

Кафедра электродинамики  
Отчет по лабораторной работе №1  
**Электромагнитное экранирование**

Выполнили студенты 440 группы  
Войтович Д.А., Понур К.А.

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  $\lambda_0$ , 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:

$$\eta_m = \frac{H_0}{H_1}$$

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,  $\sigma$  - проводимость,  $\mu$  - магнитная проницаемость экрана). Рассмотрим два предельных случая:

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

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

При  $\mu = 1$

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

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

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

При  $\mu = 1$

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

Для приближенных оценок величины  $\eta_m$  (с точностью  $\sim 10\%$ ) выражения (1)—(4) можно использовать и в промежуточном случае ( $\delta \simeq d$ ), разграничивая области применимости формул (1), (2), с одной стороны, и (3), (4), 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:

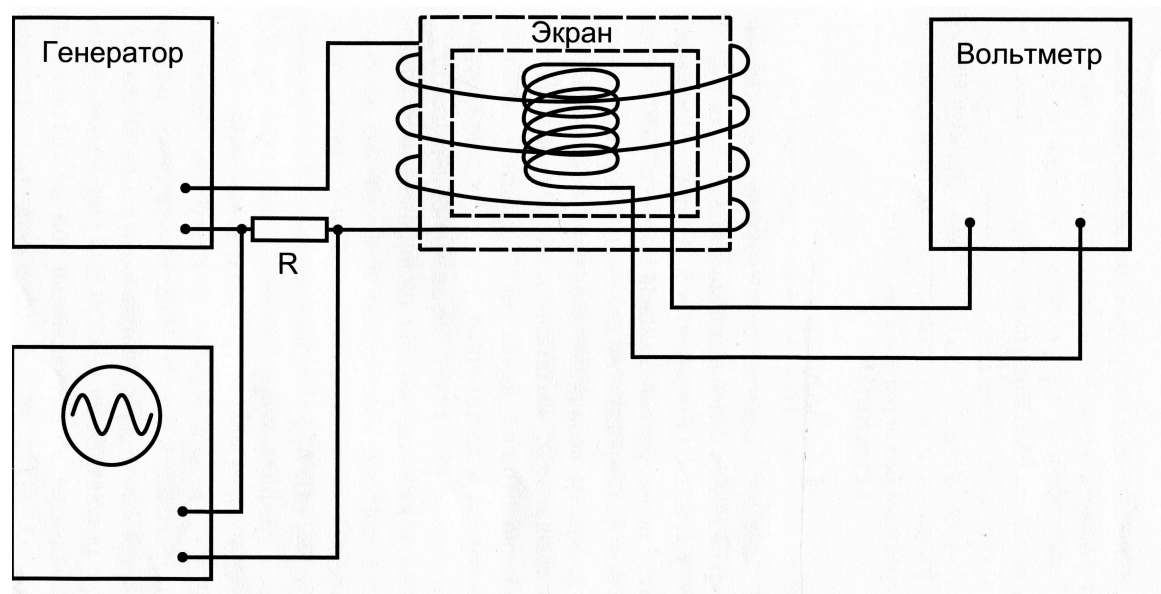


Рис. 1: Схема установки

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:

$$|\eta_m| = \frac{V_0 U_e}{V_e U_0},$$

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

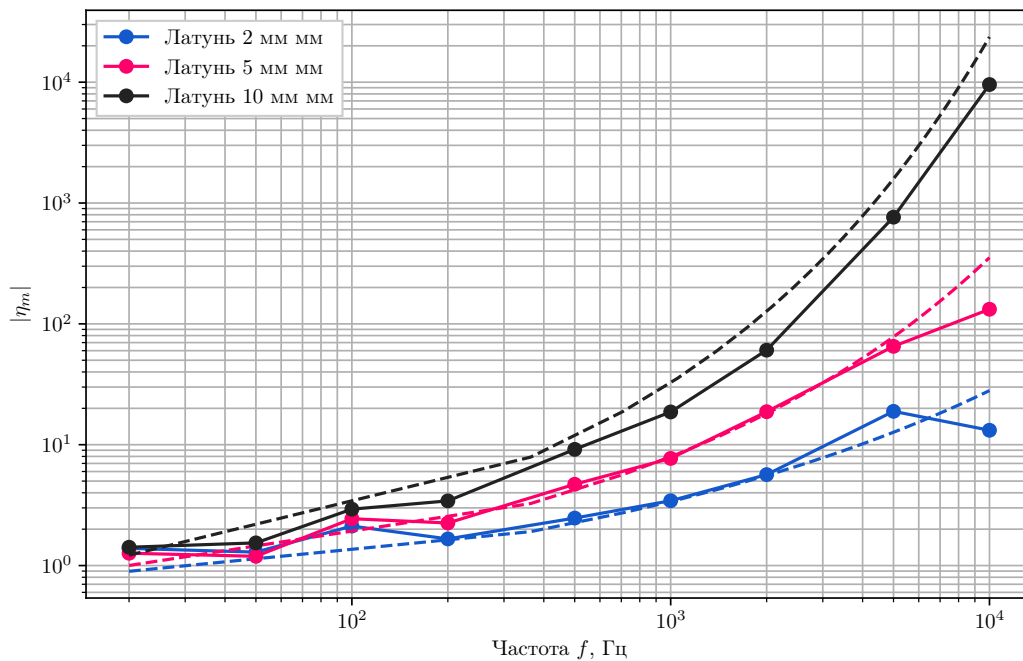


Рис. 2: Экспериментальные и теоретические (пунктир) графики для экранов из латуни. Значения для теоретических графиков:  $\sigma \simeq 1.5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu \simeq 1$ .

Для построения теоретических графиков, необходимо определить границы применимости формул (1) и (3). Решая уравнение вида  $\delta(f^*) = d$ , можно

найти такую частоту  $f^*$ , что при частотах  $f > f^*$ , можно считать справедливой формулу (1), а при  $f < f^*$  - формулу (3).

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

### 3.3. Оценка $\mu$ для стальных экранов по результатам измерений

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

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

Взяв модуль от этого выражения, получим:

$$|\eta_m| = \frac{\exp \left[ \frac{d}{\delta} \right]}{6} \sqrt{\left( \frac{\mu \delta}{a} + 3 + \frac{a}{\mu \delta} \right)^2 + \left( \frac{a}{\mu \delta} - \frac{\mu \delta}{a} \right)^2} \quad (5)$$

Для определения  $\mu$  по известным значениям  $|\eta_m|$  использовался графический метод для уравнения (5). Для наглядности, строились правая и левая



части следующего вида:

$$LHS : y(\mu) = |\eta_m(f)| \exp \left[ -\frac{d}{\delta} \right]$$

$$RHS : x(\mu) = \frac{1}{6} \sqrt{\left( \frac{\mu\delta}{a} + 3 + \frac{a}{\mu\delta} \right)^2 + \left( \frac{a}{\mu\delta} - \frac{\mu\delta}{a} \right)^2}$$

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  $\mu$  начинает падать с ростом частоты

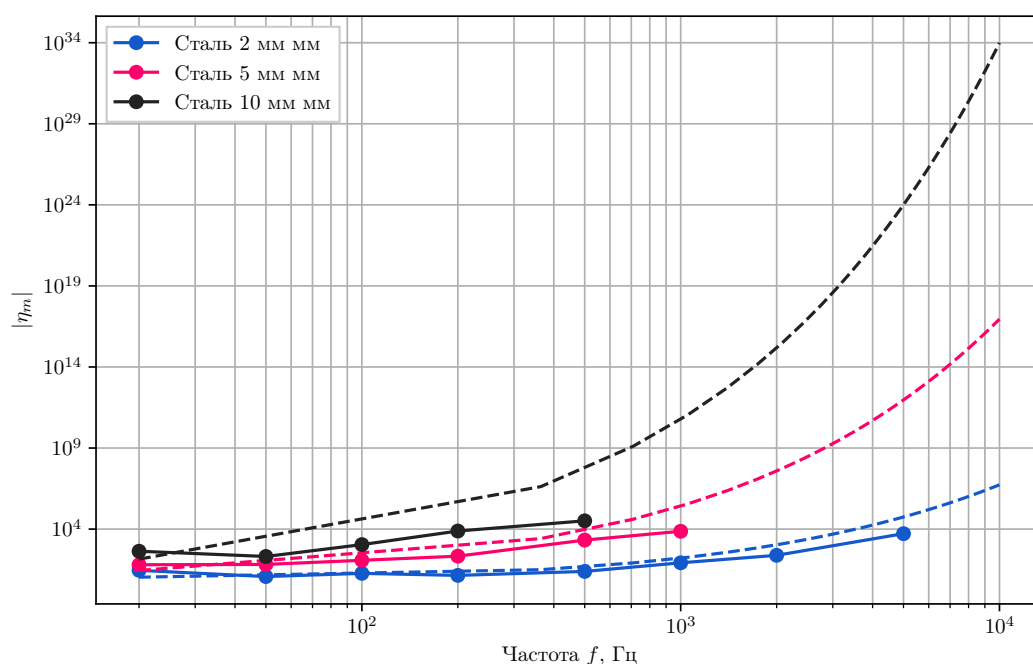


Рис. 3: Экспериментальные и теоретические (пунктир) графики для экранов из стали.

## 4. Результаты

1. В работе было исследовано явление экранирования переменного магнитного поля стальными и латунными экранами.
2. Произведен расчет и сопоставление экранирующих свойств латунных экранов с экспериментальными с помощью модели сферического слоя. Выявлено хорошее совпадение теории с практикой до  $f = 6$  кГц.
3. Численными методами найдены  $\mu$  для стальных экранов, дающие наиболее адекватное соответствие теоретических графиков практическим:  $\mu = 153, 140, 130$  для 2,5,10 мм экранов. В этом случае теория дает качественное соответствие вплоть на частотах  $f \simeq 1$  кГц.

### 4.1. Таблицы измерений

| Характеристика экрана |            |       | Латунь 2 мм |       | Латунь 5 мм |       | Латунь 10 мм |        |
|-----------------------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|--------------|--------|
| $f$ , Гц              | $V_0$ , мВ | U, мВ | $V_e$ , мВ  | U, мВ | $V_e$ , мВ  | U, мВ | $V_e$ , мВ   | U, дел |
| 20                    | 1000       | 2100  | 920         | 2680  | 960         | 2550  | 870          | 2590   |
| 50                    | 1000       | 1410  | 840         | 1530  | 880         | 1480  | 700          | 1520   |
| 100                   | 1000       | 560   | 690         | 820   | 600         | 820   | 500          | 820    |
| 200                   | 1000       | 500   | 650         | 540   | 480         | 540   | 350          | 600    |
| 500                   | 1000       | 340   | 500         | 420   | 300         | 480   | 180          | 560    |
| 1000                  | 1000       | 150   | 380         | 196   | 180         | 208   | 100          | 280    |
| 2000                  | 1000       | 112   | 240         | 152   | 80          | 168   | 33           | 224    |
| 5000                  | 1000       | 80    | 90          | 136   | 28          | 146   | 3.6          | 220    |
| 10000                 | 800        | 54    | 54          | 48    | 7.4         | 66    | 0.22         | 142    |

Таблица 1: Экспериментальные данные для латунных экранов

| Характеристика экрана |            |          | Сталь 2 мм |          | Сталь 5 мм |          | Сталь 10 мм |          |
|-----------------------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|-------------|----------|
| $f$ , Гц              | $V_0$ , мВ | $U$ , мВ | $V_e$ , мВ | $U$ , мВ | $V_e$ , мВ | $U$ , мВ | $V_e$ , мВ  | $U$ , мВ |
| 20                    | 1000       | 2100     | 48         | 2880     | 21         | 2790     | 3           | 2720     |
| 50                    | 1000       | 1410     | 69         | 1150     | 12         | 1120     | 1.8         | 520      |
| 100                   | 1000       | 560      | 48         | 500      | 6.3        | 420      | 0.31        | 192      |
| 200                   | 1000       | 500      | 43         | 300      | 2.8        | 300      | 0.04        | 152      |
| 500                   | 1000       | 340      | 24         | 200      | 0.28       | 200      | 0.008       | 88       |
| 1000                  | 1000       | 150      | 8          | 100      | 0.08       | 88       | —           | —        |
| 2000                  | 1000       | 112      | 3.4        | 92       | —          | —        | —           | —        |
| 5000                  | 1000       | 80       | 0.22       | 92       | —          | —        | —           | —        |
| 10000                 | 800        | 54       | —          | —        | —          | —        | —           | —        |

Таблица 2: Экспериментальные данные для стальных экранов