R + B. \quad (9)$$

Каждое из этих слагаемых приведено в следующем выражении

$$S^{\Sigma} = \frac{8,69t}{\delta} + 20 \lg \frac{(Z_{\text{д}} + Z_{\text{м}})^2}{4Z_{\text{д}}Z_{\text{м}}} + 20 \lg \left[1 - \frac{(Z_{\text{д}} - Z_{\text{м}})^2}{(Z_{\text{д}} + Z_{\text{м}})^2} \exp\left(-\frac{2t}{\delta}\right) \right], \quad (10)$$

Здесь A – затухание поля за счет поглощения; R – ослабление поля за счет отражений от стенок; B – ослабление за счет многократных отражений внутри металла.

Как правило, $A_{E,H} > 4$ дБ и многократные отражения от стенок внутри экрана можно не учитывать ($B < A$). Анализ выражения (10) показывает, что в диапазоне частот до десятков мегагерц преобладает экранирование вследствие отражения. На более высоких частотах эффективнее экранирование вследствие поглощения ($A > R$) (см. рис. 2, б).

В общем случае, при толщине стенки экрана $t > \delta$, он обеспечивает защиту от всех видов помех, кроме магнитных полей низкочастотного диапазона. Это объясняется тем, что на низких частотах характеристическое сопротивление $Z_{\text{м}}$ близко к значению $Z_{\text{д}}^H$, а затухание поля незначительно. Следовательно, магнитные поля являются определяющими при конструировании экранов.

Отметим, что рассмотренный выше случай плоского бесконечного экрана идеализирован и не учитывает многих факторов.

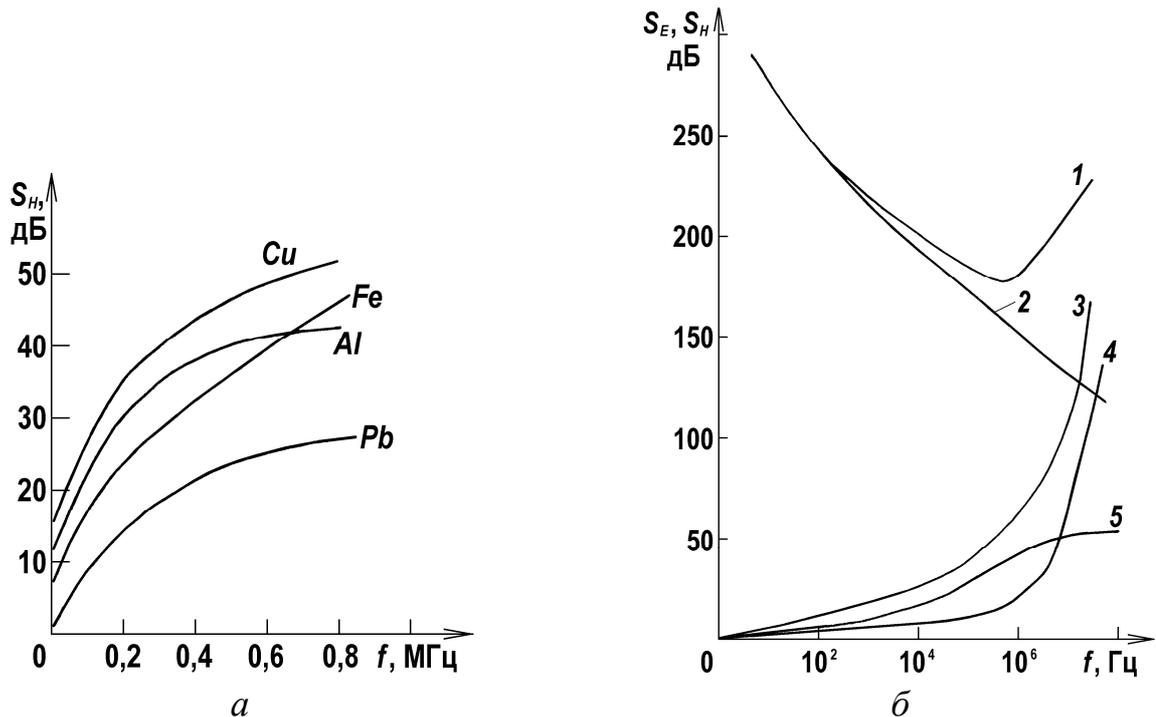


Рис. 2. Влияние параметров металлического экрана на эффективность экранирования: *a* – зависимость эффективности экранирования различных металлов от частоты; *б* – зависимость различных составляющих эффективности экранирования медного экрана толщиной $t = 1$ мм от частоты: 1 – S_E^Σ ; 2 – R_E ; 3 – S_H^Σ ; 4 – $A_{E,H}$; 5 – R_H

В общем случае эффективность экранирования зависит не только от частоты f и толщины экрана t , характера источника поля, формы, материала экрана, но и от неравномерности распределения поля, его направления и конфигурации, конструкции экрана и проникновения поля через щели и отверстия в реальном экране. Эксперименты показывают, что влияние дополнительных путей проникновения поля через щели и отверстия в экране является преобладающим. Это существенно уменьшает теоретически рассчитанное значение эффективности экранирования S .

В результате анализа многих конструкций экранов различного назначения получено следующее выражение для эффективности экранирования магнитных и электрических полей в области низких частот

$$S_{E,H} = 20 \lg 0,024 \left\{ \sqrt{\frac{Z_{д}^{E,H}}{Z_M}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\Omega}} \exp \frac{2\pi t}{l} \right\}, \quad (11)$$

где l – наибольший размер отверстия (щели) в экране, м. Эта формула является наиболее общей. Для перфорированного экрана в соотношение (11) добавляется множитель $(1 - D/S)^2$, где D и S диаметр отверстия и расстояния между ними.

5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В большинстве современных радиоэлектронных устройств в качестве источников вторичного электропитания (ИВЭП) широко применяются импульсные источники с бестрансформаторным входом. Основное достоинство этих устройств – высокий КПД, малые массогабаритные показатели. Однако активные силовые элементы ИВЭП такого типа работают в ключевом режиме с короткими фронтами импульсов напряжения и тока, с частотой следования десятки кГц. В результате этого формируются помехи с высоким уровнем и широким спектром частот (до десятков МГц). Установка для исследования эффективности экранирования состоит из импульсного ИВЭП, приемника поля помех, набора экранов из разных материалов и осциллографа.

Источником электромагнитного помехонесущего поля является импульсный силовой трансформатор, намотанный на ферритовом кольце. Трансформатор вынесен за пределы блока ИВЭП, и на него при проведении эксперимента надеваются экраны с различными характеристиками. Схема установки изображена на рис. 3.

Характеристики исследуемых экранов приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ экрана	Материал экрана	Вид	Параметры	
			толщина стенки t , мм	μ_r
1	пермалюевая фольга	сплошной	0,05	1000
2	сталь	сплошной	0,5	100
3	сталь	сплошной	1,0	100
4	латунь	перфорированный	0,5	1
6	латунь	сплошной	0,5	1
7	оцинкованная сталь	с вертикальной щелью	0,5	100
8	оцинкованная сталь	с горизонтальной щелью	0,5	100
9	оцинкованная сталь	сплошной	0,5	100

Рецептором поля помех P в лабораторной работе является колебательный контур. Используя рецептор помех, измеряют зависимость напряженности поля H от расстояния r между трансформатором и рецептором. Этот же рецептор помех применяется для измерения эффективности экранирования S_H .

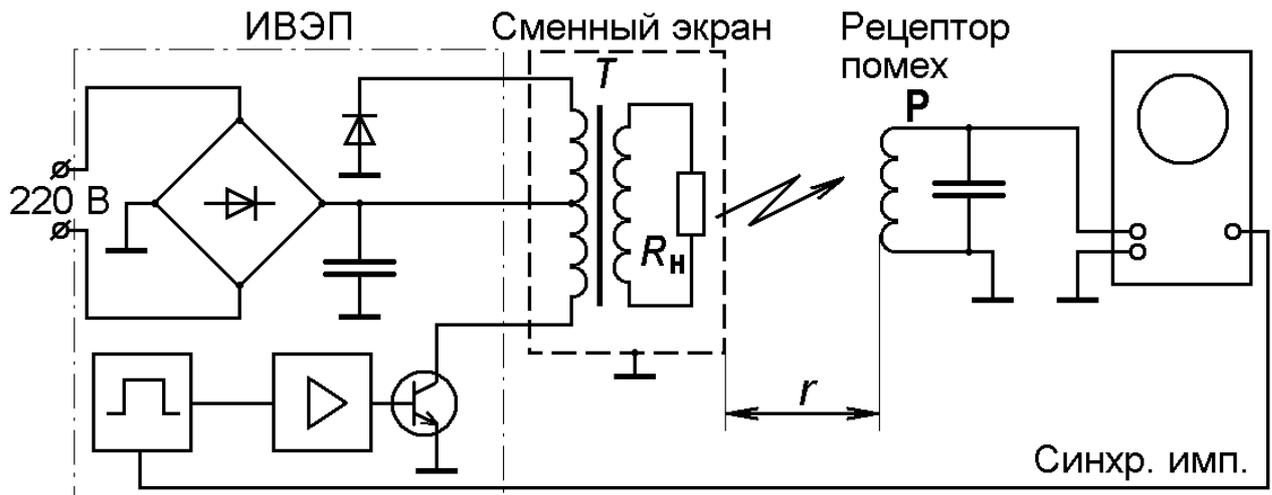


Рис. 3. Схема экспериментальной установки при оценке эффективности экранирования

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.1. Включите ИВЭП в сеть 220 В, для этого тумблером "Сеть" включите блок питания. Подключите рецептор помех P к входу осциллографа, выход синхронизации блока – к гнезду внешней синхронизации осциллографа. Включите осциллограф согласно его руководству по эксплуатации. Убедитесь в наличии помехонесущего поля. Зарисуйте форму сигнала помехи и оцените ее уровень (амплитуда напряжения на входе осциллографа).

6.2. Определите структуру помехонесущего поля. Для этого измерьте зависимость H от расстояния r (в пределах от 1 до 14 см) с помощью рецептора помех P , удаляя его по салазкам от трансформатора. Постройте зависимость H/H_{\max} как функцию расстояния r , проводя замеры напряжения, пропорционального H через 1 см.

6.3. Измеряя напряжение помехи, пропорциональное H_0 и H_1 (без экрана и при его наличии), определите эффективность экранирования магнитного поля экранами №1 ÷ №6 на нескольких расстояниях r от трансформатора.

6.4. Снимите зависимость эффективности экранирования S_H от частоты f (для четырех значений фиксированных частот, устанавливаемых с помощью переключателя на передней панели ИВЭП) для сплошных экранов, выполненных из различных материалов (экраны №2, №6, №9), имеющих одинаковую толщину.

6.5. Для экранов, выполненных из стального листа (№2, №3), оцените зависимость эффективности экранирования S от толщины листа t . Число измерений по каждому экрану 5÷8.

6.6. Сравните эффективность экранирования сплошного и перфорированных экранов (№4 и №6).

6.7. Исследуйте зависимость S_H от расположения щели экрана и оцените влияние расположения щели (экраны №7÷№9). Измерения провести на одной частоте.

6.8. В отчете необходимо представить:

- 1) Рассчитанные для исследованных экранов значения $Z_m, \delta, \alpha, S_E, S_H$.
- 2) Данные измерений значений H/H_{\max} от r , и S_H от f и t для ряда экранов.
- 3) Краткие выводы: интерпретация результатов измерений, сравнение с расчетом, рекомендации по конструированию экранов и др.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Дайте определение эффективности экранирования.

7.2. В чем заключается физическая сущность экранирования, и по каким признакам можно классифицировать экраны?

7.3. Какими являются основные структуры помехонесущего электромагнитного поля в зависимости от расстояния от источника до рецептора помех?

7.4. Как меняется характеристическое (волновое) сопротивление среды в зависимости от расстояния от источника помех и его вида?

7.5. Что такое эквивалентный радиус экрана и для чего вводится это понятие?

7.6. Какими свойствами должны обладать материалы для экранов?

7.7. Как связана глубина скин-слоя с частотой поля, и к каким физическим эффектам приводит уменьшение частоты источника помех?

7.8. От каких полей сложнее осуществить защиту радиоэлектронной аппаратуры при конструировании?

7.9. Почему рассчитанные значения эффективности экранирования могут сильно отличаться от экспериментально измеренных значений?

7.10. Каким образом должны располагаться щели в электромагнитных экранах относительно силовых линий магнитного поля, чтобы излучение было минимальным?

7.11. Что является источником помех в ИВЭП?

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем: Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2004. 298 с.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. В.С. Кармышев, Л.Н. Кечиев. М.: Издательский Дом "Технологии", 2003. 540 с.
3. Конструирование экранов и СВЧ устройств: Учебник для вузов / Под ред. А.М.Чернушенко. М.: Радиосвязь, 1990. 352 с.
4. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника. 1990. 165 с.
5. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом ЭМС. М.: Радио и связь. 1989. 224 с.
6. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. М.: Сов. радио. 1979. 216 с.
- 7.