

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра общей физики

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Часть 3. Электричество и магнетизм

Новосибирск, 1988

4. КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Лабораторная работа 4.4

ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВО

Цель работы - экспериментальное изучение явления проникновения переменного электрического и магнитного полей в проводящее вещество.

Если однородная изотропная среда обладает достаточно хорошей проводимостью σ , такой, что

$$\sigma \gg \omega \epsilon, \quad (1)$$

то переменное электромагнитное поле удовлетворяет в среде /1/, /3/ уравнению

$$\Delta \vec{\Pi} = \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{\Pi}}{\partial t}. \quad (2)$$

В соотношениях (1) и (2) σ , μ , ϵ - проводимость, магнитная и электрическая проницаемость среды соответственно; c - скорость света; вектор $\vec{\Pi}$ может быть заменен любым из следующих векторов: вектором напряженности электрического \vec{E} или магнитного \vec{H} или вектор-потенциалом \vec{A} электромагнитного поля. Подробное обоснование справедливости условия (1) для хороших проводников приведено в работе /6/, задача 312.

Рассмотрим полый бесконечный цилиндр, внутренний радиус которого равен a , толщина стенки h , ($h \ll a$), находящийся в продольном магнитном поле

$$H(t) = H_0 e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

Считая магнитную проницаемость материала цилиндра $\mu = 1$, найдем амплитуду H_1 магнитного поля внутри цилиндра и исследуем ее зависимость от частоты поля ω . Уравнение (2) в этом случае будет иметь вид

$$\Delta H + \kappa^2 H = 0, \quad (4)$$

где $\kappa = (1+i)/\delta$, $\delta = c\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}$ глубина скин-слоя /1/.

Очевидно, что магнитное поле имеет единственную компоненту H_z ; поэтому для упрощения обозначения напряженности магнитного поля индекс z в дальнейшем использоваться не будет.

В силу условия $h \ll a$ при определении поля в стенке цилиндра ее можно считать плоской. С учетом этих обстоятельств будем искать решение уравнения (3) в области $0 \ll x \ll h$ в виде

$$H = A \sin kx + D \cos kx, \quad (5)$$

где A и D - неизвестные постоянные, x - координата, отсчитываемая от наружной стенки цилиндра внутрь, так что граница его внутренней стенки имеет координату $x = h$. Поле H_1 внутри цилиндра однородно, причем

$$H_1 = A \sin kh + D \cos kh. \quad (6)$$

Граничные условия имеют вид $x = 0, H = H_0$, откуда

$$D = H_0. \quad (7)$$

В силу аксиальной симметрии задачи уравнение $\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$ имеет вид

$$(\text{rot } H)_\alpha \equiv -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{4\pi}{c} j_\alpha$$

(α азимутальный угол в цилиндрической системе координат)

Поле E_α находится из уравнения $\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$, так что $E = \frac{i\omega\alpha H_1}{2c}$. Таким образом, при $x = h$

$$\frac{4\pi}{c} \frac{i\omega\alpha H_1}{2c} = - (Ak \cos kh - Dk \sin kh). \quad (8)$$

Используя граничные условия (7), (8), получаем

$$H_1 = \frac{2H_0}{ka \sin kh + 2 \cos kh}. \quad (9)$$

При слабом скин-эффекте $|kh| \ll 1$ и потому $H_1 = H_0$ т.е. наличие цилиндрической оболочки практически не сказывается на величине поля внутри цилиндра. При сильном скин-эффекте $|kh| \gg 1$

$$H_1 = -(1+i) \frac{2\sigma}{a} H_0 e^{-(1-i)\frac{h}{\delta}}, \quad (10)$$

так что $|H_1| \ll |H_0|$ т.е. имеет место сильное экранирование поля.

Подробное обсуждение эффекта экранировки приведено в работе [1]. Задача о проникновении переменного электрического поля в проводящее вещество аналогична рассмотренной выше.

Схема экспериментальной установки для изучения явления проникновения переменного магнитного поля в проводящее вещество изображена на рис. 1.

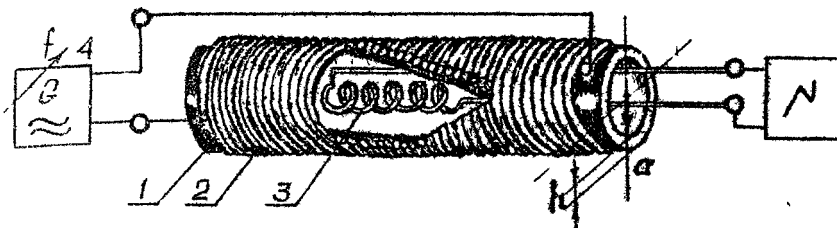


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения явления проникновения переменного магнитного поля в проводящее вещество: 1 -

цилиндрическая металлическая трубка; 2 - обмотка для создания переменного магнитного поля; 3 – измерительная катушка; 4 - генератор, питающий катушку 2

Переменное магнитное поле создается катушкой (2), намотанной на проводящую цилиндрическую трубку (1). Поле, проникающее внутрь трубки, измеряют с помощью катушки (3).

Экспериментальная установка для изучения проникновения переменного электрического поля в проводящее вещество изображена на рис. 2.

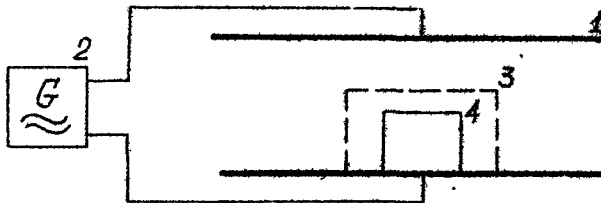


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для изучения явления проникновения переменного электрического поля в проводящее вещество: 1 - пластины конденсатора; 2 - генератор переменного напряжения; 3 - экранирующая коробка; 4 - измеритель электрического поля

Переменное электрическое поле создается генератором (2), между пластинами конденсатора (1). Коробка (3) предназначена для экранировки измерителя электрического поля (4) от воздействия поля конденсатора.

Задания

1. Проведите измерения поля H_1 внутри трубки в зависимости от частоты поля ω для трубок (1), изготовленных из разных материалов. Нарисуйте зависимость $H_1(\omega)$.
2. Зная толщину h стенки трубки и ее внутренний радиус a , рассчитайте проводимость σ материала трубки.
3. Используя двухлучевой осциллограф, измерьте сдвиг фаз между внешним полем H_0 и внутренним полем H_1 . Сравните измеренную величину сдвига фаз с ожидаемой.
4. Измерьте индуктивность обмотки (2) при слабом и сильном скин-эффекте. Оцените индуктивности в этих случаях и сравните измеренные величины с ожидаемыми.
5. Измерьте коэффициент ослабления переменного электрического поля экранирующей коробкой в зависимости от проводимости материала, из которого изготовлена коробка, и от частоты поля.
6. Экспериментально установите влияние щелей в экране на качество экранировки.

Указания и рекомендации

1. Кривая зависимости сигнала с датчика (п. 1 задания) имеет максимум, так как регистрируемый сигнал пропорционален не только амплитуде поля H_1 , но и ω .

2. Начните выполнение п. 5 задания с использования экрана (3) из хорошего проводника при $\omega \rightarrow \infty$. Это позволит зафиксировать нулевое значение поля внутри экрана.

Интернет версия подготовлена на основе издания: Описание лабораторных работ. Часть 3. Электричество и магнетизм. Новосибирск: Изд-во, НГУ, 1988

© Физический факультет НГУ, 2001

© Лаборатория электричества и магнетизма НГУ, 2001, <http://www.phys.nsu.ru/electricity/>