

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  $\lambda_0$ , 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:

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

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

В пределе  $\delta \ll d \ll a$  (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  $\delta \gg d \ll a$ ):

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

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  $\delta = d$ .

## 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:

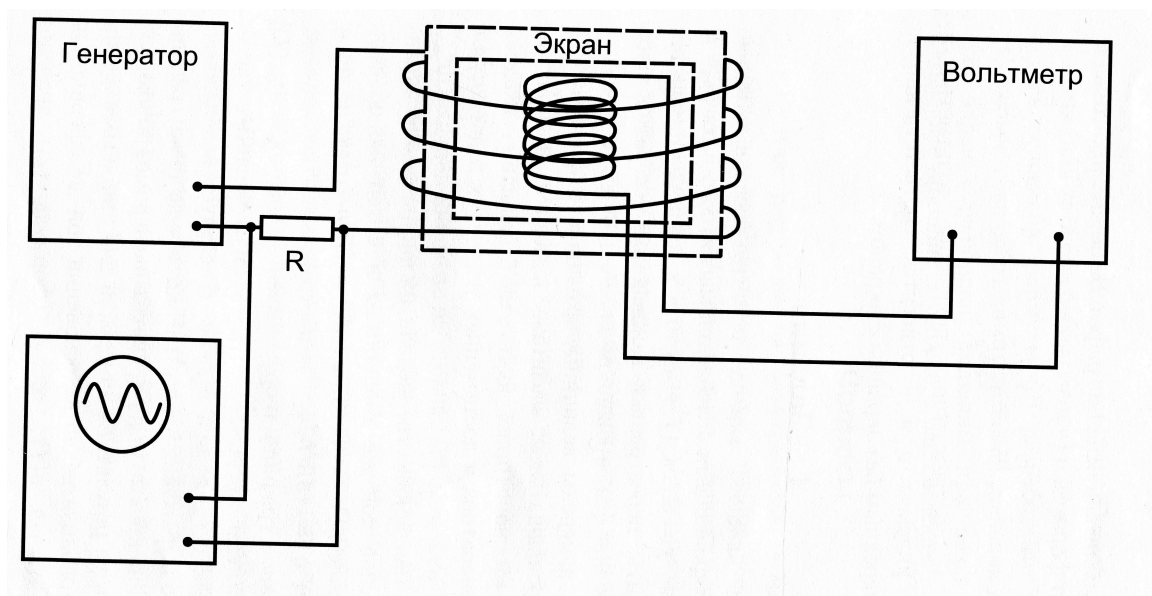


Рис. 1: Схема установки

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  $B_0$  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 измерении каждого экрана производилась подстройка напряжения на генераторном соленоиде, чтобы оно было одно и тоже при отсутствии экрана и его внесении, чтобы можно было применять формулу (6).

Таблица 1: Измерение экранирования латунными экранами

	Без экрана		Латунь 2			Латунь 5			Латунь 10		
$f$ , Гц	$V_0$	$U_0$	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $
20	1 000	16.70	930	16.30	1.05	910.0	16.30	1.07	870.00	16.30	1.12
50	1 000	5.59	870	5.59	1.15	820.0	5.59	1.22	620.00	5.19	1.50
100	1 000	4.40	770	4.40	1.30	650.0	4.40	1.54	490.00	4.40	2.04
200	1 000	1.90	680	2.09	1.62	540.0	2.24	2.18	380.00	2.40	3.32
500	1 000	1.14	500	1.30	2.28	300.0	1.46	4.27	180.00	1.60	7.80
1 000	1 000	0.73	390	0.92	3.23	170.0	1.00	8.06	90.00	1.27	19.33
2 000	1 000	0.65	240	0.92	5.90	80.0	1.00	19.23	34.00	1.30	58.82
5 000	1 000	0.58	100	0.78	13.45	28.0	0.88	54.18	3.80	1.28	580.73
10 000	700	0.31	39	0.32	18.53	5.2	0.33	143.30	0.45	0.62	3 111.07

У стальных экранов некоторые измерения не были произведены полностью, ввиду сильного падения  $V_e$  и появления шумов, искажающих результаты (шум больше точности измерения).

Таблица 2: Измерение экранирования стальными экранами

	Без экрана		Сталь 2			Сталь 5			Сталь 10		
$f$ , Гц	$V_0$	$U_0$	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $	$V_e$	$U_e$	$ \eta_m $
20	1 000	16.70	52.00	16.00	18	20.000	15.60	47	18.000	15.10	50
50	1 000	5.59	68.00	4.50	12	9.000	4.20	83	1.500	4.00	477
100	1 000	4.40	54.00	3.20	13	7.500	2.79	85	0.350	1.60	1 039
200	1 000	1.90	40.00	1.05	14	2.200	0.97	232	0.040	0.83	10 921
500	1 000	1.14	22.00	0.68	27	0.250	0.60	2 105	0.010	0.58	50 877
1 000	1 000	0.73	9.00	0.52	79	0.035	0.50	19 568	0.005	0.48	131 506
2 000	1 000	0.65	3.20	0.54	260	0.030	0.48	24 614	—	—	—
5 000	1 000	0.58	0.18	0.54	5 172	—	—	—	—	—	—
10 000	700	0.31	0.07	0.38	12 258	—	—	—	—	—	—

Для полученных результатов по всем частотам и всем экранам рассчитан  $|\eta_m|$  и построены графики в логарифмическом масштабе по обеим осям.

На рисунке 2 (см. стр. 7) приведены шесть графиков для каждого экрана.

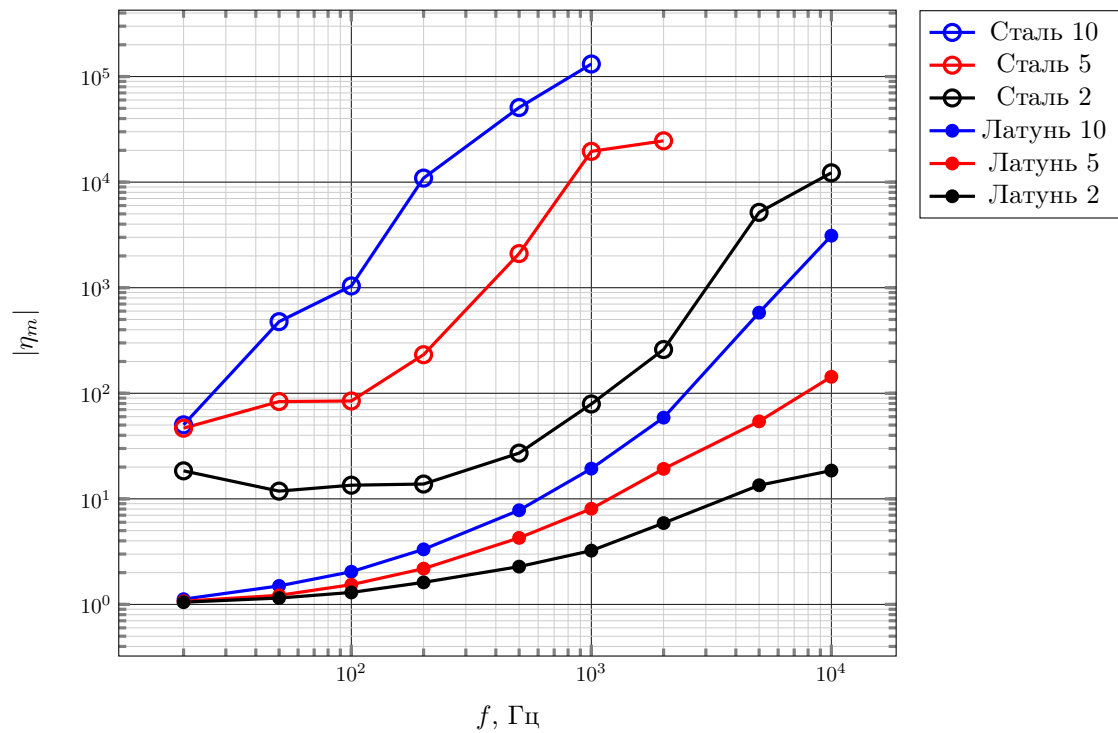


Рис. 2: Результаты эксперимента для трех латунных и трех стальных экранов



### 3.2. Совмещение теории и эксперимента для латунных экранов

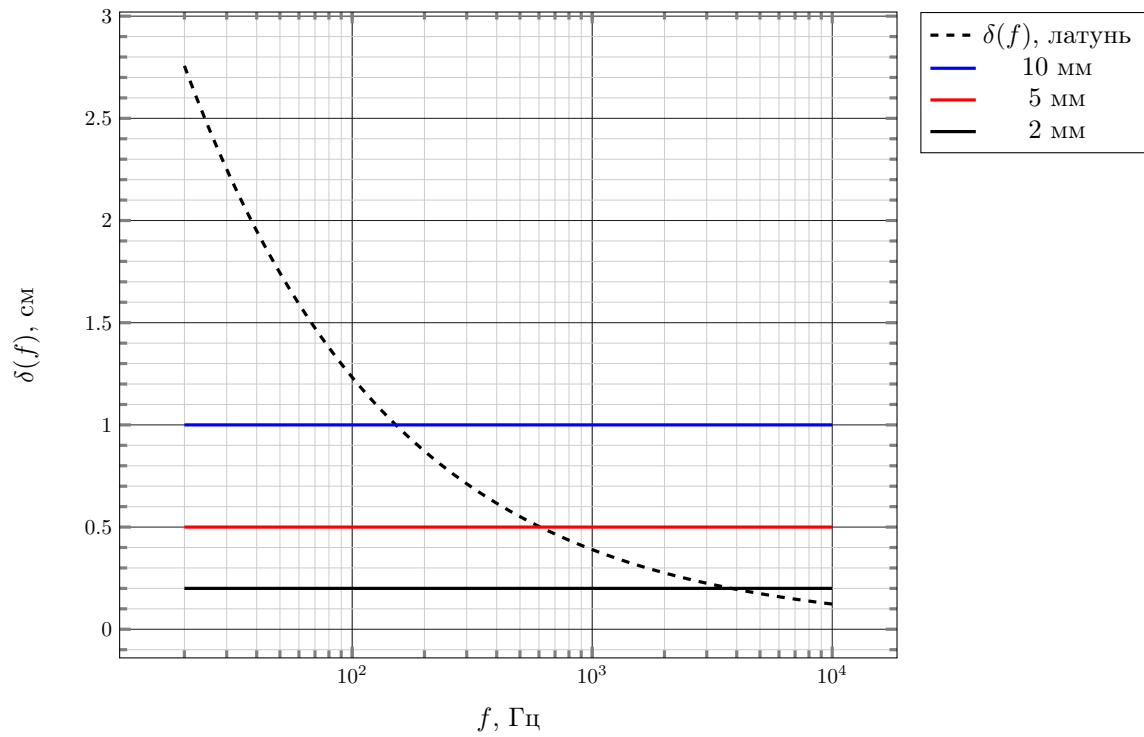


Рис. 3: Разграничение применимости формул толщиной скин-слоя  $\delta(f)$

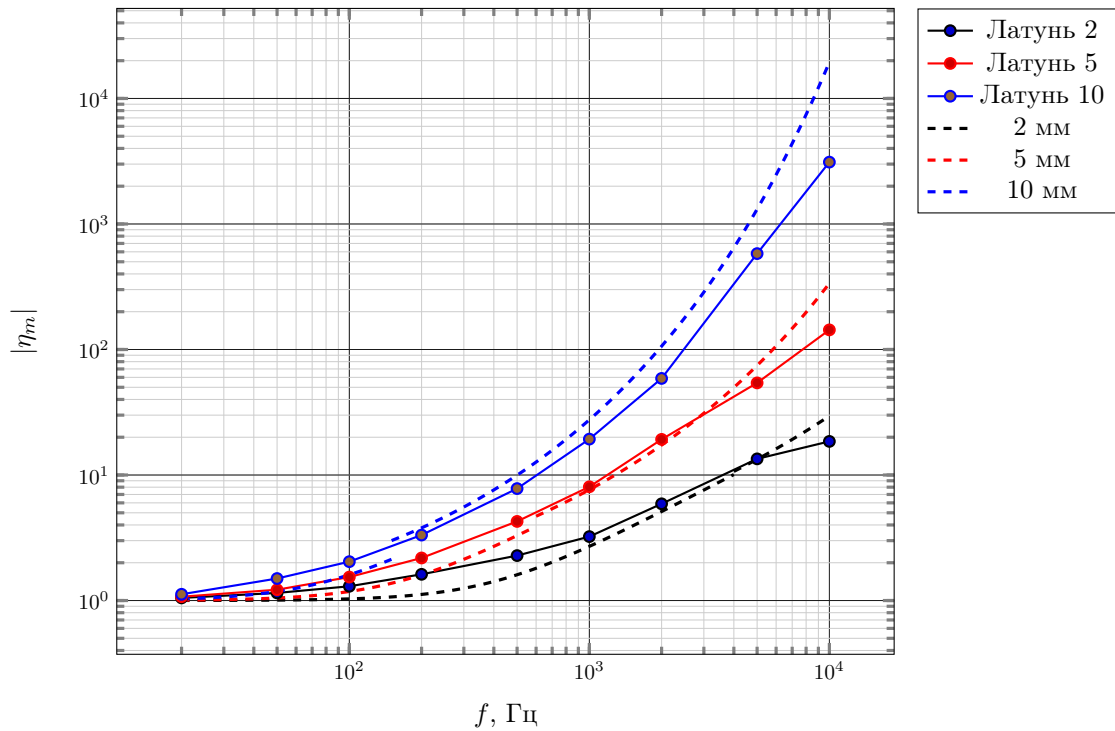


Рис. 4: Наложение теоретических графиков (пунктиром) на экспериментальные для латунных экранов

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  $|\eta_m(f)|$ .

Для разграничения области применения формул различных приближений по  $\delta/d$ , построен график  $\delta(f)$  для латуни и на нем построены константы  $d = 0.2, 0.5, 1.0$  см.

Хорошее качественное совпадение наблюдается в области частот до 6 кГц. Для более высоких частот теоретические кривые нарастают быстрее 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

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

Взяв модуль от этого выражения, получим:

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

Здесь можно получить итерационное уравнение для  $\mu$  двумя способами: через логарифмирование и приведение к общему знаменателю. Для начала приведем формулу к общему знаменателю:

$$|\eta_m| = \frac{\exp \left[ \frac{d}{\delta} \right]}{6\mu\delta a} \sqrt{((\mu\delta)^2 + 3a\mu\delta + a^2)^2 + (a^2 - (\mu\delta)^2)^2} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{\exp \left[ \frac{d}{\delta} \right]}{6|\eta_m|\delta a} \sqrt{((\mu\delta)^2 + 3a\mu\delta + a^2)^2 + (a^2 - (\mu\delta)^2)^2} \quad (10)$$

Эту формулу можно представить (зафиксировав  $\omega$  и взяв из эксперимента  $|\eta_m(\omega)|$ ) в виде

$$\mu = F(\mu) \quad (11)$$

Это уравнение в виде, пригодном для применения известного метода простых итераций, который заключается в задании начального приближения  $\mu^{(0)}$  и итерационного процесса:

$$\mu^{(1)} = F(\mu^{(0)}), \quad \mu^{(2)} = F(\mu^{(1)}), \quad \mu^{(3)} = F(\mu^{(2)}), \quad \dots \quad (12)$$

Начальное приближение можно выбрать из диапазона  $\mu = 10^2 \div 10^3$ .

Хотя функция, стоящая справа, на самом деле не удовлетворяет условиям устойчивости (сходимости) численного решения, но все равно можно найти

этим методом решение, перебирая начальные значения  $\mu$  до того значения, когда точка меняет направление расходимости.

Для 2 мм – стали полученное таким методом значение на частоте 500 Гц дает  $\mu = 153$ . На графике (см. рис 5, стр.12) хорошо видно, что действительно это значение дает численное решение этого уравнения, и теоретический график проходит через практическую точку.

Для 5 мм – стали (на частоте 500 Гц)  $\mu = 140$ , для 10 мм – стали (на частоте 200 Гц)  $\mu = 130$ .

Экспериментальные точки подбирались таким образом, чтобы рассчитанная из них  $\mu$  давала теоретические графики, наиболее хорошим образом описывающие экспериментальные кривые, хотя бы в диапазоне не очень больших частот.

Расхождение теоретического графика (который уходит в значительно большие по сравнению с практическими  $|\eta_m|$ ) и практического, который перестает расти, можно объяснить частотным насыщением магнитной проницаемости стали: доменная структура не успевает изменяться вслед за частотой поля, и  $\mu$  начинает падать с ростом частоты.

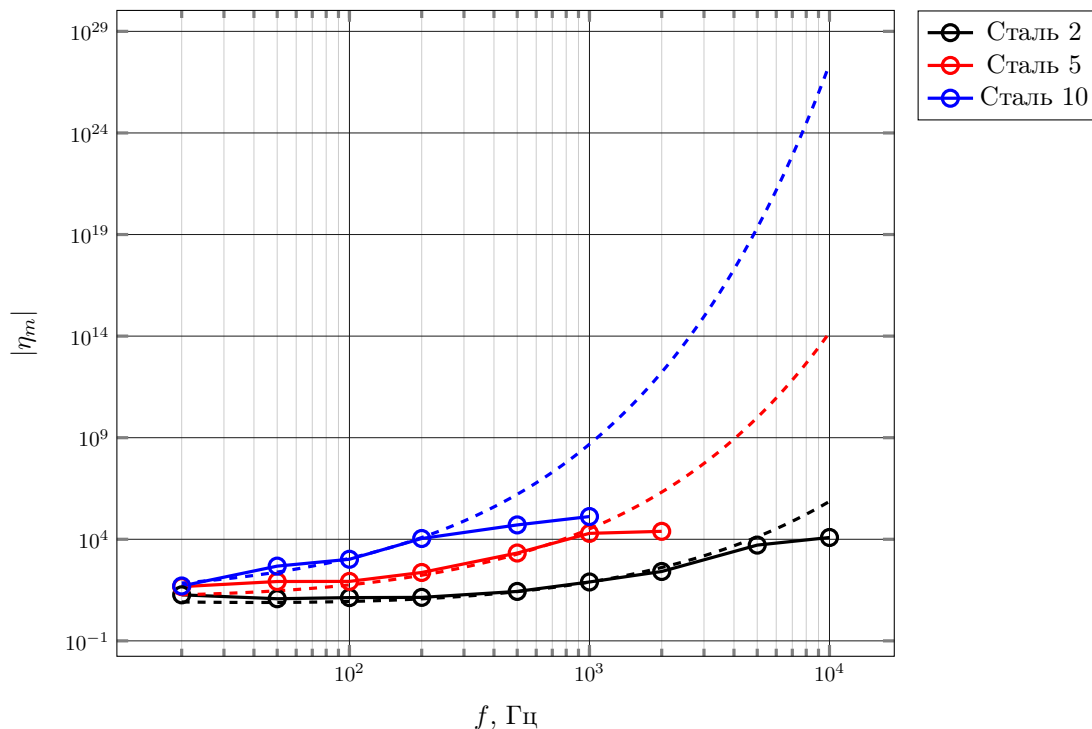


Рис. 5: Сопоставление теоретических графиков и практических для стальных экранов

## 4. Результаты

В работе было исследовано явление экранирования переменного магнитного поля стальными и латунными экранами.

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.

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.

## Список литературы

- [1] Гильденбург В.Б., Павличенко И.А. Практикум: электромагнитное экранирование. — Н. Новгород: ННГУ, 2016. — 20 с.