



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

## **Учебно-методическое пособие**

Лабораторная работа Э-36

«Определение магнитной постоянной при  
изучении электромагнитной индукции»  
по дисциплине

**«Физика»**

Авторы  
Шкиль Т. В.,  
Беликова Т. С.,  
Мардасова И. В.

Ростов-на-Дону, 2019

## Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной, заочной формы обучения для всех направлений в учебном плане которых есть дисциплина «Физика»

## Авторы

к.ф.-м.н., Шкиль Т.В.,	доцент	кафедры	«Физика»
к.ф.-м.н., Беликова Т.С.,	доцент	кафедры	«Физика»
к.ф.-м.н., Мардасова И В.	доцент	кафедры	«Физика»



## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Краткая теория .....</b>	<b>4</b>
<b>Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы .....</b>	<b>6</b>
<b>Порядок выполнения работы .....</b>	<b>8</b>
<b>Контрольные вопросы .....</b>	<b>11</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Цель работы:** исследование зависимости эдс электромагнитной индукции от различных факторов; определение магнитной постоянной.

**Оборудование:** соленоид, набор индукционных катушек, базовая установка «Кобра 3» с функциональным генератором, персональный компьютер, соединительные провода, адапторы.

## КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В 1831 г. Фарадей обнаружил, что при изменении магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную замкнутым проводящим контуром, в контуре возникает электрический ток, названный индукционным.

Электромагнитная индукция – явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока  $\Phi$  через площадь, ограниченную этим контуром.

Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через площадку  $dS$  называется скалярная величина, равная

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS,$$

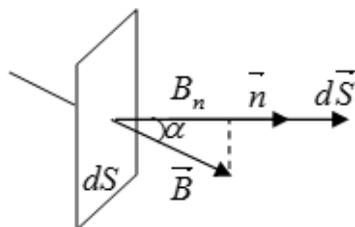


Рис. 1

где  $B_n = B \cos \alpha$  – проекция  $\vec{B}$  на направление нормали  $\vec{n}$  к площадке (рис. 1);  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$ ;  $d\vec{S}$  – направленный элемент поверхности,  $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$ .

Поток вектора магнитной индукции через произвольную поверхность  $S$  определяется формулой

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

Однородным называют магнитное поле, в каждой точке которого вектор  $\vec{B}$  одинаков по величине и направлению. Для однородного поля и для плоской поверхности  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Магнитный поток измеряется в веберах.

Экспериментально было установлено, что величина индукционного тока  $I_i$  не зависит от способа изменения магнитного потока  $\Phi$ , а определяется лишь скоростью его изменения.

Если в контуре протекает ток  $I_i$ , значит, в нем действует эдс,

которая получила название эдс электромагнитной индукции.

*Закон Фарадея:* эдс электромагнитной индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, взятой со знаком «минус»,

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Для однородного поля  $\Phi = BS \cos \alpha$ ,

$$\varepsilon_i = -\frac{d(BS \cos \alpha)}{dt} = -\left( B \frac{dS}{dt} \cos \alpha + \frac{dB}{dt} S \cos \alpha - BS \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt} \right).$$

деформация контура    изменение  $B$     вращение контура

Как видно из полученного выражения, эдс (и индукционный ток) возникает при деформации и вращении контура в магнитном поле или изменении величины  $\vec{B}$ . При экспериментах можно наблюдать эффект, который дает каждое из слагаемых. Знак «минус» имеет принципиальное значение, отражает закон сохранения энергии и соответствует правилу Э.Ленца для нахождения направления индукционного тока.

*Правило Ленца:* индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине, его вызвавшей.

#### *Природа электромагнитной индукции*

1. Если проводник движется в постоянном магнитном поле, возникновение электромагнитной индукции объясняется действием силы Лоренца на заряды внутри проводника (свободные электроны).

2. Если неподвижный замкнутый проводник находится в переменном магнитном поле, сила Лоренца не действует на неподвижные заряды. Максвелл предположил, что переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное вихревое электрическое поле, которое является причиной возникновения  $I_i$  в неподвижном проводнике.

Циркуляция вектора напряженности этого поля  $\vec{E}_i$  по любому неподвижному замкнутому проводящему контуру  $L$  представляет собой  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

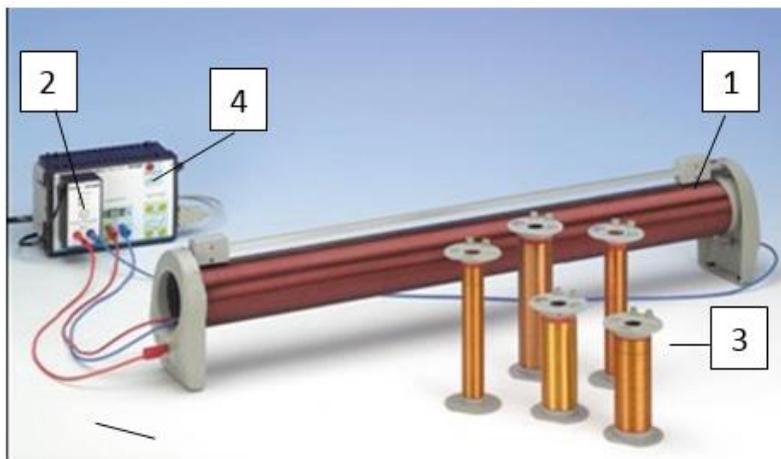


Рис. 2

Обмотка длинного соленоида 1 подключена к генератору переменного тока (function generation) 2, при включении которого через нее течет переменный электрический ток

$$I = I_m \cos \omega t,$$

где  $I_m$  – амплитудное значение силы тока,  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота,  $\nu$  – частота переменного тока.

При этом внутри соленоида возникает однородное магнитное поле, изменяющееся с течением времени:

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 nI_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная,  $n$  – число витков на единице длины соленоида (плотность намотки).

Замкнутым проводящим контуром, в котором возникает эдс электромагнитной индукции  $\varepsilon_i$ , является одна из индукционных катушек 3. Катушка помещается внутри соленоида параллельно его оси (при этом магнитные силовые линии перпендикулярны площади поперечного сечения катушки) и соединяется с аналоговым входом «Analog In2» установки «Кобра 3» 4. Магнитный

поток, пронизывающий катушку, определяется формулой

$$\Phi = BSN = \mu_0 n I_m SN \cos \omega t ,$$

где  $N$  – число витков катушки,  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь ее поперечного сечения,  $d$  – диаметр витка.

Согласно закону Фарадея, при изменении магнитного потока  $\Phi$  через площадь, ограниченную витками катушки, в индукционной катушке возникает эдс электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 n I_m \omega SN \sin \omega t = \varepsilon_{im} \sin \omega t ,$$

где  $\varepsilon_{im} = \mu_0 n I_m \omega SN$  – амплитудное значение эдс.

Электроизмерительные приборы, включенные в цепь переменного тока, показывают действующие значения тока и напряжения ( $I_\delta = I_m / \sqrt{2}$ ,  $U_\delta = U_m / \sqrt{2}$ ), следовательно, для действующих значений  $\varepsilon_{i\delta} = \mu_0 n I_\delta \omega SN$ , где  $I_\delta$  – действующее значение силы тока в соленоиде.

Возбуждаемая в индукционной катушке эдс  $\varepsilon_i$  (фактически равная падению напряжения на этой катушке,  $\varepsilon_i = U$ ), подаётся на вход «Analog In2» установки «Кобра 3», с помощью которой осуществляется передача экспериментальных данных на подключённый к ней персональный компьютер.

В ходе эксперимента на экран компьютера выводятся значения амплитуд силы тока и эдс (обозначенные соответственно  $I$  и  $U_2$ ) и частоты переменного тока  $\nu$ , связанные соотношением

$$U_2 = \mu_0 n I \omega SN = \frac{\mu_0 n I N \pi^2 \nu d^2}{2} . \quad (2)$$

Исследуя зависимости  $U_2 = f(I)$  или  $U_2 = f(\nu)$ , можно определить магнитную постоянную

$$\mu_0 = \frac{2U_2}{n\pi^2 d^2 \nu I} . \quad (3)$$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подключить персональный компьютер (ПК) к базовой установке «Кобра 3»; подключить ПК, «Кобру 3» и функциональный генератор через адапторы к сети; включить ПК.

**Задание 1.** Исследование зависимости эдс электромагнитной индукции от величины индукции магнитного поля.

1. Запустить программу Measure; на рабочем столе выбрать на панели инструментов «Прибор», щёлкнуть левой кнопкой мыши два раза, в появившемся меню активировать «PowerGraph», щёлкнув левой кнопкой. В появившемся окне щёлкнуть на левом прямоугольнике «Function generator».

После этого открывается окно установки параметров.

**Внимание! Изменять только те параметры, которые приводятся ниже.**

2. Установить параметры измерения:

«Режим работы» – изменение амплитуды

«Частота» – 800 Гц

«Начало» – 0

«Конец» – 100 мА

«Размер шага» – 10 мА.

Все три цифровые дисплея должны быть активированы.

3. Закрыть окно, щёлкнув «Да». Щёлкнуть по закладке «Настройки» окна «PowerGraph».

4. В открывшемся окне установить параметры:

«Записывающие каналы» – ток  $I$ ,  $U_2$

«Набор данных» – ток  $I$

«Конечные условия» – ток  $I > 99$ .

5. Закрыть окно – «Далее».

На экране ПК будут отображены значения амплитуд  $I$ ,  $U_2$  и частоты  $\nu$ . Нажать кнопку «Начать измерения».

6. Эксперимент осуществляется в автоматическом режиме и завершается при  $I = 100 \text{ мА}$ . Результаты представляются на мониторе в виде графика  $U_2 = f(I)$ .

7. Таблица результатов измерений выводится на экран при нажатии пиктограммы .

8. Записать полученные результаты в таблицу 1 и закрыть программу измерений.

9. Как следует из формулы (1),

$$B = \mu_0 n I_m \cos \omega t = B_m \cos \omega t ,$$

$$B_m = \mu_0 n I_m - \quad (4)$$

амплитудное значение индукции магнитного поля.

Согласно формуле (2) для амплитудных значений

$$U_2 = \mu_0 n I \omega S N = B_m \omega S N . \quad (5)$$

По данным табл.1 необходимо рассчитать по формуле (4) значения  $B_m$ , занести их в таблицу и построить график зависимости  $U_2 = f(B_m)$ .

10. Проанализировать полученную зависимость на соответствие с формулой (5); сделать вывод.

**Таблица 1**

$n = 485 \frac{1}{м}, \quad \nu = 800 \text{ Гц}, \quad d = \quad \text{м}, \quad N =$					
$I, \text{мА}$	$U_2, \text{мВ}$	$B_m, \text{мТл}$	$\mu_0, \text{Гн/м} \cdot 10^{-7}$	$\Delta\mu_0, \text{Гн/м} \cdot 10^{-7}$	$\delta\mu_0, \%$
0					X
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					
среднее значение					

**Задание 2.** Экспериментальное определение магнитной постоянной.

1. Для последних пяти строк таблицы 1 рассчитать по формуле (3) экспериментальные значения  $\mu_0$ .

2. Рассчитать среднее значение  $\langle \mu_0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_{0i}}{5}$ ,

абсолютные и относительную погрешности:

$$\Delta \mu_{0i} = |\langle \mu_0 \rangle - \mu_{0i}|,$$

$$\langle \Delta \mu_0 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta \mu_{0i}}{5},$$

$$\delta \mu_0 = \frac{\langle \Delta \mu_0 \rangle}{\langle \mu_0 \rangle} \cdot 100\%.$$

3. Записать окончательный результат в виде

$$\mu_0 = \langle \mu_0 \rangle \pm \langle \Delta \mu_0 \rangle.$$

4. Сравнить результат экспериментального определения

$$\mu_0 \text{ с } \mu_{0\text{теор}} = 12,56 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}:$$

$$\delta \mu_{0\text{Г}} = \frac{|\mu_{0\text{теор}} - \langle \mu_0 \rangle|}{\mu_{0\text{теор}}}.$$

**Задание 3.** Исследование зависимости эдс электромагнитной индукции от частоты переменного магнитного поля и экспериментальное определение магнитной постоянной.

1. Выполнить п.1 задания 1.

2. Установить параметры измерения:

«Режим работы» – изменение частоты

«Амплитуда» – 100 мА

«Начало» – 100 Гц

«Конец» – 1000 Гц

«Размер шага» – 100 Гц.

Все три цифровые дисплея должны быть активированы.

3. Закрыть окно, щёлкнув «Да». Щёлкнуть по закладке

«Настройки» окна «PowerGraph».

4. В открывшемся окне установить параметры:

«Записывающие каналы» – частота frg,  $U_2$

«Набор данных» – частота frg

- «Конечные условия» – частота  $\text{frg} > 999$ .
5. Закрыть окно – «Далее».
  6. Эксперимент осуществляется в автоматическом режиме и завершается при  $\nu = 1000 \text{ Гц}$ . Результаты представляются на мониторе в виде графика  $U_2 = f(\nu)$ .
  7. Таблица результатов измерений выводится на экран при нажатии пиктограммы .
  8. Записать полученные результаты в таблицу 2 и закрыть программу измерений.
  9. По данным табл.2 построить график зависимости  $U_2 = f(\nu)$ ; проанализировать полученную зависимость на соответствие с формулой (2); сделать вывод.
  10. Выполнить п.1-4 задания 2.

**Таблица 2**

$n = 485 \frac{1}{\text{м}}, \quad I = 100 \text{ мА}, \quad d = \quad \text{м}, \quad N =$				
$\nu, \text{Гц}$	$U_2, \text{мВ}$	$\mu_0, \text{Гн/м} \cdot 10^{-7}$	$\Delta\mu_0, \text{Гн/м} \cdot 10^{-7}$	$\delta\mu_0, \%$
100				X
200				
300				
400				
500				
600				
700				
800				
900				
1000				
среднее значение				

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитный поток? Запишите соответствующую формулу.  
В каких единицах он измеряется?
2. Какое магнитное поле называется однородным?
3. Какой формулой выражается магнитный поток для однородного поля?

4. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
5. Запишите и сформулируйте закон Фарадея для электромагнитной индукции.
6. Какими причинами может быть вызвано возникновение ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре?
7. Сформулируйте правило Ленца.
8. Какова природа индукционного тока в проводящем контуре?