

Отчет по лабораторной работе №2
Электромагнитное экранирование

Выполнили студенты 440 группы
Карусевич А.А., Шиков А.П.

Нижний Новгород, 2019

Цель работы: Экспериментальное наблюдение явления экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснение роли основных физических факторов (свойств материала экрана, а именно - проводимости и магнитной проницаемости; толщины его стенок; частоты поля), определяющих степень проникновения поля через экран, а также теоретический расчет экранирующих свойств металлических оболочек на простой модели и сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

1. Теоретическая часть

1.1. Введение

Под электромагнитным экранированием понимается изоляция некоторой области пространства от проникновения электромагнитных полей, существующих в соседних областях. В статических или переменных квазистационарных полях (которым соответствуют длины волн, много большие характерных размеров используемых приборов и устройств) такая изоляция осуществляется обычно с помощью замкнутых металлических оболочек - экранов.

Общей физической причиной ослабления поля внутри экрана является то обстоятельство, что наведенные в нем внешним полем токи (или заряды) создают во внутренней области поле, противоположное внешнему. В результате суммарное поле в этой области, складывающееся из полей внешних и наведенных источников, уменьшается.

1.2. Расчет экранирующего действия металлических оболочек

В работе используются оболочки цилиндрической формы. Для получения качественных оценок ослабления поля в экранированной области и установления характера его зависимости от параметров можно ограничиться изучением более простых моделей, допускающих точное решение задачи в из-

вестных аналитических функциях. Поскольку высота и диаметр внутренней полости используемых в работе экранирующих цилиндров одинаковы и весьма малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве λ_0 , наиболее подходящей моделью следует считать сферический слой, который имеет тот же объем внутренней полости и внешний радиус $a \ll \lambda_0$. Последнее условие означает, что вне металла (как во внешней, так и в экранируемой областях) поле можно рассматривать как квазистатическое. Приведем основные результаты решения задачи об экранирующих свойствах сферического слоя по отношению к переменному магнитному полю.

Если замкнутая однородная сферическая оболочка помещена в квазистатическое внешнее поле с комплексным вектором напряженности $\vec{H}_0 e^{i\omega t}$, которое в ее отсутствие является однородным, то поле в ограничиваемой ею области $\vec{H}_1 e^{i\omega t}$ также однородно. Эффективность экранирования удобно характеризовать величиной отношения комплексных амплитуд этих полей:

$$\eta_m = \frac{H_0}{H_1} \quad (1)$$

Безразмерная величина $|\eta_m|$ показывает, в какое число раз ослабляется поле в экранированной области, и может быть названа **коэффициентом ослабления**. Она сильно зависит от соотношения между толщиной экрана d и толщиной скин-слоя $\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}}$ (c - скорость света в вакууме, σ - проводимость, μ - магнитная проницаемость экрана). Рассмотрим два предельных случая:

В пределе $\delta \ll d$ (сильный скин-эффект)

$$\eta_m = \frac{1}{6} \left[(1-i) \frac{\mu\delta}{a} + 3 + (1+i) \frac{a}{\mu\delta} \right] \exp \left[(1+i) \frac{d}{\delta} \right] \quad (2)$$

При $\mu = 1$

$$\eta_m = \frac{1}{6} (1+i) \frac{a}{\delta} \exp \left[(1+i) \frac{d}{\delta} \right] \quad (3)$$

Область отсутствия скин-эффекта (в пределе $\delta \gg d$):

$$\eta_m = 1 + \frac{2d(\mu-1)^2}{3a\mu} + i \frac{2ad}{3\mu\delta^2} \quad (4)$$

При $\mu = 1$

$$\eta_m = 1 + i \frac{2ad}{3\delta^2} \quad (5)$$

Для приближенных оценок величины η_m (с точностью $\sim 10\%$) выражения (2)—(5) можно использовать и в промежуточном случае ($\delta \simeq d$), разграничивая области применимости формул (2), (3), с одной стороны, и (4), (5), с другой стороны, точкой $\delta = d$.

2. Экспериментальная часть

Лабораторная установка предусматривает проведение измерений коэффициентов ослабления для трех латунных и трех стальных экранов цилиндрической формы.

Схема измерения $|\eta_m|$ заключалась в следующем: переменное магнитное поле создается внутри соленоида, подключенного к выходу генератора. Внутренние размеры всех экранов одинаковы (высота и радиус основания $h = R = 5$ см), а толщина стенок различна ($d = 0.2$ см, 0.5 см, 1 см).

Сталь: $\sigma \simeq 0.7 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, $\mu \sim 10^2 \div 10^3$ при $H \sim 10$ эрстед.

Латунь: $\sigma \simeq 1.5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, $\mu \cong 1$ при $H \sim 10$ эрстед.

Схема установки:

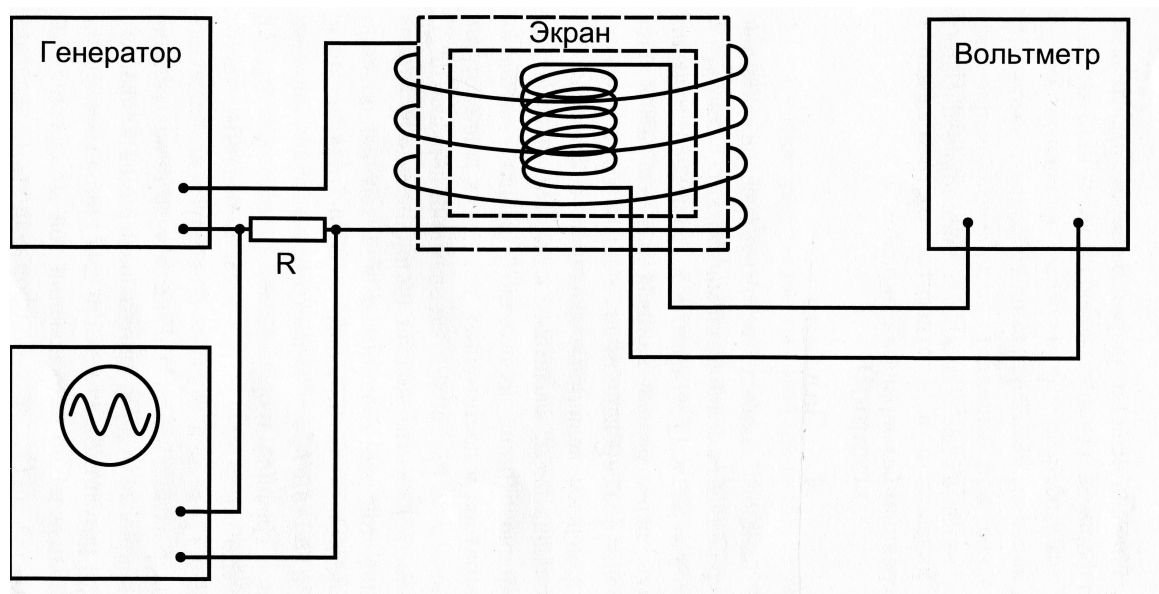


Рис. 1: Схема установки

Переменное магнитное поле создается внутри соленоида, подключенного к выходу звукового генератора. В качестве индикатора поля используется второй соленоид, с выхода которого переменное напряжение может подаваться на усилитель вольтметра. Надевая больший (генераторный) соленоид сначала на открытый (неэкранированный) индикатор, а затем на индикатор, закрываемый экраном, и измеряя, как изменяются при этом показания

вольтметра, можно (при неизменности амплитуды тока в цепи внешнего соленоида) определить коэффициент ослабления. Поскольку внесение металлического экрана внутрь внешнего соленоида изменяет его коэффициент самоиндукции, а следовательно, и его импеданс, сила тока в цепи внешнего соленоида и создаваемое этим током магнитное поле \mathbf{H}_0 при наличии экрана и в его отсутствие могут быть различными. Это нужно учитывать. В используемой схеме предусмотрено измерение относительных изменений токов как во внутреннем, так и во внешнем соленоидах. С этой целью в цепь внешнего соленоида введено сопротивление R , напряжение с которого подается на вертикальный усилитель осциллографа. Тогда:

$$|\eta_m| = \frac{V_0 U_e}{V_e U_0}, \quad (6)$$

где V и U - соответственно показания вольтметра и осциллографа, индексы o и e относятся соответственно к величинам, измеренным без экрана и с экраном.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Измерение $|\eta_m|$ латунных и стальных экранов

При использовании каждого экрана производилась подстройка напряжения на генераторном соленоиде, чтобы при отсутствии экрана значение напряжения на вольтметре было равно $V_0 = 1000$ мВ для всех экспериментов.

По результатам измерений (см. таблицы 1 и 2) для всех частот и экранов рассчитан $|\eta_m|$ и построены графики в логарифмическом масштабе.

3.2. Латунные экраны

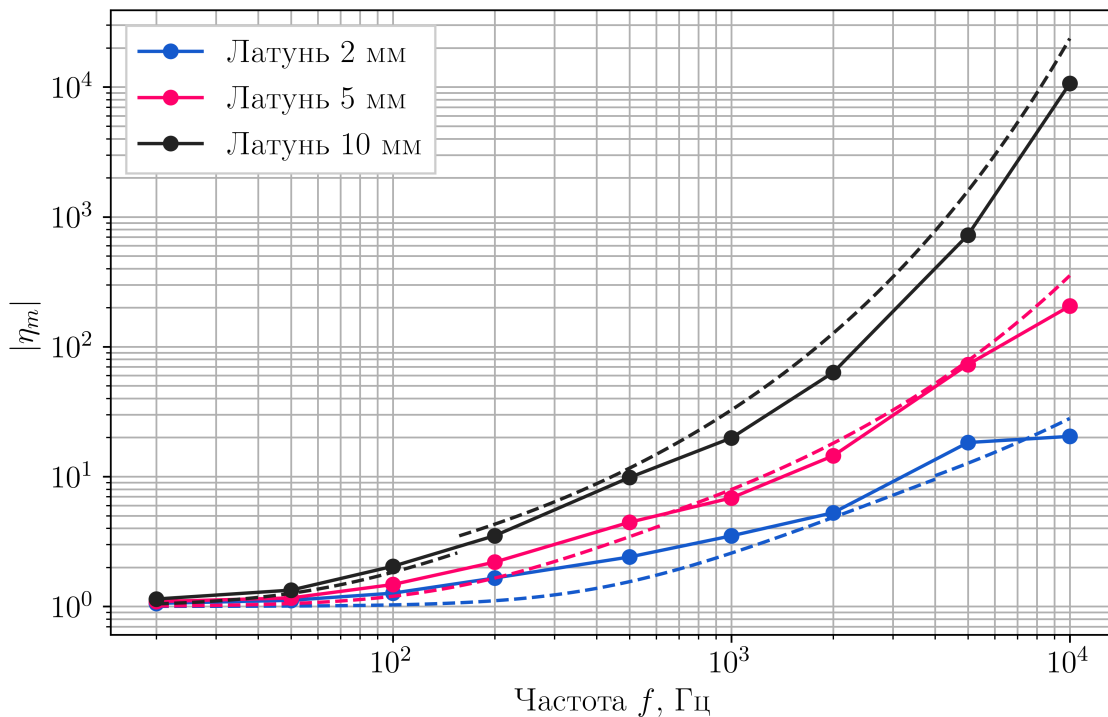


Рис. 2: Экспериментальные и теоретические (пунктир) графики для экранов из латуни. Значения для теоретических графиков: $\sigma \simeq 1.5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$, $\mu \simeq 1$.

Для построения теоретических графиков, необходимо определить границы применимости формул (2) и (4). Решая уравнение вида $\delta(f^*) = d$, можно

найти такую частоту f^* , что при частотах $f > f^*$, можно считать справедливой формулу (2), а при $f < f^*$ - формулу (4).

Значения f^* для латуни при разных значениях d :

| | | | |
|------------|------|-----|-----|
| d , мм | 2 | 5 | 10 |
| f^* , Гц | 4000 | 628 | 156 |

Принимая в качестве модели цилиндрического экрана сферический слой той же толщины d и с тем же объемом внутренней полости $V = (4\pi/3)(a - d)^3 = \pi R^2 h$ (отсюда, ввиду $a \gg d$, имеем $a \cong (3R^2 h/4)^{1/3}$), построили для исследуемых экранов графики теоретической зависимости $|\eta_m(f)|$.

Как видно из 2, наблюдается достаточно хорошее совпадение теории и эксперимента, однако теоретические кривые нарастают быстрее экспериментальных с ростом частоты.

3.3. Оценка μ для стальных экранов по результатам измерений

Для стальных экранов почти всюду выполняется $\delta \ll d$, поэтому оценка производится из формулы

$$\eta_m = \frac{1}{6} \left[(1 - i) \frac{\mu \delta}{a} + 3 + (1 + i) \frac{a}{\mu \delta} \right] \exp \left[(1 + i) \frac{d}{\delta} \right] \quad (7)$$

Взяв модуль от этого выражения, получим:

$$|\eta_m| = \frac{\exp \left[\frac{d}{\delta} \right]}{6} \sqrt{\left(\frac{\mu \delta}{a} + 3 + \frac{a}{\mu \delta} \right)^2 + \left(\frac{a}{\mu \delta} - \frac{\mu \delta}{a} \right)^2} \quad (8)$$

Для определения μ по известным значениям $|\eta_m|$ использовался графический метод для уравнения (8). Для наглядности, строились правая и левая

части следующего вида:

$$\begin{aligned}
 LHS : y(\mu) &= |\eta_m(f)| \exp \left[-\frac{d}{\delta} \right] \\
 RHS : x(\mu) &= \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{\mu\delta}{a} + 3 + \frac{a}{\mu\delta} \right)^2 + \left(\frac{a}{\mu\delta} - \frac{\mu\delta}{a} \right)^2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

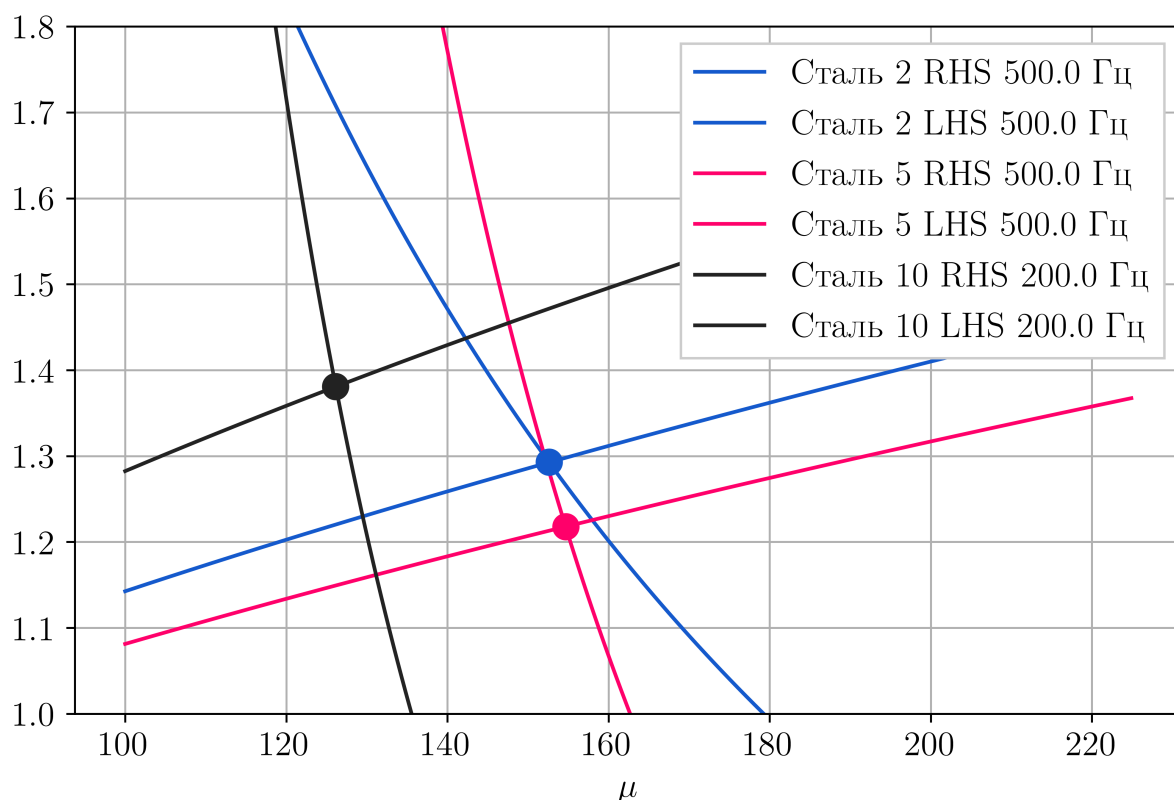


Рис. 3: Графическое решение для значения μ для стали

Для 2 мм полученное таким методом значение на частоте 500 Гц дает $\mu = 152$.

Для 5 мм (500 Гц) $\mu = 154$, для 10 мм (200 Гц) $\mu = 126$.

Расхождение теоретического графика (который уходит в значительно большие по сравнению с практическими $|\eta_m|$) и практического, можно объяснить частотным насыщением магнитной проницаемости стали: из-за инертной природы перестроения доменной структуры, она не успевает изменяться вслед за частотой поля, и μ начинает падать с ростом частоты.

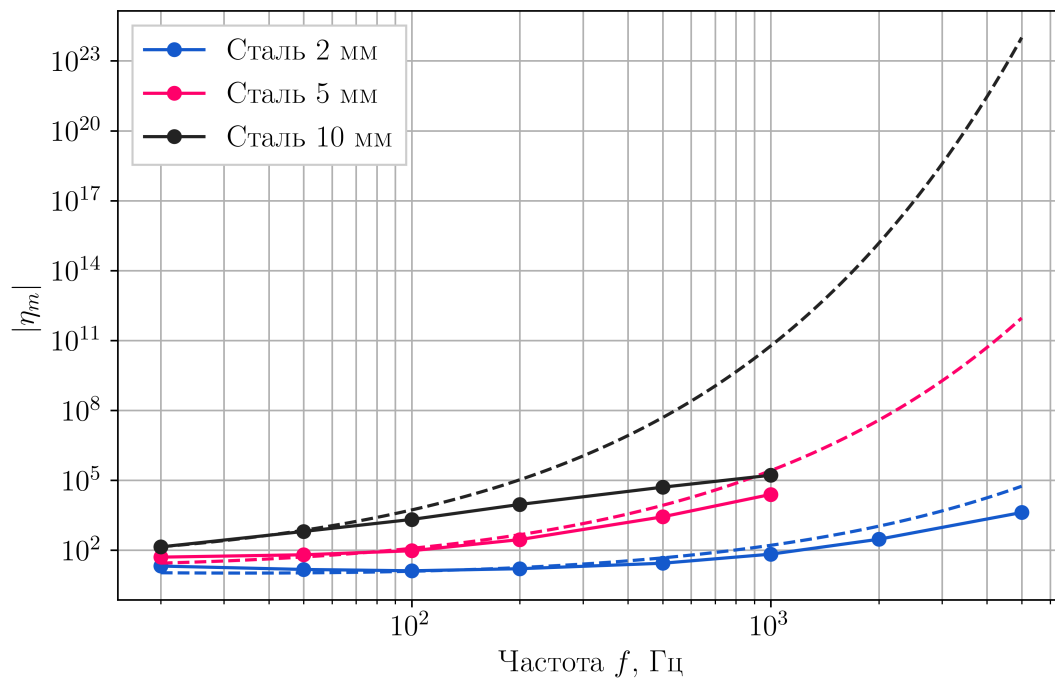


Рис. 4: Экспериментальные и теоретические (пунктир) графики для экранов из стали.

3.4. Таблицы измерений

| Характеристика экрана | | | Латунь 2 мм | | Латунь 5 мм | | Латунь 10 мм | |
|-----------------------|------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
| f , Гц | V_0 , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел |
| 20 | 1000 | 13.2 | 940 | 13.1 | 910 | 13.1 | 870 | 13.1 |
| 50 | 1000 | 5.67 | 870 | 5.5 | 810 | 5.34 | 700 | 5.3 |
| 100 | 1000 | 3.18 | 790 | 3.18 | 650 | 3.05 | 500 | 3.24 |
| 200 | 1000 | 1.67 | 640 | 1.77 | 510 | 1.87 | 350 | 2.05 |
| 500 | 1000 | 0.92 | 520 | 1.15 | 320 | 1.31 | 180 | 1.63 |
| 1000 | 1000 | 0.484 | 390 | 0.66 | 225 | 0.746 | 100 | 0.96 |
| 2000 | 1000 | 0.54 | 260 | 0.74 | 105 | 0.82 | 3 | 1.13 |
| 5000 | 1000 | 0.328 | 90 | 0.54 | 28 | 0.57 | 3.6 | 0.856 |
| 10000 | 800 | 0.112 | 42 | 0.12 | 5.9 | 0.17 | 0.22 | 0.328 |

Таблица 1

| Характеристика экрана | | | Сталь 2 мм | | Сталь 5 мм | | Сталь 10 мм | |
|-----------------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|-------------|--------|
| f , Гц | V_0 , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел | V_e , мВ | U, дел |
| 20 | 1000 | 9.68 | 45 | 9.11 | 18 | 8.8 | 6.3 | 8.47 |
| 50 | 1000 | 5.67 | 49 | 4.15 | 11 | 3.98 | 1 | 3.62 |
| 100 | 1000 | 3.18 | 47 | 1.96 | 5.8 | 1.75 | 0.24 | 1.6 |
| 200 | 1000 | 1.67 | 35 | 0.94 | 1.8 | 0.86 | 0.048 | 0.74 |
| 500 | 1000 | 0.92 | 22 | 0.56 | 0.2 | 0.5 | 0.009 | 0.42 |
| 1000 | 1000 | 0.484 | 10 | 0.328 | 0.24 | 0.288 | 0.003 | 0.24 |
| 2000 | 1000 | 0.54 | 2.6 | 0.416 | - | - | - | - |
| 5000 | 1000 | 0.328 | 0.22 | 0.3 | - | - | - | - |
| 10000 | 800 | 0.112 | - | - | - | - | - | - |

Таблица 2