

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  $\sigma$ , 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)  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon$  - 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  $\omega$ . 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

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

( $\alpha$  азимутальный угол в цилиндрической системе координат)

Поле  $E_\alpha$  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.

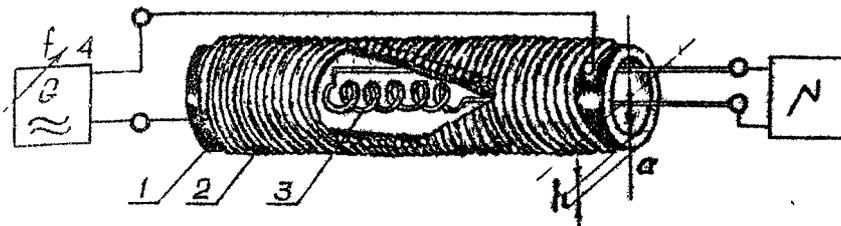


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения явления проникновения переменного магнитного поля в проводящее вещество: 1 -

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.

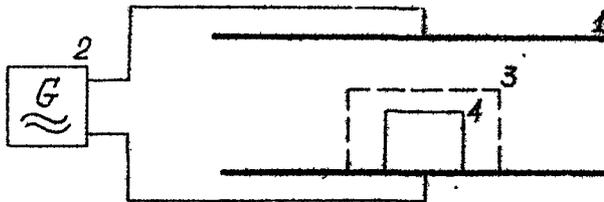


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для изучения явления проникновения переменного электрического поля в проводящее вещество: 1 - пластины конденсатора; 2 - генератор переменного напряжения; 3 - экранирующая коробка; 4 - измеритель электрического поля

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  $\omega$  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  $\sigma$  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  $\omega$ .

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/>