

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского
Радиофизический факультет

Кафедра электродинамики

Отчёт по лабораторной работе
Электромагнитное экранирование

Выполнили (430 гр):

Горюнов О.А., Сиднев А.А., Плешков Д.С.

2023 г.

Содержание

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Теоретическая часть | 3 |
| 1.1 | Введение | 3 |
| 1.2 | Измерение коэффициента ослабления | 3 |
| 1.3 | Описание экспериментальной установки | 4 |
| 2 | Практическая часть | 6 |
| 2.1 | Снятие экспериментальной зависимости коэффициента ослабления $ \eta_m $. . . | 6 |
| 2.2 | Сравнение с теоретическими зависимостями | 7 |
| 2.3 | Расчёт магнитной проницаемости для стали | 9 |
| 3 | Вывод | 11 |
| | Приложение | 12 |

Цели работы

- Экспериментальное наблюдение явления экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснение роли основных факторов, определяющих степень проникновения поля через экран (свойства материала, толщина его стенок, частота поля);
- 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 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 же случаях, напротив, может возникнуть необходимость принимать специальные меры для борьбы с этим явлением.

1.2 Измерение коэффициента ослабления

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. Поскольку высота и диаметр используемых в работе экранирующих цилиндров одинаковы и весьма малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве λ_0 , наиболее адекватной моделью следует считать сферический слой, который имеет тот же объем внутренней полости и внешний радиус $a \ll \lambda_0$.

Если замкнутая однородная сферическая оболочка помещена в заданное внешнее поле с комплексным вектором напряженности $(H_0)e^{i\omega t}$, которое в ее отсутствие является однородным, то поле в ограничиваемой ею области $(H_1)e^{i\omega t}$ также однородно. Эффективность экранирования удобно характеризовать величиной отношения комплексных ампли-

туд этих полей:

$$\eta_m = H_0/H_1$$

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, σ - проводимость, μ - магнитная проницаемость материала экрана). В двух предельных случаях ($\delta \ll d$ и $\delta \gg d$) выражение для η_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):

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

При $\mu = 1$

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

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

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

При $\mu = 1$

$$\eta_m = 1 + i2ad/3\delta^2 \quad (4)$$

Для приближенных оценок величины $|\eta_m|$ (с точностью $\approx 10\%$) выражения (1)-(4) можно использовать и в промежуточном случае ($\delta \approx d$), разграничивая области применимости формул (1), (2), с одной стороны, и (3), (4), с другой стороны, точкой ($\delta = d$).

1.3 Описание экспериментальной установки

В работе был набор латунных и стальных экранов цилиндрической формы. Внутренние размеры всех цилиндров одинаковы (высота $h = 50$ мм, диаметр основания $D = 50$ мм), а толщина стенок различна (2 мм, 5 мм, 10 мм). Значения проводимости σ и магнитной проницаемости μ латуни и стали приведены ниже:

- Латунь: $\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{17} \text{ c}^{-1}$, $\mu \approx 1$;
- Сталь: $\sigma \approx 0,7 \cdot 10^{17} \text{ c}^{-1}$, $\mu \approx 10^2 - 10^3$ (при $H \sim 10$ эрстед).

Схема измерения коэффициента ослабления магнитного поля изображена на рисунке ниже:

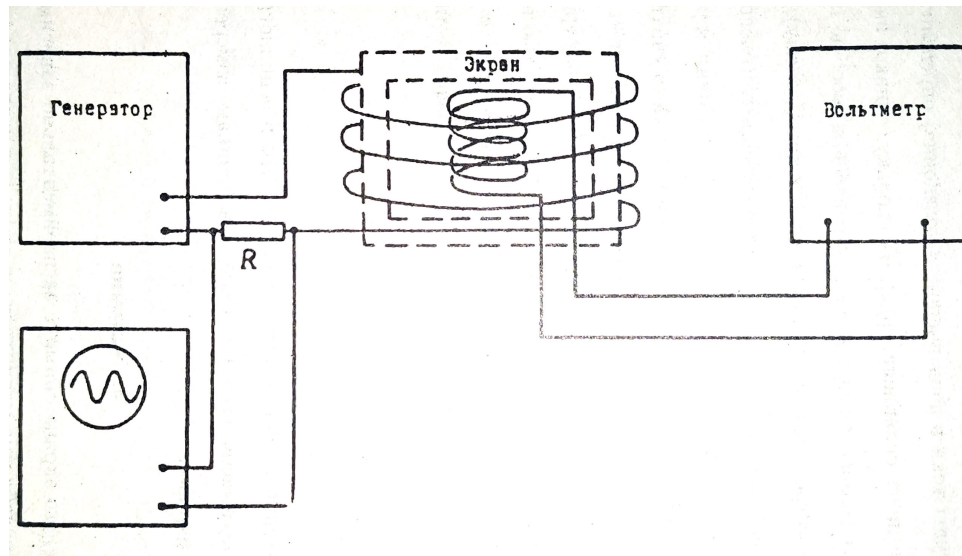


Рис. 1: Схема установки

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 больший (генераторный) соленоид сначала на открытый (неэкранированный) индикатор, а затем на индикатор, закрываемый попеременно различными экранами, и измеряя, как изменяются при этом показания вольтметра, мы могли бы (при неизменности амплитуды тока в цепи внешнего соленоида) определить тем самым коэффициент ослабления $|\eta_m|$. 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 его отсутствие могут быть различными. Это необходимо учитывать при определении величины $|\eta_m|$. В используемой схеме предусмотрено измерение относительных изменений токов как во внутреннем, так и внешнем соленоидах. С этой целью в цепь внешнего соленоида введено сопротивление R , напряжение с которого подается на вертикальный усилитель осциллографа. Величина $|\eta_m|$ должна определяться по формуле:

$$|\eta_m| = \frac{V_0 \cdot U_e}{V_e \cdot U_0} \quad (5)$$

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

2 Практическая часть

2.1 Снятие экспериментальной зависимости коэффициента ослабления $|\eta_m|$

Для цилиндров различной толщины (2 мм, 5 мм, 10 мм) сняли зависимости коэффициента ослабления от частоты согласно методу, описанному в п.1.3. Используя формулу (5) получили следующие результаты:

Латунь

| | | | 2 мм | | | 5 мм | | | 10 мм | | |
|----------|------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|
| f , Гц | V_0 , mV | U_0 , а.е. | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ |
| 20 | 1000 | 2,5 | 920 | 2,48 | 1,07826 | 910 | 2,48 | 1,09011 | 860 | 2,44 | 1,13488 |
| 50 | 1000 | 1,015 | 860 | 1,015 | 1,16279 | 800 | 1 | 1,23153 | 700 | 0,955 | 1,34412 |
| 100 | 1000 | 520 | 800 | 515 | 1,23798 | 680 | 510 | 1,44231 | 500 | 515 | 1,98077 |
| 200 | 1000 | 264 | 660 | 284 | 1,62994 | 500 | 300 | 2,27273 | 340 | 332 | 3,69875 |
| 500 | 1000 | 129 | 540 | 157 | 2,2538 | 330 | 174 | 4,08739 | 200 | 198 | 7,67442 |
| 1000 | 1000 | 92 | 400 | 124 | 3,36957 | 220 | 140 | 6,917 | 100 | 180 | 19,56522 |
| 2000 | 1000 | 88 | 270 | 120 | 5,05051 | 150 | 132 | 10 | 34 | 182 | 60,82888 |
| 5000 | 1000 | 93 | 120 | 125 | 11,20072 | 30 | 147 | 52,68817 | 4 | 204 | 548,3871 |
| 10000 | 1000 | 60 | 57 | 90 | 26,31579 | 7,8 | 106 | 226,49573 | 0,78 | 174 | 3717,94872 |

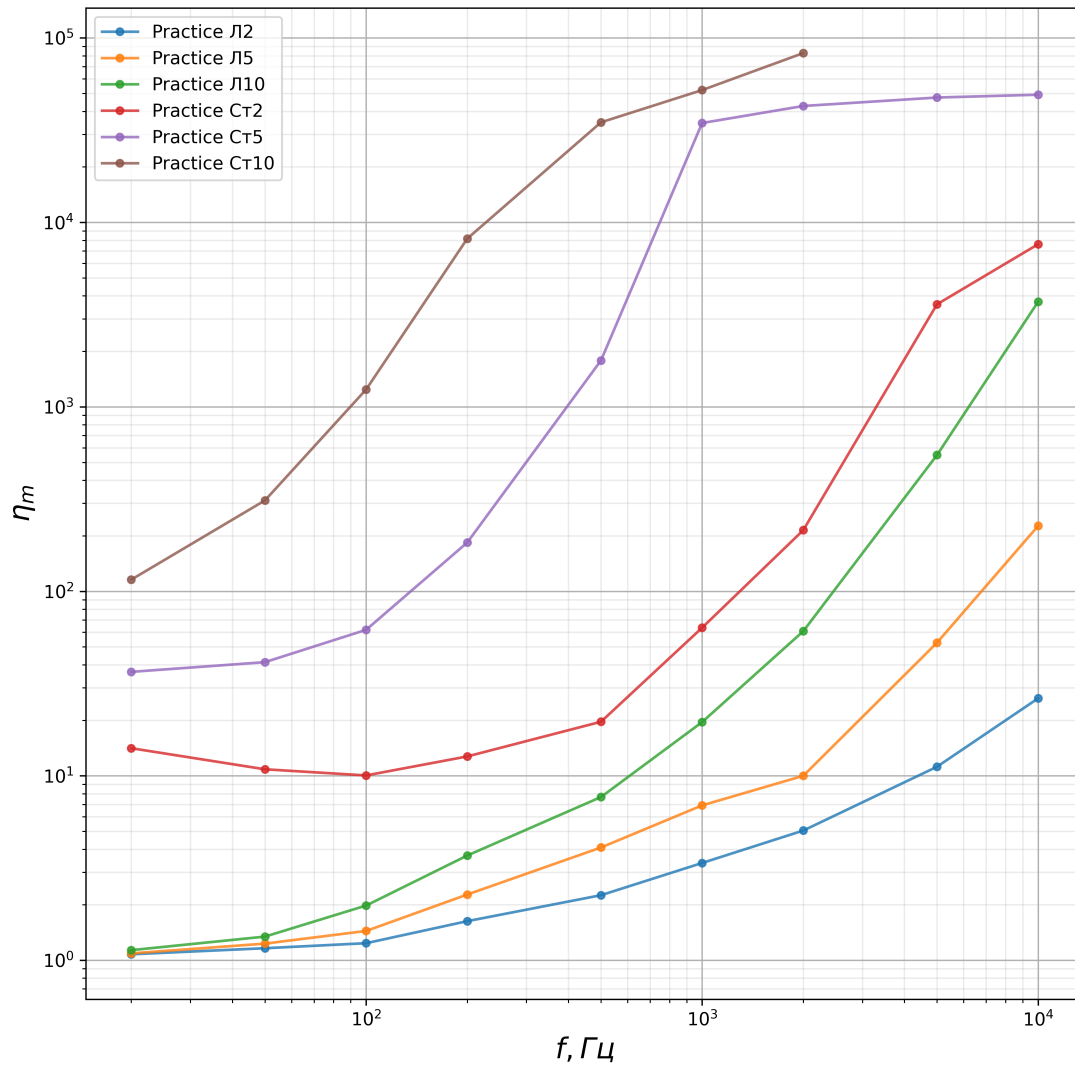
Сталь

| | | | 2 мм | | | 5 мм | | |
|----------|------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|-------------|
| f , Гц | V_0 , mV | U_0 , а.е. | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ |
| 20 | 1000 | 2,5 | 68 | 2,4 | 14,11765 | 26 | 2,38 | 36,61538 |
| 50 | 1000 | 1,015 | 74 | 0,815 | 10,85075 | 18 | 0,755 | 41,32458 |
| 100 | 1000 | 520 | 62 | 324 | 10,04963 | 9,2 | 296 | 61,87291 |
| 200 | 1000 | 264 | 44 | 148 | 12,74105 | 2,8 | 136 | 183,98268 |
| 500 | 1000 | 129 | 30 | 76 | 19,63824 | 0,33 | 76 | 1785,29481 |
| 1000 | 1000 | 92 | 13 | 76 | 63,54515 | 0,022 | 70 | 34584,98024 |
| 2000 | 1000 | 88 | 3,6 | 68 | 214,64646 | 0,017 | 64 | 42780,74866 |
| 5000 | 1000 | 93 | 0,245 | 82 | 3598,8589 | 0,019 | 84 | 47538,20034 |
| 10000 | 1000 | 60 | 0,14 | 64 | 7619,04762 | 0,022 | 65 | 49242,42424 |

| | | | 10 мм | | |
|----------|------------|--------------|------------|--------------|-------------|
| f , Гц | V_0 , mV | U_0 , а.е. | V_e , mV | U_e , а.е. | $ \eta_m $ |
| 20 | 1000 | 2,5 | 8 | 2,315 | 115,75 |
| 50 | 1000 | 1,015 | 2,2 | 0,695 | 311,24048 |
| 100 | 1000 | 520 | 0,39 | 252 | 1242,60355 |
| 200 | 1000 | 272 | 0,054 | 120 | 8169,93464 |
| 500 | 1000 | 129 | 0,014 | 63 | 34883,72093 |
| 1000 | 1000 | 92 | 0,01 | 48 | 52173,91304 |
| 2000 | 1000 | 88 | 0,007 | 51 | 82792,20779 |

При больших частотах амплитуда сигнала на выходе генератора прыгала от одного значения к другому. К тому же появлялись шумы, искажавшие результаты. Поэтому некоторые точки не были вовсе измерены, и некоторые результаты мы не будем учитывать впоследствии.

Полученные результаты представлены на графике ниже:

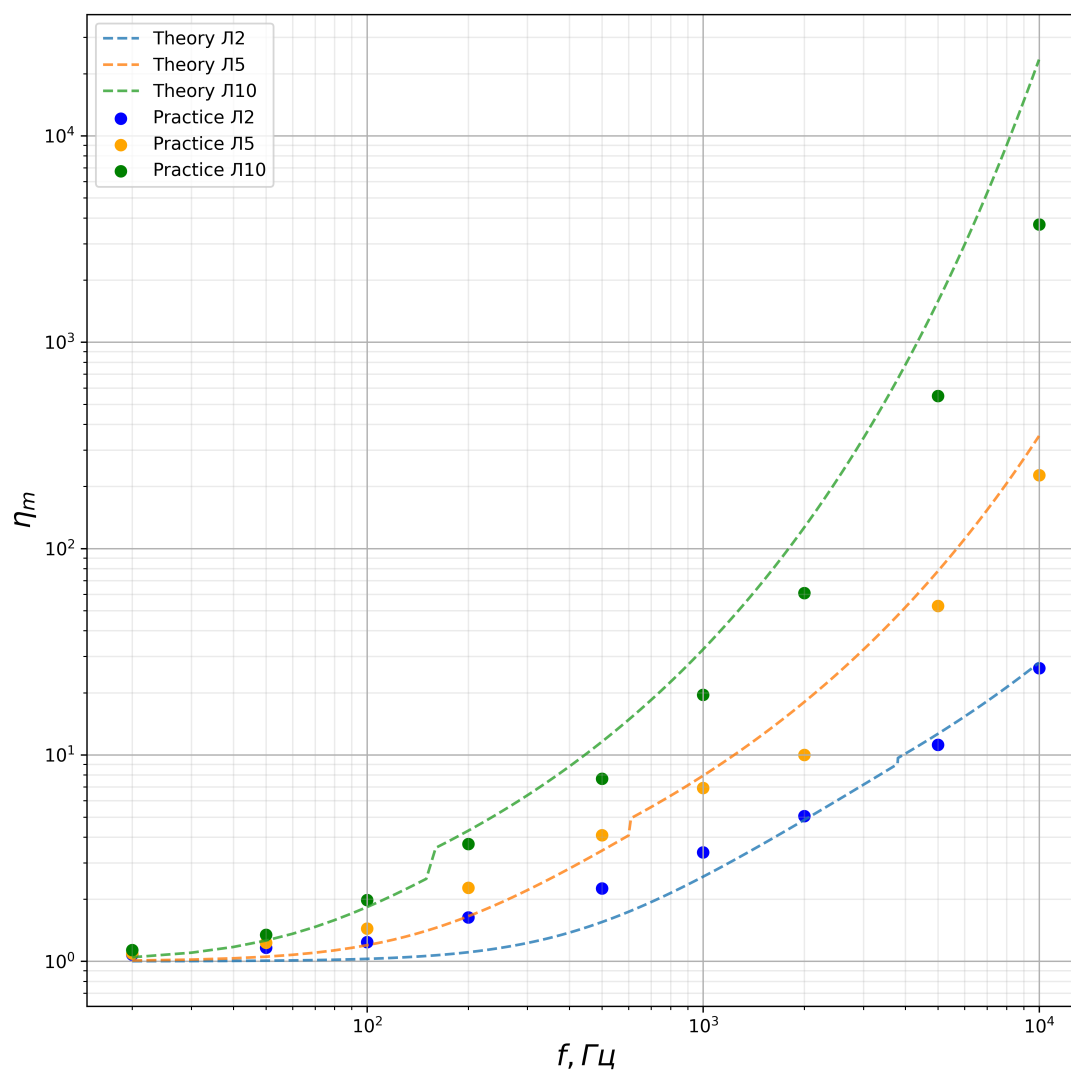


2.2 Сравнение с теоретическими зависимостями

Принимая в качестве модели цилиндрического экрана сферический слой той же толщины d и с тем же объемом внутренней полости $V = (4\pi/3)(a - d)^3 = \pi R^2 h$, построили для исследуемых латунных экранов графики теоретической зависимости $|\eta_m|(f)$ в логарифмическом масштабе. Для случаев $\delta(f) \gg d$ и $\delta(f) \ll d$ из формул (3) и (1) запишем выражения для модуля коэффициента ослабления:

$$\delta \ll d: |\eta_m| = \frac{e^{d/\delta}}{6} \sqrt{\left(\frac{\mu\delta}{a} + 3 + \frac{a}{\mu\delta}\right)^2 + \left(\frac{a}{\mu\delta} - \frac{\mu\delta}{a}\right)^2} \quad (6)$$

$$\delta \gg d: |\eta_m| = \sqrt{\left(1 + \frac{2 \cdot d \cdot (\mu - 1)^2}{3 \cdot a \cdot \mu}\right)^2 + \left(\frac{2ad}{3\mu\delta^2}\right)^2} \quad (7)$$



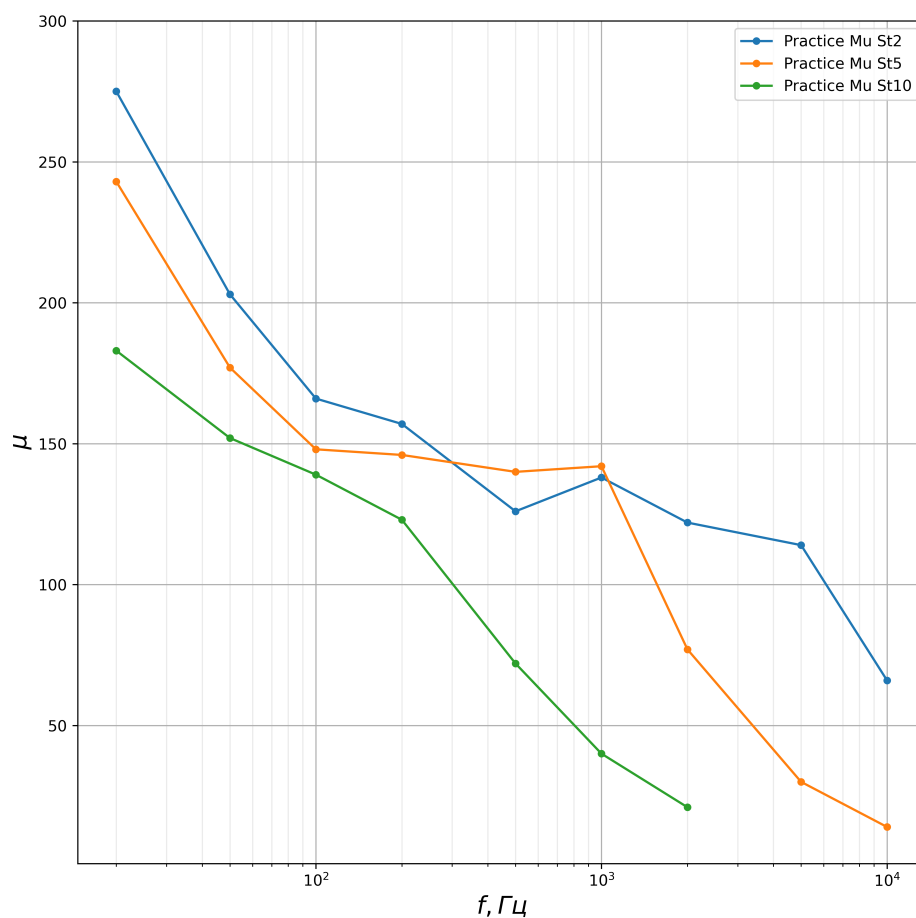
2.3 Расчёт магнитной проницаемости для стали

На основании той же сферической модели для случая $\delta(f) \ll d$ оценим значения магнитной проницаемости стали μ . Для этого возьмём практическое значение $|\eta_m|$ для конкретной частоты (100 - 10000 Гц). Используя теоретическую формулу (6), для различных μ будем сравнивать практическое и теоретическое значение. Фиксируем то значение магнитной проницаемости, который наиболее близко совпадает с практическим.

Код представлен в **Приложении**.

В итоге получили следующие результаты:

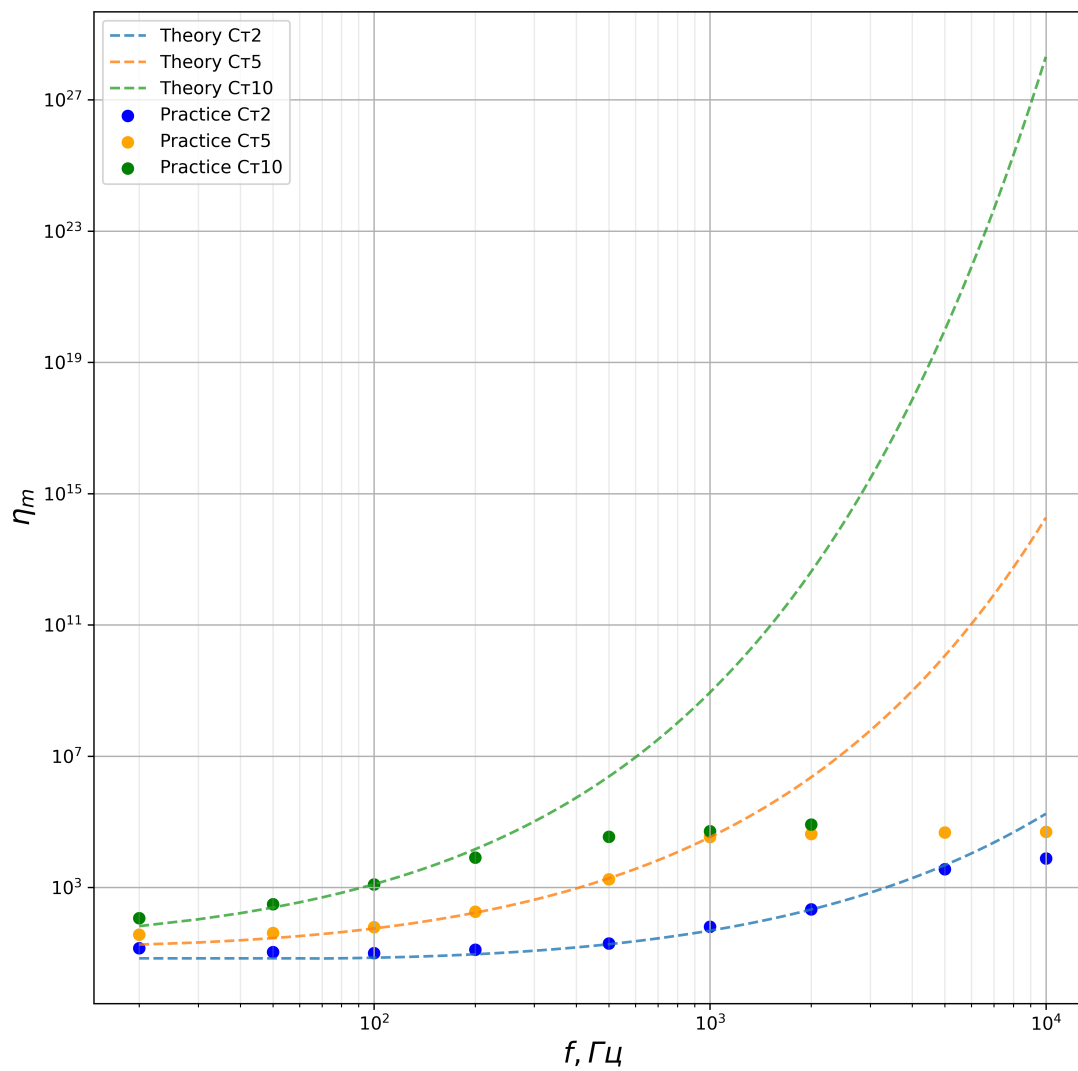
| Образец | f , Гц | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 |
|-------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| Сталь 2 мм | μ | 275 | 203 | 166 | 157 | 126 | 138 | 122 | 114 | 66 |
| Сталь 5 мм | | 243 | 177 | 148 | 146 | 140 | 142 | 77 | 30 | 14 |
| Сталь 10 мм | | 183 | 152 | 139 | 123 | 72 | 40 | 21 | - | |



Например для стали 2 мм при $f = 500$ Гц магнитная проницаемость $\mu = 126$. Для образцов толщиной 5 мм и 10 мм, при частоте $f = 200$ Гц - $\mu = 146$ и 123 соответственно.

Причём видно, что при росте частоты значение магнитной проницаемости уменьшается. Т.е. вещество не успевает отслеживать изменение магнитного поля, поэтому при больших частотах теоретические и практические значения сильно разнятся.

Теоретический график с учетом разных магнитных проницаемостей:



3 Вывод

Выполнив лабораторную работу, мы:

1) Сняли зависимость коэффициента ослабления магнитного поля $|\eta_m|$ от частоты для латунных и стальных экранов разной толщины. Из графиков видно, что коэффициент ослабления для стального цилиндра значительно выше, чем у латунного той же толщины.

2) Построили теоретические зависимости $|\eta_m|$ и сравнили с практическими значениями. По графику видно небольшое расхождение, что связано с приближенной оценкой величины η_m (с точностью $\approx 10\%$) по формулам (1)-(4).

3) Оценили магнитную проницаемость μ стали при различных значениях частоты внешнего поля. По результатам видно, что с ростом частоты μ уменьшается. Это связано с тем, что доменная структура не успевают перестраиваться вслед за полем (вещество не успевает отслеживать изменение магнитного поля).

Приложение

Код для оценки магнитной проницаемости в п.2.3.

```
import sympy as sym
import numpy as np
import math

# Measurement Results
f_list = np.array([20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000])
st2 = np.array([14.11765, 10.85075, 10.04963, 12.74105, 19.63824, 63.54515,
                214.64646, 3598.8589, 7619.04762])
st5 = np.array([36.61538, 41.32458, 61.87291, 183.98268, 1785.29481, 34584.
                98024, 42780.74866, 47538.20034, 49242.42424])
st10 = np.array([115.75, 311.24048, 1242.60355, 8169.93464, 34883.72093, 5
                 2173.91304, 82792.20779])

eta_prac = st2[7]
# Define a function to calculate
def func(mu):
    f = 2000 # Frequency
    d = 0,2 # Sample thickness
    sigma = 0.7 * 10**17
    w = 2 * math.pi * f
    a = D / 2 + d
    delta = c / (2*math.pi*sigma*mu*w) ** (1/2)
    return (sym.exp(d/delta) / 6) * math.sqrt( (mu * delta / a + 3 + (a)
        /(mu*delta) )**2 + (a / (mu*delta) - mu * delta / a )**2 )

mu_list = np.arange(100, 1000, 1) # List for iterating over values
result = list()
for i in range(len(mu_list)):
    eta_teor = func(mu_list[i])
    result.append(abs(eta_teor - eta_prac))

index = result.index(min(result)) # We are looking for the index of
    the minimum discrepancy
print(mu_list[index])
```