

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Радиофизический факультет
Кафедра электродинамики

Отчет по лабораторной работе:

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

Выполнили: студенты 430 группы
Воробьёв Артём
Зайцев Юрий

Проверил: **Кондратьев Игорь Григорьевич**

Нижний Новгород
2007 год

Содержание

1 Введение	3
2 Теоретическая часть	3
2.1 Основные определения	3
2.2 Расчет экранирующих свойств металлических оболочек	4
3 Практическая часть	5
3.1 Метод измерений	5
3.2 Результаты эксперимента	6
4 Вывод	7

1 Введение

Цель работы: изучение явления экранирования переменного магнитного поля проводящими оболочками. В ходе работы необходимо провести ряд измерений коэффициентов ослабления полей внутри набора экранирующих оболочек, сделанных из разных материалов и обладающих различной толщиной стенок, в зависимости от частоты изменения поля. Полученные результаты нужно сравнить с приблизительными расчетами, проведенными на основании простой теоретической модели (модели электромагнитного поля внутри сферического слоя).

Приборы и оборудование:

- Вольтметр У2-6
- Генератор звуковой ЭГ-10
- Универсальный осциллограф С1-4
- Индикаторный и генераторный соленоиды
- Набор экранирующих цилиндров (высота $h = 50$ мм, диаметр основания $D = 50$ мм, толщины стенок 2 мм, 5 мм и 10 мм для каждого из материалов):
 - Цилиндры 1, 2, 3: латунь, $\sigma \cong 1.5 \times 10^{17} \text{ c}^{-1}$, $\mu \cong 1$
 - Цилиндры 4, 5, 6: сталь, $\sigma \cong 0.7 \times 10^{17} \text{ c}^{-1}$, $\mu \cong 10^2 \div 10^3$ (при $H \sim 10 \text{ Э}$)
- Соединительные провода

2 Теоретическая часть

2.1 Основные определения

Под **электромагнитным экранированием** понимается изоляция некоторой области пространства от проникновения электромагнитных полей, существующих в соседних областях. В статических или переменных, но квазистационарных полях ($\lambda \gg l$, где l – характерный линейный размер используемых приборов или устройств) такая изоляция осуществляется с помощью замкнутых металлических оболочек – экранов (например, клетка Фарадея).

Нас же, однако, интересует наблюдение явления экранирования переменного магнитного поля и выяснение роли основных факторов, определяющих степень проникновения поля через экран: свойства материала экрана (проводимость σ и магнитная проницаемость μ), толщина его стенок и частота изменения поля.

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 и, в результате их суперпозиции, суммарное поле в этой области уменьшается.

2.2 Расчет экранирующих свойств металлических оболочек

В качестве экранов в работе используются оболочки цилиндрической формы. Для получения качественных оценок ослабления поля в экранированной области и установления общего характера его зависимости от параметров можно ограничиться изучением модели экранирующего сферического слоя, которая допускает точное решение задачу в известных аналитических функциях.

Модель сферического слоя, имеющего тот же объем внутренней полости, что и соответствующий ему цилиндр, и внешний радиус $a \ll \lambda_0$, адекватна данной задаче, т.к. линейные размеры используемых в работе цилиндров весьма малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве λ_0 (при $\varepsilon = \mu = 1$ и $f = 10^4$ Гц, $\lambda_0 \sim 30$ км, в то время как $h = D = 50$ мм).

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

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

Величина $|\eta_m|$ называется **коэффициентом ослабления** и показывает, в какое число раз ослабляется поле в экранированной области. Она сильно зависит от соотношения между толщиной экрана d и толщиной скин-слоя $\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\mu\omega}}$ и, в предельных случаях $\delta \ll d$ и $\delta \gg d$, выражение для η_m при выполнении дополнительного условия $d \ll a$ принимает следующий вид:

$\delta \ll d$ (**сильный скин-эффект**)

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

$\delta \gg d$ (**скин-эффект отсутствует**)

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

Для приближенных оценок величины $|\eta_m|$ приведенные выражения (3) и (2) можно использовать и в промежуточном случае, когда $\delta \simeq d$, разграничивая их области применимости точкой $\delta = d$.

Таким образом, чтобы получить теоретическую зависимость $|\eta_m(f)|$, которую можно было бы сопоставить с экспериментальными данными, необходимо вычислить эквивалентный размер a сферического слоя, который обладал бы при этом той же толщиной d и тем же объемом внутренней полости V :

$$V = \frac{4\pi}{3}(a-d)^3 = \pi R^2 h \quad \Rightarrow \quad a = d + \sqrt[3]{\frac{3R^2 h}{4}}. \quad (4)$$

Далее, подставляя его вместе с другими параметрами и выражением для скин-слоя в формулы (3) и (2), можно получить выражение для искомой зависимости.

$\delta \ll d$ (**сильный скин-эффект**)

$$\eta_m(f) = \frac{1}{6} \left[(1-i) \frac{c}{2\pi a} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma f}} + 3 + (1+i) \frac{2\pi a}{c} \sqrt{\frac{f\sigma}{\mu}} \right] \exp \left\{ (1+i) \frac{2\pi d \sqrt{\sigma \mu f}}{c} \right\} \quad (5)$$

$\delta \gg d$ (**скин-эффект отсутствует**)

$$\eta_m(f) = 1 + \frac{2d(\mu-1)^2}{3a\mu} + i \frac{2}{3} \frac{4\pi^2 \sigma a d f}{c^2} \quad (6)$$

3 Практическая часть

3.1 Метод измерений

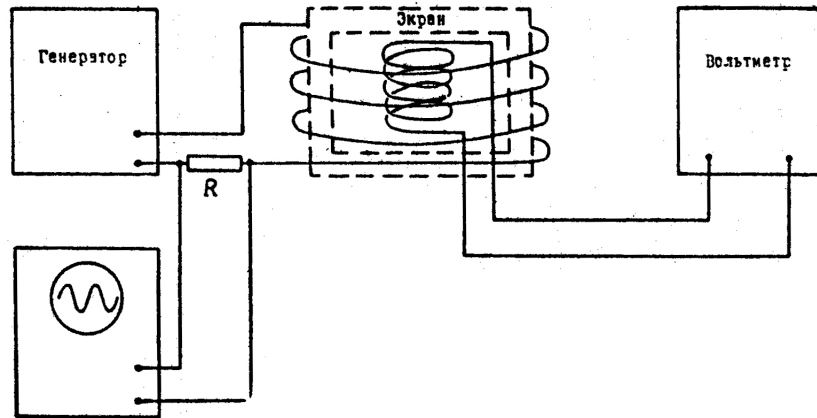


Рис. 1: Схема установки: генератор, индикаторный и генераторный соленоиды, экран, и измерительные приборы – вольтметр и осциллограф

Схема установки по измерению коэффициента ослабления магнитного поля представлена на Рис. 1. Переменное магнитное поле создается внутри соленоида, подключенного к выходу звукового генератора, а в качестве индикатора поля используется второй соленоид, с выхода которого переменное напряжение может подаваться на вольтметр.

Методика измерений заключалась в следующем: после установки нужного значения частоты на генераторе, генераторный соленоид сначала надевался на открытый неэкранированный индикатор, а затем последовательно на индикатор, закрываемый различными экранами. При этом фиксировались изменения показаний вольтметра и, кроме того, показания осциллографа, на который подавалось напряжение с включенного в цепь генераторного соленоида сопротивления R .

Это делалось для того, чтобы учесть изменение коэффициента самоиндукции генераторного соленоида, которое вызывало внесение внутрь него металлического экрана, что, в свою очередь, влияло на его импеданс, а, следовательно, и силу тока в цепи.

Сама величина $|\eta_m|$ определялась потом по формуле

$$|\eta_m| = \frac{V_0 U_e}{V_e U_0}, \quad (7)$$

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

3.2 Результаты эксперимента

На графиках ниже приведены результаты эксперимента в сравнении с теоретическими зависимостями.

На Рис. 2 изображен начальный участок зависимости $(|\eta_m|(f) - 1)$ для экранов из латуни. Дело в том, что отбрасывая незначимые члены в выражениях (5) и (6) можно получить, что на начальном участке для немагнитных экранов

$$|\eta_m| = 1 + i \frac{2ad}{3\delta^2} \quad \Rightarrow \quad |\eta_m| - 1 \sim f, \quad (8)$$

что легко проверить по графику. Видно, что зависимость, действительно, линейная, и сделанные предположения оправдались. Такая зависимость имеет место вплоть до частот, при которых уменьшающаяся толщина скин-слоя сравнивается с толщиной экрана. Из графика видно, что для самого тонкостенного экрана почти линейная зависимость, как и следует ожидать, хорошо аппроксимируется приближенной теоретической формулой вплоть до частоты порядка 4 кГц. Для более толстых экранов заметные отклонения возникают при существенно более низких частотах.

Полная зависимость $|\eta_m|(f)$ для латунных экранов приведена на Рис. 3. Видно, что полученные данные хорошо совпадают с теоретической зависимостью вплоть до частот порядка 6 кГц, и только на частотах выше 10 кГц наблюдаются заметные отклонения.

Далее, на Рис. 4 приведена зависимость $|\eta_m|(f)$ для экранов из стали. Тут видно, что, в отличие от случая немагнитных экранов, видимо, имеет место насыщение, связанное, вероятно, с тем обстоятельством, что на высоких частотах домены в стали не успевают отслеживать изменения направления векторов электромагнитного поля, а следовательно μ начинает падать, что может объяснить значительное снижение величины коэффициента экранирования на частотах 5-15 кГц.

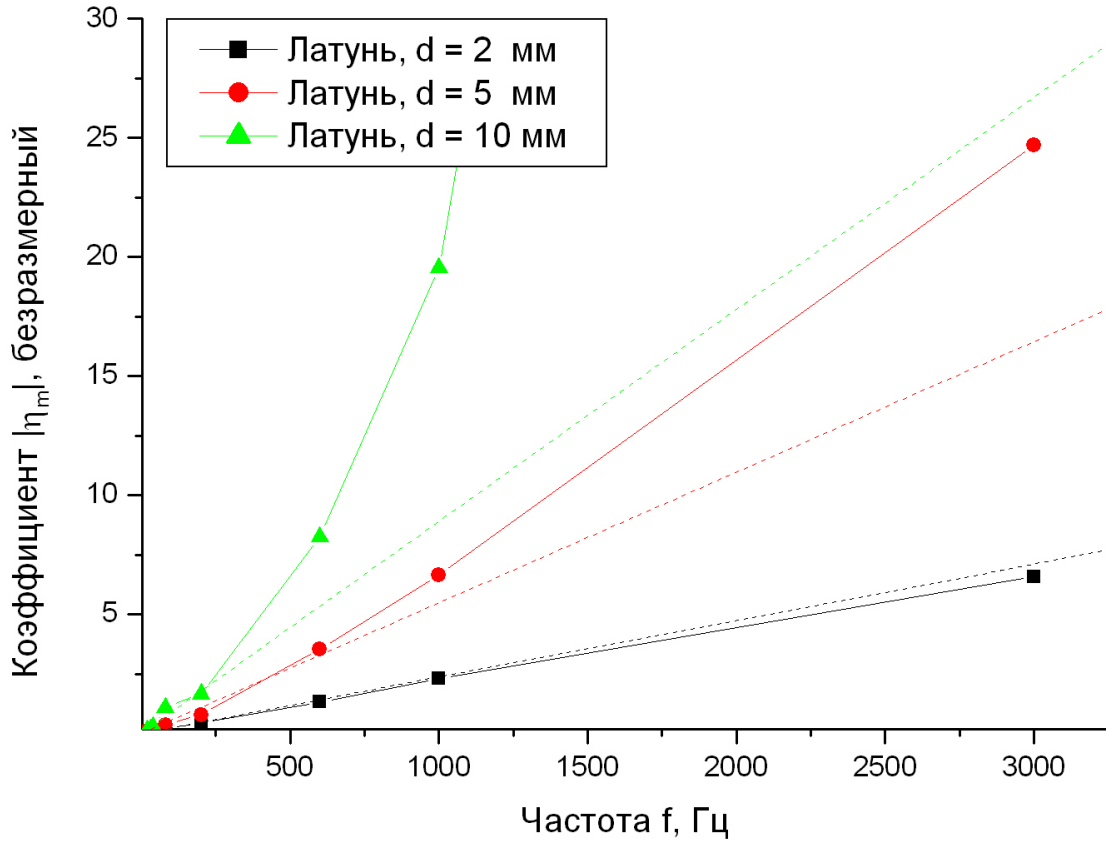


Рис. 2: Зависимость $|\eta_m|(f)$ для экранов из латуни (начальный участок)

При обработке данного графика было путем подбора наилучшего соответствия экспериментальных и теоретических кривых на растущих участках (до проявления насыщения) было оценено значение μ , которое оказалось равным

$$\mu \simeq 200. \quad (9)$$

Это значение согласуется с указанным в описании работы диапазоном $\mu \cong 10^2 \div 10^3$ (при $H \sim 10$ Э).

4 Вывод

В работе было исследовано явление экранирования переменного магнитного поля проводящими оболочками и получено хорошее согласие принятой теоретической модели

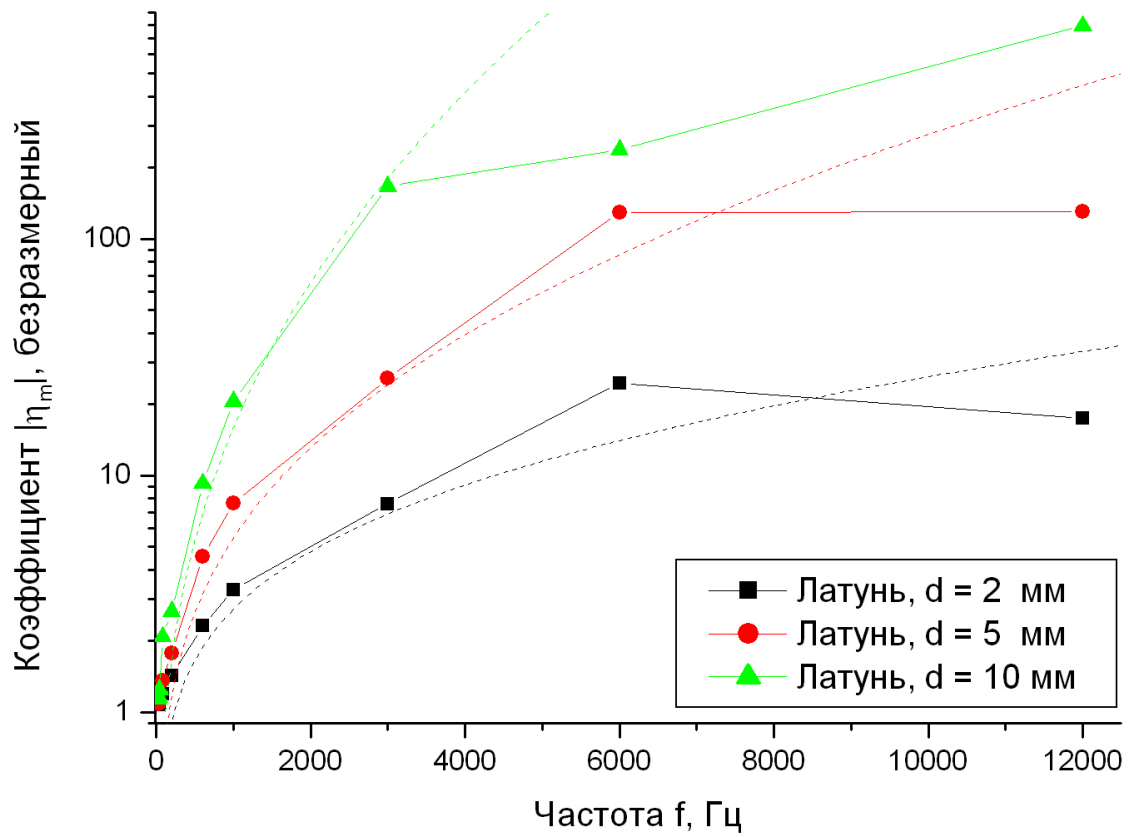


Рис. 3: Зависимость $|\eta_m|(f)$ для экранов из латуни (полностью)

с экспериментальными данными, поэтому работу можно считать выполненной успешно.

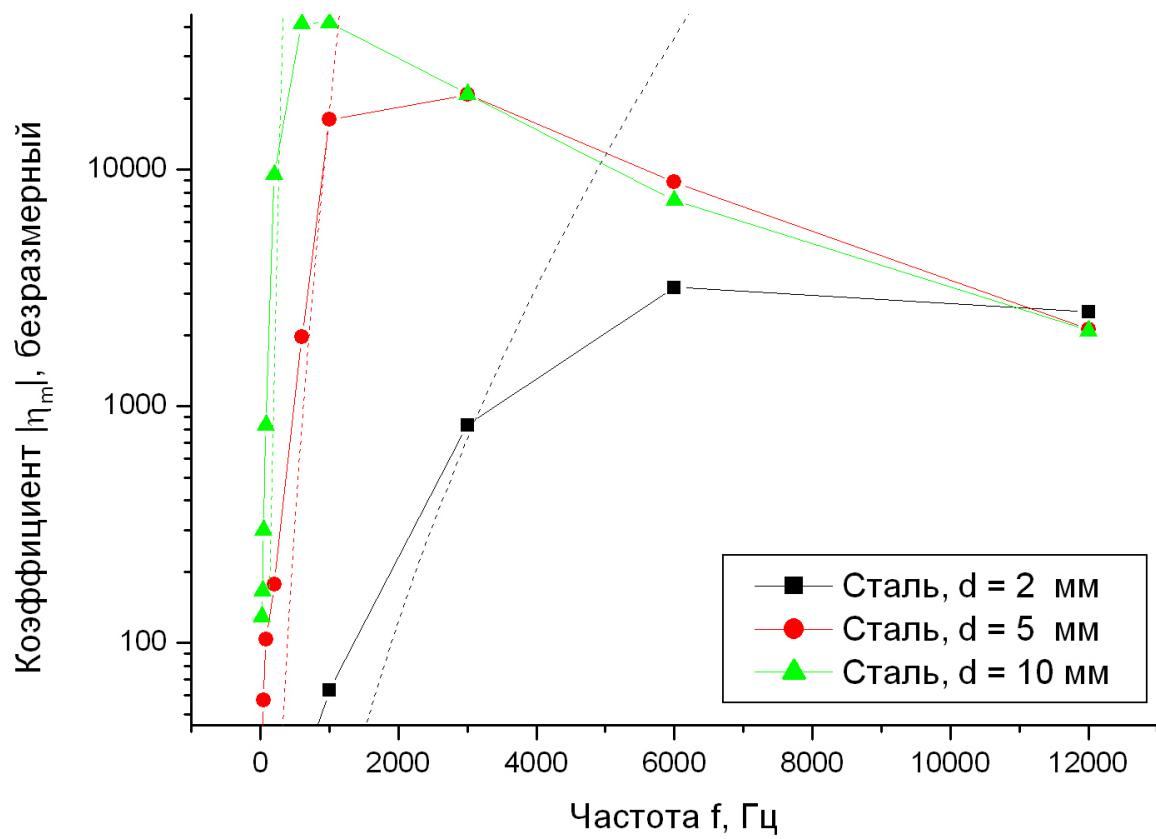


Рис. 4: Зависимость $|\eta_m|(f)$ для экранов из стали