

Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.7.1

Скин-эффект

Балдин Виктор

7 декабря 2024 г.

1 Аннотация:

Цель работы:

1. Исследовать явление проникновения переменного магнитного поля в медный полый цилиндр (скин эффект)
2. Измерить проводимость меди 4 разными способами и сравнить их

Методы измерений:

1. По наклону $1/\xi^2$ от квадрата частоты
2. По наклону тангенса сдвига фаз от частоты (при малых частотах)
3. По наклону сдвига фаз от корня частоты (при больших частотах)
4. По наклону функции мин-макс нормализации индуктивности от квадрата частоты

Приборы:

1. Генератор сигналов
2. Соленоид
3. Намотанный на полый цилиндрический каркас
4. Медный экран в виде полого цилиндра
5. Измерительная катушка
6. Амперметр
7. Вольтметр
8. Двухканальный осциллограф
9. RLC-метр

2 Теоретические сведения

2.1 Скин-эффект в тонком полем цилиндре

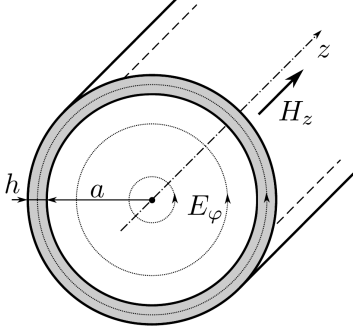


Рис. 1: Эл-магнитные поля в цилиндре

Рассмотрим длинный тонкостенный медный цилиндр. Из соображений симметрии и непрерывности соответствующих компонент векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} можем сказать что:

$$H_z = H(r)e^{i\omega t}, \quad E_\varphi = E(r)e^{i\omega t} \quad (1)$$

и при этом функции $H(r)$ и $E(r)$ непрерывны.

Пусть цилиндр имеет радиус a и толщину стенки $h \ll a$. Это позволяет для описания поля внутри стенки ограничиться только одномерным приближением.

Внутри цилиндра токов нет, следовательно $H(r) = H_1 = \text{const}$ внутри цилиндра. По теореме об электромагнитной индукции в интегральной форме:

$$E_\varphi \cdot 2\pi r = -\mu_0 \pi r^2 \cdot \frac{dH_z}{dt} \rightarrow E(r) = -\frac{1}{2}\mu_0 r \cdot i\omega H_1 \quad (2)$$

откуда мы получаем граничное условие

$$E_1 = E(a) = -\frac{1}{2}i\omega a \mu_0 H_1 \quad (3)$$

Поле внутри тонкой стенки цилиндра описывается уравнением скин-эффекта (Л7.25) в плоской геометрии.

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = i\omega \sigma \mu_0 H \quad (4)$$

Граничные условия: $H_0 = H(0)$, $H_1 = H(h)$

Решением будет:

$$H_1 = \frac{H_0}{\text{ch}(\alpha h) + \frac{1}{2}\alpha a \text{sh}(\alpha h)} \quad \alpha = \sqrt{i\omega \sigma \mu_0} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} e^{i\pi/4} \quad (5)$$

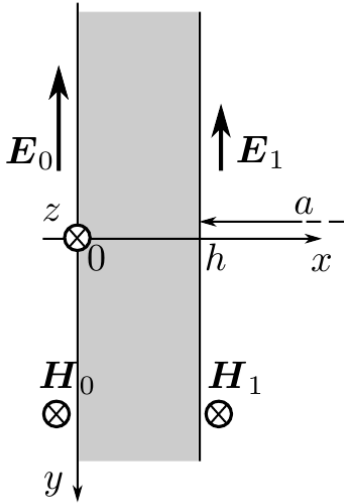


Рис. 2: Стенка цилиндра

Рассмотрим предельные случаи (2):

Малые частоты (от $0.01\nu_h$ до $0.05\nu_h$):

$$\frac{H_1}{H_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}(ah\sigma\mu_0\omega)^2} \quad \xi = \xi_0 \frac{|H_1|}{|H_0|} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\xi^2} = \frac{1}{\xi_0^2} \frac{1}{\left(\frac{|H_1|}{|H_0|}\right)^2} = \frac{1}{\xi_0^2} (1 + (\pi ah\sigma\mu_0\nu)^2) \quad (7)$$

или

$$\text{tg}\psi = \frac{1}{2}ah\omega\sigma\mu_0 \quad (8)$$

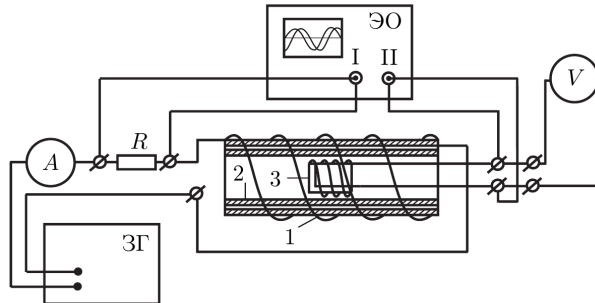
Большие частоты (от $0.05\nu_h$ до $0.5\nu_h$):

$$\psi - \frac{\pi}{4} = h\sqrt{\frac{\omega\sigma\mu_0}{2}} \quad (9)$$

Влияние скин-эффекта на индуктивность катушки:

$$\frac{L_{max} - L}{L - L_{min}} = (\pi a h \mu_0 \sigma \nu)^2 \quad (10)$$

2.2 Оборудование и приборные погрешности



Принцип измерений:

Переменное магнитное поле создаётся с помощью соленоида 1, намотанного на цилиндрический каркас 2. (ЗГ) генерирует синусоидальный сигнал с частотой ν .

Внутри каркаса расположен медный экран 3 в виде пологого цилиндра.

Амперметр А снимает показания действующего силы тока I в цепи соленоида.

Вольтметр V снимает показания действующего напряжения U на измерительной катушке.

Осциллограф (ОЭ) используется для измерения сдвига фаз между током в цепи соленоида и напряжением на измерительной катушке.

Измерительные приборы:

Генератор сигналов АКИП-3420ю

Двухканальный осциллограф GOS-620

Параметры установки:

Диаметр цилиндра $2a = 45$ мм

Толщина стенки цилиндра $h = 1.5$ мм

$\sigma_\nu = 0.01$ Гц (Приборная погрешности)

$\sigma_V = 0.0001$ В (Приборная погрешности)

$\sigma_I = 0.00001$ А (Приборная погрешности)