

Министерство образования Российской Федерации

Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана

В.П. Усачев, В.П. Григорьев, В.Г. Костиков

Исследование электромагнитных экранов

Лабораторная работа № 3

Учебное пособие по курсу “Конструирование РЭС”

Под редакцией Е.М. Парфенова

Москва 2008 г.

Данное учебное пособие издается в соответствии с учебным планом.
Учебное пособие рассмотрено и одобрено кафедрой ИУ-4 от 18.12.97 и методической комиссией факультета ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана 11 марта 1998 г.

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.А. Овчинников.

Оглавление

1. Введение	2
2. Цель работы	3
3. Порядок выполнения работы	3
4. Теоретическая часть	3
4.1. Основные положения и зависимости теории экранирования электрических, магнитных и электромагнитных полей	3
4.2. Расчетная часть	6
5. Экспериментальная часть	11
6. Контрольные вопросы	12
7 Литература	12

Введение

Электромагнитные экраны применяются в РЭА для защиты чувствительных элементов и узлов от внешних и внутренних электромагнитных помех. При этом различают следующие виды экранирования:

- Экранирование электрического поля (поле в ближней зоне излучения от источника, эквивалентного электрическому диполю);
- Экранирование магнитостатического поля (поле в ближней зоне излучения от источника, эквивалентного магнитному диполю – рамке стоком);
- Экранирование электромагнитного поля (поле в ближней и дальней зонах излучения от любых других электромагнитных источников энергии).

При экранировании внутри блоков РЭА вследствие относительно небольших расстояний между источниками и приемниками помех речь идет, как правило, об экранировании электро- или магнитостатических полей. Известно, что эффективность магнитостатического экрана значительно ниже, чем электростатического. Поэтому наибольшую сложность представляет защита от магнитостатических полей.

Настоящая работа посвящена исследованию магнитостатических экранов.

2. Цель работы

Целью работы является исследование:

- эффективности экранирования экранами из различных материалов;
- эффективности экранов при различных частотах источника помехи (в диапазоне частот);
- эффективности экранирования в зависимости от наличия и расположения в экране каких-либо отверстий (технологических, для обеспечения ремонта и эксплуатации, перфорации для улучшения теплового режима и т.д.);
- влияния качества заземления экрана на его эффективность.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить указания и методические материалы к проведению работы.
2. Ознакомиться с лабораторным стендом и инструкциями по пользованию генератором ГЗ-36А и вольтметром В7-21А.
3. В теоретической части работы рассчитать и построить (на миллиметровой бумаге, желательно в логарифмическом масштабе) теоретические графики зависимости эффективности магнитостатического экранирования \mathcal{E}_n от частоты поля $f=2\dots 40$ кГц для шести экранов:
 - трех алюминиевых экранов: сплошного, с продольными щелями, с поперечными щелями;
 - трех экранов из пермаллоя: сплошного, с продольными щелями, с поперечными щелями.
4. В экспериментальной части работы собрать в соответствии со схемой лабораторный стенд и снять экспериментальные зависимости магнитостатического экранирования \mathcal{E}_n от частоты поля помехи $f=2\dots 40$ кГц для шести экранов, рассмотренных в теоретической части работы, и отобразить полученные экспериментальные зависимости на полученных ранее теоретических графиках $\mathcal{E}_n(f)$.
5. Сопоставить полученные теоретические и экспериментальные зависимости $\mathcal{E}_n(f)$ для шести различных экранов. Объяснить расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами, сопоставив их с возможными погрешностями вычислений и точностью используемой измерительной аппаратуры. Сделать выводы об эффективности экранирования исследованных в работе экранов.
6. Оформить отчет о лабораторной работе по следующей форме:
 - название работы
 - цель работы
 - схема стенда
 - чертежи экранов
 - теоретические расчеты и исследования
 - экспериментальные исследования
 - сопоставление полученных теоретических и экспериментальных результатов по графикам
 - выводы по работе

4. Теоретическая часть

4.1 Основные положения и зависимости теории экранирования электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Исходными данными для расчета электромагнитной помехоустойчивости являются:

- конструкционные параметры изделия и его узлов;
- спектр частот помехи $[f_i]$ и соответствующие им значения напряженности электрического поля $E(f_i)$ или магнитной индукции $B(f_i)$, допустимые значения напряженности $E_g(f_i)$, или магнитной индукции $B_g(f_i)$ или напряжения помехи U_n .

Наибольшее воздействие на работоспособность узлов РЭА указывает магнитная составляющая электромагнитного поля с индукцией B . Когда магнитное поле частотой f пересекает замкнутый контур площадью S , то в контуре возникает э.д.с. U

$$|U| = 2\pi f S |B| \quad (1)$$

Рассчитанное по формуле (1) напряжение U является напряжением помехи для чувствительных элементов устройства. При анализе помехоустойчивости печатных узлов чувствительными элементами обычно являются микросхемы, тогда S - наибольшая площадь замкнутого контура, образованного заземляющим и сигнальным проводниками.

Если $|U| \geq U_n$ и нет возможности уменьшить площадь контура S , то необходим электромагнитный экран, эффективность которого

$$\mathcal{E}_H = 20 \lg \left(\frac{|U|}{U_n} \right)$$

Главное назначение экрана - ослабление напряженности электрического (E) или магнитного (H) полей. В зависимости от назначения различают экраны с внутренними источниками помех и экраны внешнего электрического поля, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к помехам узлы.

На рис. 1 приведена классификация электромагнитных экранов по трем признакам: типу поля помехи, конструктивной форме, материалу и конструкции стенок экрана.

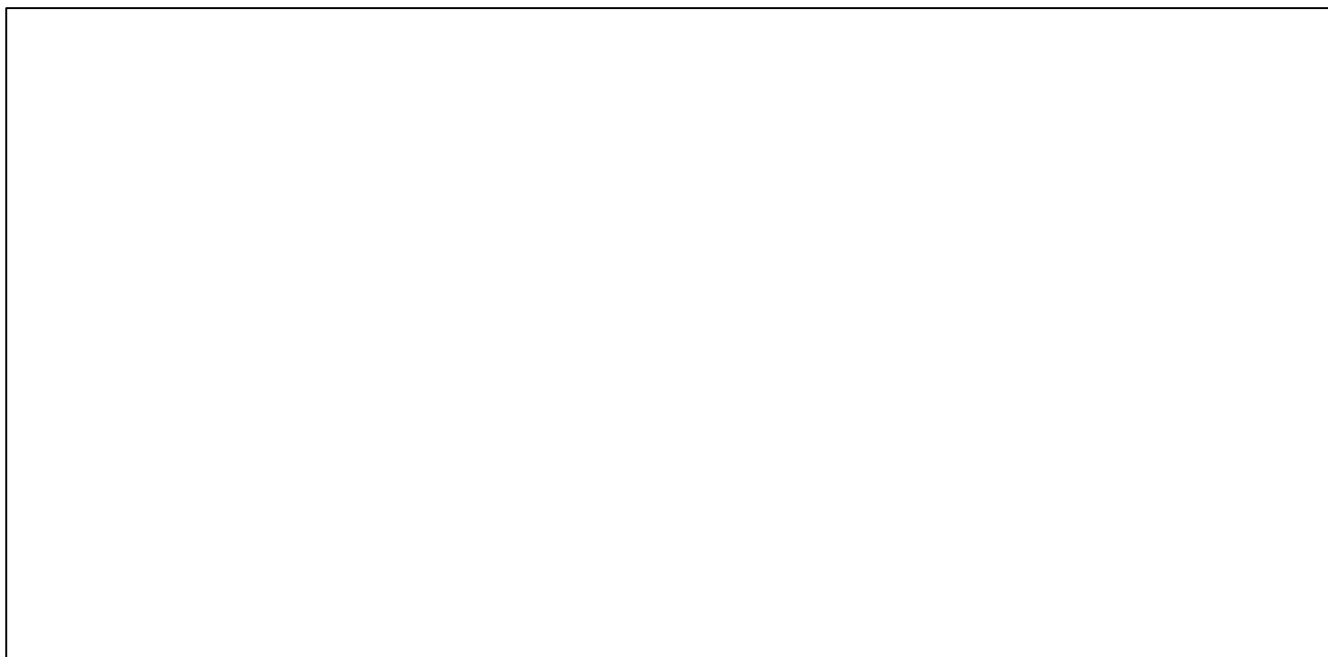


Рисунок 1. Классификация электромагнитных экранов

4.1.1 Тип поля помехи.

Область пространства вокруг условного излучателя электромагнитной помехи делится на ближнюю ($r \leq \lambda/2\pi$) и дальнюю ($r > \lambda/2\pi$) зоны, где r - расстояние от излучателя до экрана; λ - длина волны помехи.

Если излучатель может быть представлен в виде электрического диполя, то в ближней зоне существенно преобладает электрическое поле, в случае представления излучателя рамкой с током - в ближней зоне преобладает магнитное поле. В первом случае можно говорить об электростатическом, а во втором - о магнитостатическом полях. Например, высоковольтные элементы и приборы могут быть представлены электрическим диполем, а катушки индуктивности, трансформаторы, печатные проводники - рамкой с током. В дальней зоне излучения электрического и магнитного полей равны. В электронной аппаратуре экранируют как источники помехи так, и приемники помехи. При этом вследствие принципа взаимности эффективность экранирования в том и другом случае одинакова.

4.1.2 Форма экрана.

Конструктивная форма экрана в зависимости от экранируемого изделия может быть в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы (см. рис. 2).



а) прямоугольной формы б) цилиндрической формы в) сферической формы

Форма экрана влияет в первую очередь на величину характеристического сопротивления среды вблизи него и, как следствие, на эффективность экранирования. Кроме того, форма экрана влияет на его резонансные свойства, а именно на значение частоты, на которой происходит резкое увеличение магнитного или электрического поля внутри экрана.

Чтобы сравнить экраны различных форм, вводится обобщенный параметр - эквивалентный радиус $R_э$.

Для экрана прямоугольной формы

$$R_э = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3}$$

Для цилиндрического экрана

$$R_э = \sqrt[3]{\frac{3}{16} D^2 h}$$

Для сферического экрана

$$R_э = r$$

Низшая резонансная частота экрана может быть определена по приближенной формуле

$$f_{рез} = \frac{13.8}{R_э} 10^6$$

Значение $f_{рез}$ не должно входить в спектр помехи.

4.1.3 Материал и конструкция экрана.

Материал стенки экрана оказывает наибольшее влияние на эффективность экранирования. Величиной, характеризующей экранирующее действие материала экрана, является глубина проникновения δ (на такой глубине напряженность электрического поля уменьшается в e раз):

$$\delta = 0.52(\pi f \mu_r \sigma)^{0.5} .$$

где f - частота поля помехи

μ_r - относительная магнитная проницаемость

σ - удельная проводимость материала экрана

Для немагнитных материалов $\mu_r = 1$, а для ферромагнитных μ_r зависит от частоты f . Для стали эта зависимость может быть учтена следующим образом:

$$\mu_r = 150-30f \text{ при } f < 4\text{МГц}, \text{ где } f\text{--частота МГц.}$$

Если экран работает в магнитном поле ближней зоны, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных, так как $\mu_r \gg 1$. В электромагнитном поле дальней зоны немагнитные материалы, обладающие большей проводимостью по сравнению с магнитными, обеспечивают большую эффективность.

В табл. 1 приведены электрические параметры наиболее часто применяемых для экранирования материалов.

Таблица 1

Материал	Удельная проводимость , сим/см 10^{-7}	Относительная магнитная проницаемость μ_r
Алюминий	3.54	1
Латунь	1.25	1
Медь	5.8	1
Серебро	6.2	1
Железо	1.0	1100-2200
Никель	1.38	12-80
Сталь	0.66	150
Пермаллой	0.47	800-8000

Для электромагнитного экранирования могут быть успешно применены тонколистовые и фольгированные материалы толщиной 0.01-0.05 мм. Также широко применяются сеточные материалы. Это объясняется тем, что металлические сетки легки, а сеточные экраны проще в изготовлении, удобны в сборке и эксплуатации, не препятствуют свободным конвективным потокам воздуха, светопроницаемы и позволяют получить высокую эффективность экранирования во всем диапазоне радиочастот. Недостатком сеточных экранов является их низкая механическая прочность. Экранирующие свойства металлических сеток проявляются главным образом в результате отражения электромагнитной волны от их поверхности. Параметрами сетки, определяющими ее экранирующие свойства, являются шаг сетки S_c , радиус проволоки r_n и удельная проводимость материала сетки.

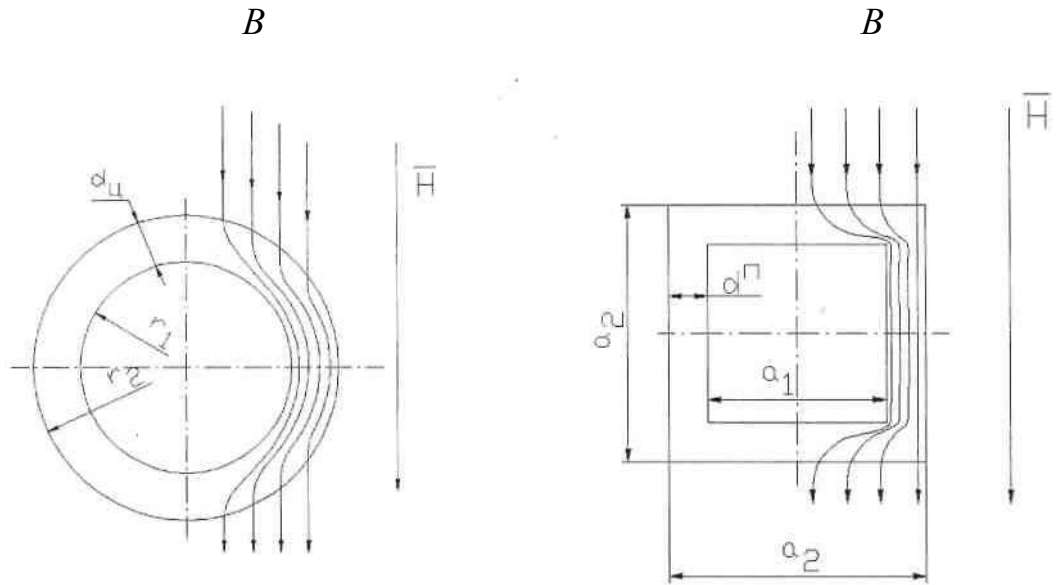
Ниже приводятся расчетные формулы для эффективности экранирования экранов разной формы и из различных материалов.

4.2 Расчетная часть.

4.2.1 Расчет магнитоэстатического экрана.

На рис.3 представлена условная схема магнитоэстатического экранирования за счет шунтирования магнитного поля на частотах от 0 до 1000 Гц.

. Схема магнитоэкранирования за счет шунтирования магнитного поля



а) цилиндрический экран

б) прямоугольный экран

Для цилиндрического экрана эффективность экранирования в случае $\mu_r > 1$ определяется формулой

$$\mathcal{E}_H^u = 20 \lg \left[1 + 0.25 \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right] \quad (2)$$

Следовательно, для заданных \mathcal{E}_H^u , μ_r и r_2 определим толщину экрана

$$a^u = r_2^2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \left(10^{\mathcal{E}_H^u/20} - 1 \right)}{\left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right)}} \right]$$

Для прямоугольного экрана

$$\mathcal{E}_H^n = 20 \lg \left[1 + \left(1 - \frac{a_1^2}{a_2^2} \right) \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right]$$

$$d^n = 0.5 a_2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\left(10^{\mathcal{E}_H^n/20} - 1 \right)}{\left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right)}} \right]$$

тогда

Для сферического экрана

$$\mathcal{E}_H^c = 20 \lg \left[1 + 0.22 \left(1 - \frac{(r_3 - d^c)^3}{r_3^3} \right) \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right]$$

тогда

$$d^c = r_3 \left[1 - \sqrt[3]{1 - \frac{4.5 \left(10^{\mathcal{E}_H^c/20} - 1 \right)}{\left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right)}} \right]$$

В целом эффективность магнитоэкранных экранов шунтированием магнитного поля невелика. Так, например, экран, изготовленный из специального сплава

"Армко", у которого $\mu_r = 3000$, при радиусе 40 см и толщине 1 см обеспечивает эффективность 31.5 дБ.

4.2.2 Расчет электростатического экрана

Ориентировочно эффективность электростатического экранирования плоского листового электростатического экрана можно оценить по формуле:

$$\mathcal{E}_E = 20 \lg \left[5r^3 / (a^2 a_1 - aa_1^2) \right]$$

где r_s - радиус эквивалентного сферического экрана.

$$r_s \cong \sqrt{S_s / \pi}$$

S_s - площадь поверхности экрана;

a - расстояние источником и приемником помехи;

a_1 - расстояние от экрана до приемника помехи.

Для электростатических экранов замкнутой формы эффективность экранирования определяется выражением

$$\mathcal{E}_E = 20 \lg(60 \pi d \sigma)$$

Таким образом, минимальная толщина экрана $d_{min E}$ определяется по формуле

$$d_{min E} = 10 \left(\mathcal{E}_E^* / 20 \right) / (60 \pi \sigma)$$

где \mathcal{E}_E^* - необходимая эффективность экранирования.

4.2.3 Расчет электромагнитных экранов в дальней зоне излучения.

Электромагнитный режим экранирования охватывает частотный диапазон от 10 до 10 Гц при условии, что расстояние от экрана до источника помех $(5-6)\lambda$, а поперечные размеры экрана меньше длины волны помехи.

Эффективность экранирования сплошного электромагнитного экрана в дальней зоне излучения определяется по формуле

$$\mathcal{E}_3 = 20 \lg \left| ch \left(\dot{K} d \right) \right| + 20 \lg \left| 1 + 0.5 \left(z_B / z_3 + z_3 / z_B \right) ch \left(\dot{K} d \right) \right|, \quad (3)$$

где d - толщина экрана;

z_B - характеристическое сопротивление окружающего пространства, для плоской волны $z_B = 100 \pi \text{ Ом}$;

z_3 - характеристическое сопротивление металла, из которого сделан экран, рассчитываемое по формуле:

$$z_3 = \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 / \sigma} e^{j \frac{\pi}{4}}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

\dot{K} - коэффициент вихревых токов, рассчитываемый по формуле:

$$\dot{K} = \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma} e^{j \frac{\pi}{4}}$$

После выбора материала экрана можно построить график зависимости $\mathcal{E}_3(d)$ для нижних частот помехи.

Значение d , при котором обеспечивается необходимое экранное затухание, является минимальной толщиной стенок экрана.

4.2.4 Расчет электромагнитных экранов в ближней зоне излучения.

Эффективность экранирования цилиндрического электромагнитного экрана в ближней зоне излучения рассчитывается по формуле (3), причем для экранирования электрической составляющей поля

$$z_B = z_{BE}^H = -j(2\pi f \varepsilon_r \varepsilon_0 r_3^H)^{-1},$$

а для экранирования магнитной составляющей

$$z_B = z_{BH}^H = j2\pi f \mu_r \mu_0 r_3^H,$$

здесь r_3^H - радиус цилиндрического экрана

Для сферического экрана

$$z_H^c = j18 \cdot 10^9 / (fr_3^c \sqrt{2}) \quad z_{BH}^c = j79 \cdot 10^{-7} fr_3^c / \sqrt{2}$$

где r_3^c - радиус сферы.

Для прямоугольного экрана-коробочки.

$$z_{BE}^H = -j36 \cdot 10^9 / (fr_3^H) \quad | \quad z_{BH}^H = j \cdot 158 \cdot 10^{-7} fr_3^H$$

где r_3^H - половина расстояния между стенками экрана, обращенными к источнику поля помехи.

Остальные величины, входящие в формулу (3), рассчитываются так же, как для экранирования в дальней зоне.

Если области низких частот до 10^4 Гц для случая экранирования электромагнитного поля в ближней зоне выполняется условие

$$|Z_{BE} / Z_3| \gg |Z_3 / Z_{BE}|$$

тогда

$$\mathcal{E}_{\text{ЭЭ}} = 20 \lg |1 + 0,5 Z_{BE} \sigma d|$$

При экранировании магнитного поля в ближней зоне в низкочастотном диапазоне экран из магнитных металлов и сплавов имеет эффективность экранирования:

а из немагнитных материалов:

$$\mathcal{E}_{\text{Эн}} = 20 \lg |1 + \mu_r / (2r)|$$

а из немагнитных материалов:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭН}} = 20 \lg |1 + K^2 r_3 d / 2|.$$

4.2.5 Расчет перфорированных и сеточных экранов.

Для перфорированных экранов эффективность экранирования определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ЭБ(Н)}} = 20 \lg \left[\sqrt{\sigma d Z_{\text{ББ(Н)}}} \sqrt{\frac{\lambda}{r_3} \left(\frac{a-D}{a} \right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda} \right)^6 \exp\left(\frac{2\pi d}{m} \right)} \right] \quad (4)$$

где a - расстояние между центрами отверстий;

D - диаметр отверстий;

m - наибольший размер отверстия в экране.

Эта формула применима для диапазона длин волн, пока $\lambda > m\pi$. При $\lambda \cong m\pi$ эффективность экранирования становится незначительной.

Для экранов, изготовленных из сеточных материалов, за толщину экранов принимают эквивалентную толщину сетки $d_c = \pi r_n^2 / S_c$ (где r_n и S_c радиус провода и шаг сетки, мм).

Формула для расчета эффективности таких экранов принимает вид:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭБ(Н)}} = 20 \lg \left[\sqrt{d_c \sigma Z_{\text{ББ(Н)}}} \sqrt{\frac{\lambda}{r_3} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda} \right)^6 \exp\left(\frac{2\pi r_n}{S_c 2r_n} \right)} \right]$$

Эффективность экранов, изготовленных из электрически тонких материалов, в том числе с металлизированными поверхностями, определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{ЭЕ(H)} = 20 \lg \left[1.25 \pi \sqrt{d \sigma_{ЭЕ(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r_Э} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda} \right)^6} \right],$$

где d - толщина слоя металла.

4.2.6 Выбор расчетных формул.

Исследуется экранирование поля помехи в диапазоне частот $f = 2 \dots 40$ кГц.

Из вышеизложенного следует, что экранирование в этом диапазоне частот как экранами из магнитных материалов, так и экранами из немагнитных электропроводных материалов.

В первом случае эффективность экранирования сплошным цилиндрическим экраном из магнитного материала определяется по формуле (2), а в случае сплошного цилиндрического экрана из немагнитного материала - по формуле (3) гиперболические косинус и тангенс в формуле (3) могут быть вычислены через соответствующие показательные функции:

$$ch(z) = \frac{1}{2} (e^z + e^{-z}), \quad th(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}.$$

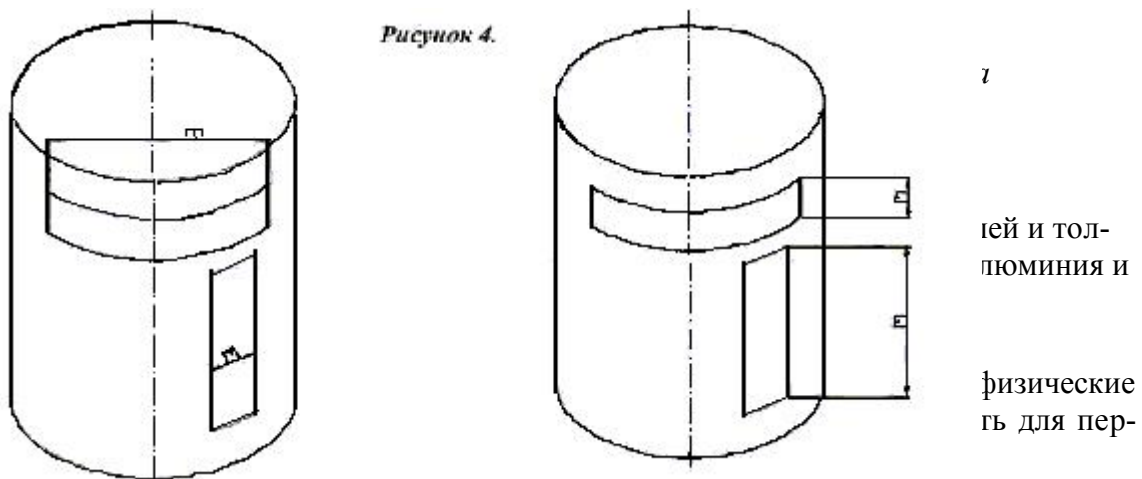
Как следует из формулы (4), наличие щелей и отверстий в экране уменьшает эффективность экранирования приблизительно на величину $\mathcal{E}_{щ}$ (в децибелах):

$$\mathcal{E}_{щ} = 120 \lg \left(1 - \frac{m\pi}{\lambda} \right),$$

Где m - определяющий размер отверстия (щели) в экране.

Выбор размера щели в экране зависит от материала экрана, поскольку от этого зависит принцип экранирования: в экране из магнитного материала экранирование осуществляется за счет шунтирования магнитного поля в экране, а в экране из немагнитного электропроводного материала - за счет вытеснения магнитного поля наведенными в экране вихревыми токами.

На рис.4 показаны определяющие размеры m в цилиндрических экранах из магнитного и немагнитного материалов.



4.2.8 Теоретический расчет эффективности экранирования.

Воспользовавшись программой расчета на ЭВМ эффективности экранирования /3,4/ или же непосредственным расчетом по выбранным ранее расчетным формулам (2, 3, 4) рассчитать эффективность экранирования исследуемых экранов в диапазоне частот $f = 2 \dots 40$ (с интервалом 5 кГц) и отобразить полученные частотные характеристики $\mathcal{E}_н(f)$ на миллиметровой бумаге.

5. Экспериментальная часть

В соответствии со схемой, представленной на рис.5, собрать лабораторный стенд. Основной частью стенда является лабораторный макет, состоящий из двух индуктивных катушек L_1 и L_2 , разделенных экраном (рис.6).

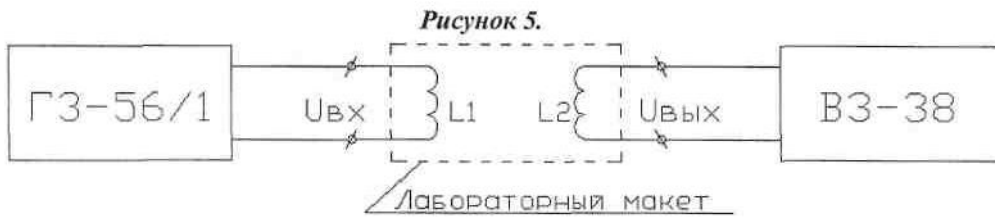
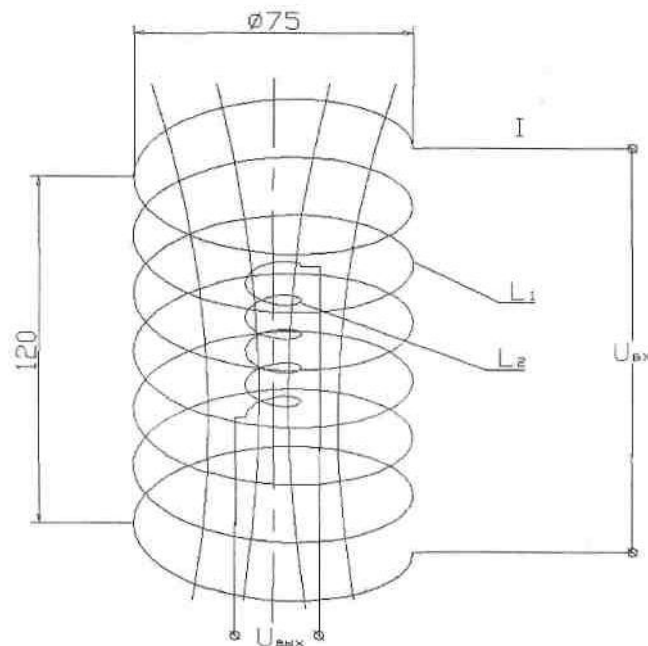


Рисунок 6.



Внутри катушки L_1 создается переменное однородное магнитное поле H , направленное вдоль оси катушки. Значение напряженности H магнитного поля прямо пропорционально значению напряжения $U_{вх}$, создаваемого генератором ГЗ-36А. Это поле является полем помехи для катушки L_2 и наводит в ней э.д.с. $U_{вых}$, измеренное вольтметром В7-21А. Таким образом, наведенная э.д.с. оказывается прямо пропорциональной H

$$U_{вых} = AH$$

Следовательно, эффективность помещаемого между катушками L_1 и L_2 экрана может быть оценена по изменению наведенной в катушке L_2 э.д.с, а именно

$$\mathcal{E}_H = 20 \lg \left(\frac{H_0}{H_3} \right) = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{ВЫХО}}}{U_{\text{ВЫХЭ}}} \right)$$

Где $U_{\text{вых0}}$ и $U_{\text{выхэ}}$ - наведенные в катушке L_2 э.д.с. без экрана и с экраном, соответственно.

Следует заметить, что введение экрана создает реакцию и, тем самым, изменяет индуктивность катушки L_1 , что приводит к падению напряжения U_{ex} . В этом случае следует поддерживать U_{ex} на заданном уровне.

5.1.1 Порядок проведения эксперимента.

1. Выставить на генераторе напряжение $U_{\text{ex}} = 2.5 \text{ В}$ и снять зависимость $U_{\text{ВЫХО}}(f)$ в диапазоне частот от 2 до 40 кГц. Экран отсутствует.

2. Установить в макет алюминиевый сплошной экран и снять зависимость $U_{\text{ВЫХО}}(f)$, изменяя частоту генератора напряжения.

3. По формуле (5) определить эффективность экранирования алюминиевого сплошного экрана в диапазоне частот 2...40 кГц и построить график $\mathcal{E}_1(f)$ на приведенных ранее теоретических графиках эффективности экранирования.

4. Повторить пп. 2 и 3 для остальных экранов (алюминиевого с продольными щелями, алюминиевого с поперечными щелями, экрана из пермаллоя сплошного, с продольными щелями, с поперечными щелями).

5. Выставить на генераторе частоту 100 кГц и снять без экрана зависимость $U_{\text{ВЫХО}}(U_{\text{ex}})$

6. Снять зависимость $U_{\text{ВЫХО}}(U_{\text{ex}})$ для сплошного алюминиевого экрана. Построить график $\mathcal{E}_1(U_{\text{ex}})$.

7. Повторить пп. 2 и 3 для сплошного алюминиевого экрана с заземлением. Построить график $\mathcal{E}_{13}(f)$

6. Контрольные вопросы.

1. Объяснить частотную зависимость эффективности экранирования различных экранов.

2. Объяснить влияние расположения щелей на эффективность экранирования различными экранами.

3. Какие физические принципы используются при экранировании экранами из магнитных и немагнитных материалов? Объясните на примере.

4. Как влияет заземление на качество экранирования.

7. Литература.

1. Парфенов Е. М., Усачев В. П., Шерстнев В.В. Экранирование в ЭВА и РЭА. -М.:РИО МВТУ. 1986.

2. Камышная Э. Н., Парфенов Е. М., Шерстнев В.В. Программное обеспечение конструкторских расчетов ЭВА и РЭА. 41,- М.: РИО МВТУ. 1988.

3. Парфенов Е. М., Камышная Э. Н., Усачев В. П. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. Учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. -М.: Радио и связь, 1989, 272 с. ил.