

## Электромагнитное экранирование

Работу выполнили студенты

Есюнин М.В., Есюнин Д.В.

430 группы

преподаватель:

Павличенко И.А.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Цели работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Элементы теории</b>	<b>2</b>
2.1	Основные понятия . . . . .	2
2.2	Расчет экранирующего действия металлических оболочек . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Описание экспериментальной установки</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Практическая часть</b>	<b>5</b>
4.1	Задания 1,2 . . . . .	5
4.2	Задание 3 . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Вывод</b>	<b>7</b>

## 1. Цели работы

Настоящая работа преследует следующие две основные цели.

- Экспериментальное наблюдение явления экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснение роли основных физических факторов, определяющих степень проникновения поля через экран; к числу таких факторов относятся: свойства материала экрана (проводимость и магнитная проницаемость), толщина его стенок, частота поля.
- Теоретический расчет экранирующих свойств металлических оболочек на простой модели и сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

## 2. Элементы теории

### 2.1. Основные понятия

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. Явление экранирования поля проводящими оболочками имеет большое практическое значение. В частности, оно широко используется в электро- и радиотехнике для уменьшения паразитных связей между различными элементами приборов. В некоторых случаях, напротив, может возникнуть необходимость принимать специальные меры для борьбы с этим явлением. 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.

### 2.2. Расчет экранирующего действия металлических оболочек

В качестве экранов в работе используются оболочки цилиндрической формы. Строгий расчет их экранирующего действия представлял бы собой весьма сложную задачу, требующую использования численных методов. Однако для получения качественных оценок, ослабления поля в экранированной области и установления общего характера его зависимости от параметров можно ограничиться изучением более простых моделей, допускающих точное решение задачи в известных аналитических функциях. Моделями такого рода являются, например, плоский, цилиндрический и сферический слой.

Поскольку высота и диаметр внутренней полости используемых в работе цилиндров одинаковы и весьма малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве  $\lambda_0$ , наиболее адекватной моделью, по-видимому, следует считать сферический слой, который имеет тот же объем внутренней полости и внешний радиус  $a \ll \lambda_0$ . Последнее условие означает, что вне металла (т.е. как во внешней, так и в экранируемой областях) поле можно рассматривать как квазистатическое. 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:

$$\eta_m = H_0/H_1 \quad (1)$$

Величина  $|\eta_m|$  показывает, в какое число раз ослабляется поле в экранированной области, и может быть названа коэффициентом ослабления. Она, естественно, сильно зависит от соотношения между толщиной экрана  $d$  и толщиной скин-слоя  $\delta = c/(2\pi\sigma\mu\omega)^{1/2}$  ( $c$  - скорость света в вакууме,  $\sigma$  - проводимость,  $\mu$  - магнитная проницаемость экрана). В двух предельных случаях ( $\delta \ll d$  и  $\delta \gg d$ ) выражение для  $\eta_m$  (в общем случае довольно громоздкое) существенно упрощается и при выполнении дополнительного условия  $d \ll a$  принимает следующий вид:

1.  $\delta \ll d$  (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  $\mu = 1$

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

2.  $\delta \gg d$  (скин-эффект отсутствует):

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

При  $\mu = 1$

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

Для приближенных оценок величины  $\eta_m$  (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  $\delta = d$ .

Заметим, что приведенные результаты расчета позволяют описать также экранирующее действие сферической металлической оболочки по отношению к переменному

электрическому полю. В частности, при  $\delta \gg a$  выражение для комплексного коэффициента ослабления электрического поля  $\eta_\varepsilon$ , легко получается на основании принципа перестановочной двойственности из выражения (4) путем замены в нем магнитной проницаемости  $\mu$  на диэлектрическую проницаемость проводника  $\varepsilon = 4\pi\sigma/i\omega$ . В диапазоне радиочастот величина  $|\varepsilon|$  для хороших проводников и определяемая ею величина  $|\eta_\varepsilon|$  принимают чрезвычайно высокие значения, недоступные для измерений в условиях настоящей работы даже при весьма малой толщине экранов. Например, при  $d/a \simeq 10^{-3}$ ,  $\sigma \simeq 10^{17} \text{с}^{-1}$ ,  $\omega \simeq 10^4 \text{с}^{-1}$ , пренебрегая в (4) малыми членами и заменяя  $\mu$  на  $\varepsilon$ , получаем:

$$\eta_\varepsilon = 2\varepsilon d/3a = -i8\pi\sigma d/3\omega a \simeq -i \cdot 10^{11} \quad (6)$$

В полном соответствии с законами электростатики при  $\omega \rightarrow 0$  величина  $\eta_\varepsilon \rightarrow \infty$ , т.е. электрическое поле внутри экрана не проникает.

### 3. Описание экспериментальной установки

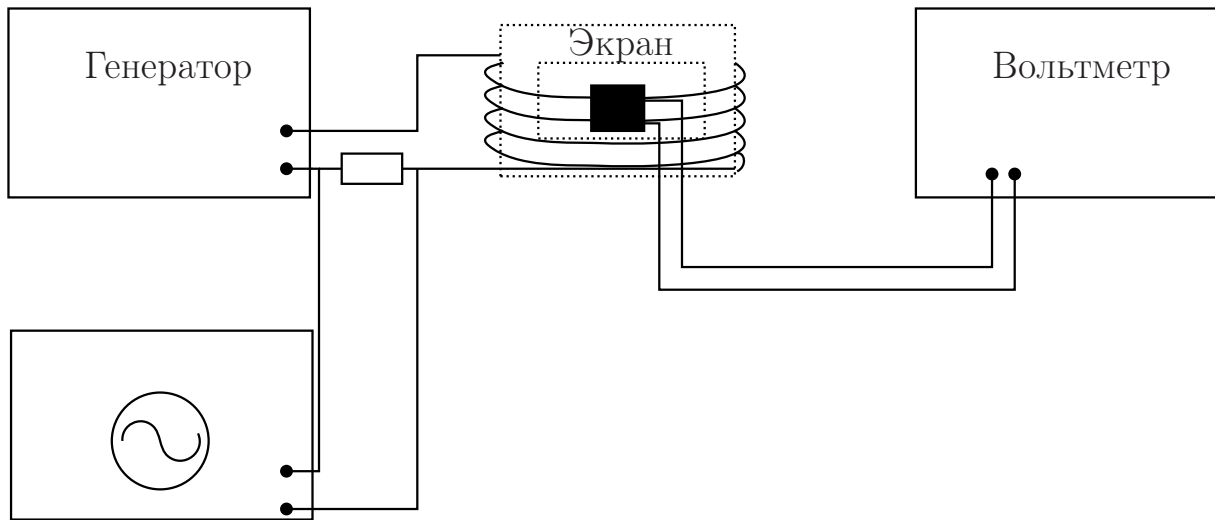


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Лабораторная установка предусматривает проведение измерений коэффициентов ослабления для трех латунных и трех стальных экранов цилиндрической формы. Внутренние размеры всех цилиндров одинаковы (высота  $h = 50 \text{мм}$ , диаметр основания  $D = 50 \text{мм}$ ), а толщина стенок различна (2мм, 5мм, 10мм). Значения проводимости  $\sigma$  и магнитной проницаемости  $\mu$  латуни и стали приведены ниже (в гауссовой системе единиц). Латунь:  $\sigma \simeq 1.5 \cdot 10^{17} \text{с}^{-1}$ ,  $\mu \cong 1$ . Сталь:  $\sigma \simeq 0.7 \cdot 10^{17} \text{с}^{-1}$ ,  $\mu \sim 10^2 \div 10^3$  (при  $H \sim 10$  эрстед). Схема измерения коэффициента ослабления магнитного поля изображена на рисунке 1. Переменное магнитное поле создается внутри соленоида, подключенного к выходу звукового генератора. В качестве индикатора поля используется второй соленоид (меньших размеров), с выхода которого переменное напряжение может подаваться

на усилитель вольтметра. Надевая большой (генераторный) соленоид сначала на открытый (неэкранированный) индикатор, а затем на индикатор, закрываемый экраном, и измеряя, как изменяются при этом показания вольтметра, мы могли бы (при неизменности амплитуды тока в цепи внешнего соленоида) определить тем самым коэффициент ослабления  $|\eta_\mu|$ . Поскольку, однако, внесение металлического экрана внутрь внешнего соленоида, вообще говоря, изменяет его коэффициент самоиндукции, а следовательно, и его импеданс, сила тока в цепи внешнего соленоида и создаваемое этим током магнитное поле  $H_0$  при наличии экрана и в его отсутствие могут быть различными. Это необходимо учитывать при определении величины  $|\eta_\mu|$ . 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. Величина  $|\eta_\mu|$  должна определяться по формуле:

$$|\eta_\mu| = \frac{V_0 U_e}{V_e U_0} \quad (7)$$

где  $V$  и  $U$  - соответственно показания вольтметра и осциллографа, индексы 0 и  $e$  относятся соответственно к величинам измеренным без экрана и с экраном.

## 4. Практическая часть

### 4.1. Задания 1,2

Для каждого экрана (латунь, сталь) сняли экспериментальную зависимость коэффициента ослабления магнитного поля  $|\eta_\mu|$  от частоты  $f$ .

Латунь

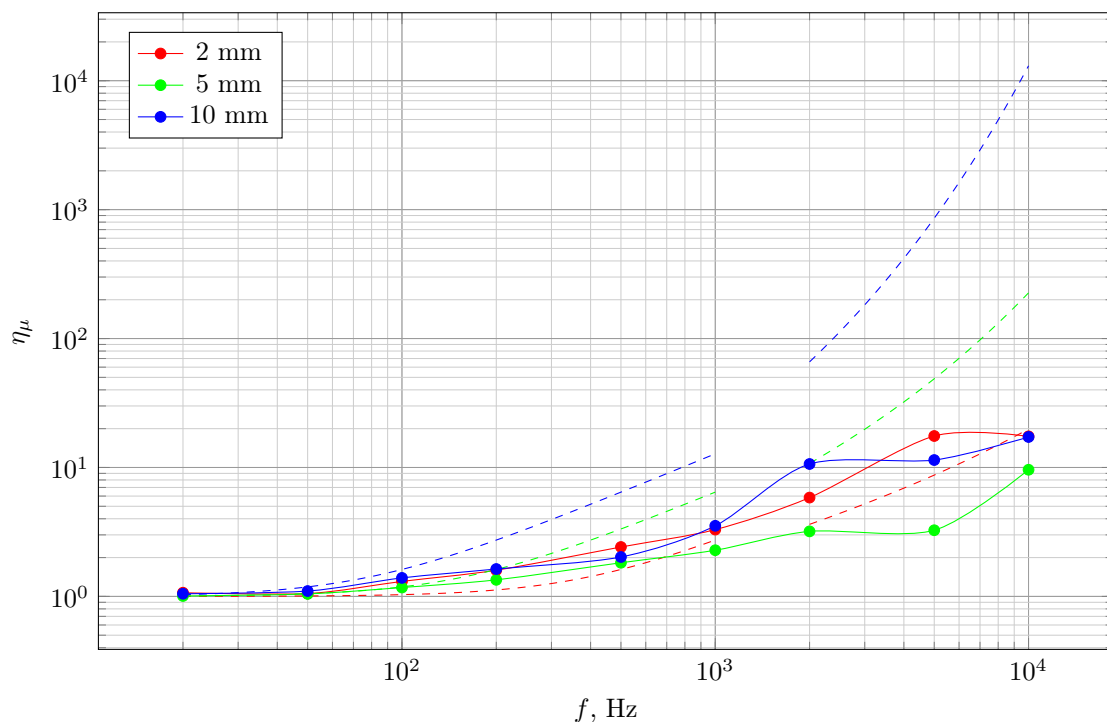


Рис. 2: Теоретическая зависимость  $|\eta_\mu(f)|$  указана пунктиром.

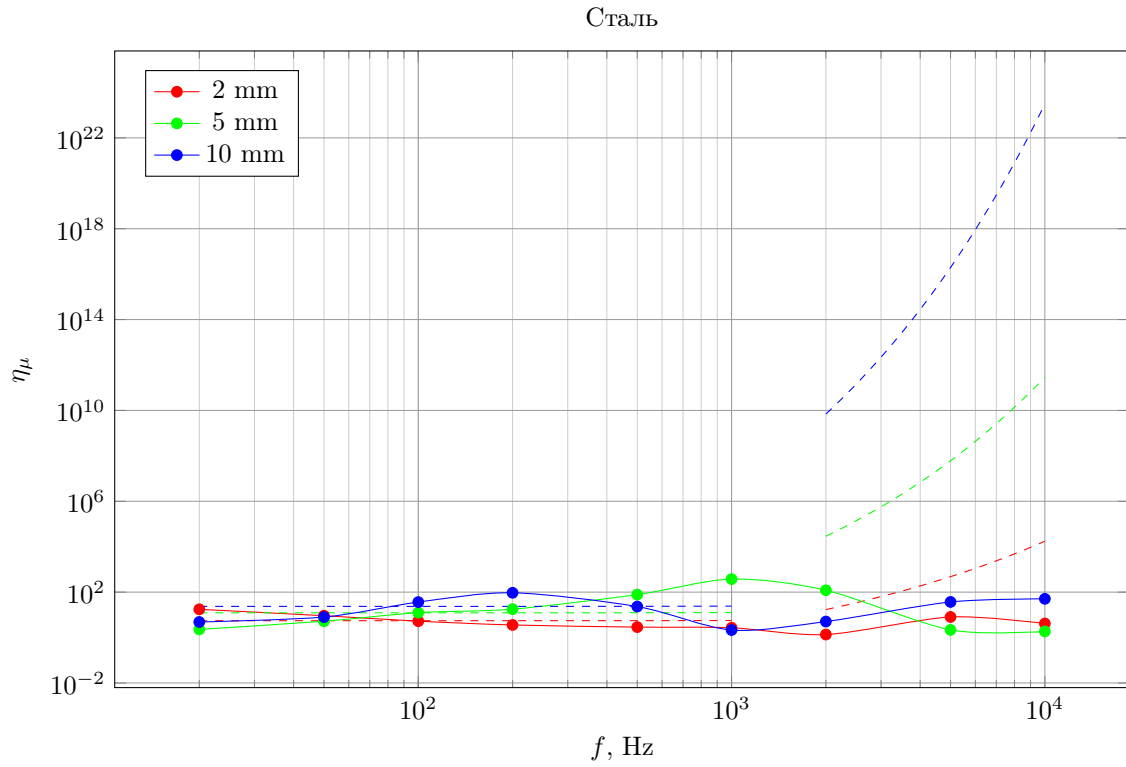


Рис. 3: Теоретическая зависимость  $|\eta_\mu(f)|$  указана пунктиром.

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  $|\eta_\mu(f)|$ .

Качественное совпадение наблюдается в области малых частот (до 1000 Hz). Для более высоких частот теория от эксперимента отличается в 20 порядков.

## 4.2. Задание 3

Используя результаты измерений для стальных экранов, рассчитали приблизительно на основании той же сферической модели для случая  $\delta(f) \ll d$  (формула (2)) значения магнитной проницаемости стали  $\mu$ . Способ приближенного расчета состоял в численном решении уравнения для 3 нижних частот (для высоких частот модель **не совпадает**) частот и последующем усреднении результатов. По полученным данным можно сделать

Таблица 1: Магнитная проницаемости  $\mu$  для разных частот  $f$  и толщины экрана  $d$

$f, \text{ Hz}$	$\mu, 2\text{mm}$	$\mu, 5\text{mm}$	$\mu, 10\text{mm}$
20	306.25	13.05	18.64
50	179.35	38.76	32.26
100	94.83	102.01	146.13
$\langle \mu \rangle$	193.48	51.27	65.68

вывод о недостаточной точности эксперимента. Хотя качественно  $\mu$  для стали действительно лежит в пределах 100 – 1000.

## 5. Вывод

1. Экспериментально наблюдали явление экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснили роль основных физических факторов, определяющих степень проникновения поля через экран
2. Теоретически рассчитали экранирующие свойства металлических оболочек на простой модели и сопоставили экспериментальные и теоретические данные.
  - В области малых частот простая модель действительно хорошо описывает экранирующие свойства цилиндрического экрана. В области высоких частот теория модели отличается на несколько порядков, что говорит о неприменимости модели.
  - Для стали магнитная проницаемость варьируется в достаточно широких пределах. Это говорит о том, что необходимо повысить чувствительность эксперимента для более точного определения  $\mu$ .