

# РАБОТА 14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### (магнитный поток, самоиндукция, индуктивность)

*Цель работы:* Ознакомление с методикой измерения индукции магнитного поля, исследование магнитного поля в плоскости кругового тока, экспериментальное определение магнитного потока и индуктивности.

*Приборы и принадлежности:* лабораторный макет установки для исследования магнитного поля кругового тока (рис. 1).

В работе используется планшет (1), с нанесенной на него координатной сеткой. На планшете установлено кольцо (2), внутри которого медным проводом намотана катушка.

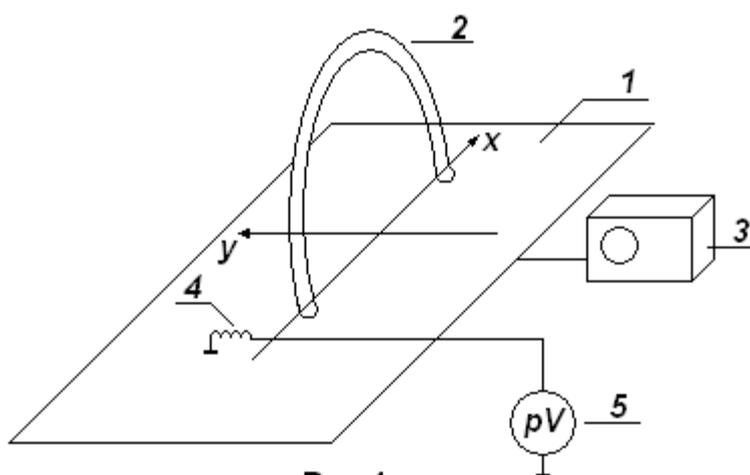


Рис 1

Кольцевая катушка (2) подключена к генератору (3), индукция магнитного поля, созданного током, протекающим в катушке (2), измеряется в разных точках планшета катушкой-датчиком (4), подключенной к измерительной схеме (5). В процессе измерения исследователь поворачивает датчик (4) в горизонтальной плоскости, добываясь максимальных показаний вольтметра измерительной схемы. На корпусе датчика (4) нанесена стрелка, направление которой совпадает с осью катушки.

Помещая датчик в различные точки планшета, и, измеряя индукцию магнитного поля в данной точке, можно построить картину исследуемого поля.

#### Исследуемые закономерности

*Магнитное поле кругового тока.* Индукция магнитного поля, создаваемого током, протекающим в проводнике произвольной формы, в общем случае, может быть рассчитана с помощью закона Био – Савара – Лапласа

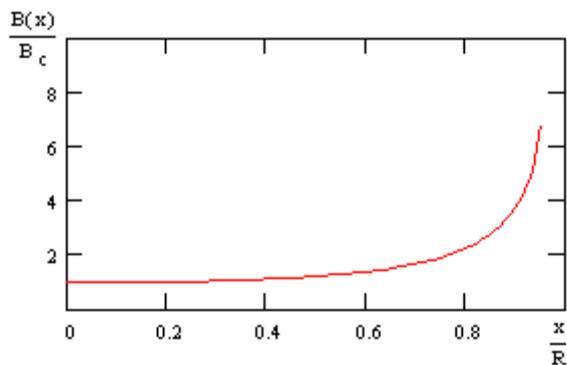


Рис. 2

где R – радиус кругового тока, I – сила тока, N – число витков в катушке.

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \left(\frac{\mathbf{r}}{r}\right)}{r^2}.$$

Соответствующий расчет индукции магнитного поля на оси кругового тока (вдоль оси y на рис. 1) приводит к выражению

$$B_y = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{NIR^2}{\sqrt{(R^2 + y^2)^3}}, \quad (1)$$

Поле в плоскости витка симметрично относительно оси кругового тока. Вектор индукции поля перпендикулярен плоскости витка (также направлен вдоль оси  $y$ ). Рис. 2 иллюстрирует результаты расчета индукции магнитного поля в пределах круга, ограниченного витком радиуса  $R$ .

*Магнитный поток.* Соображения симметрии позволяют построить качественно картину магнитного поля, создаваемого круговым током. Напомним, что линиями индукции магнитного поля являются линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с направлением вектора индукции магнитного поля в этой точке, а густота линий пропорциональна значению величины магнитной индукции. Картину магнитного поля на плоскости можно наблюдать визуально, если на плоский немагнитный лист насыпать мелкие железные опилки.

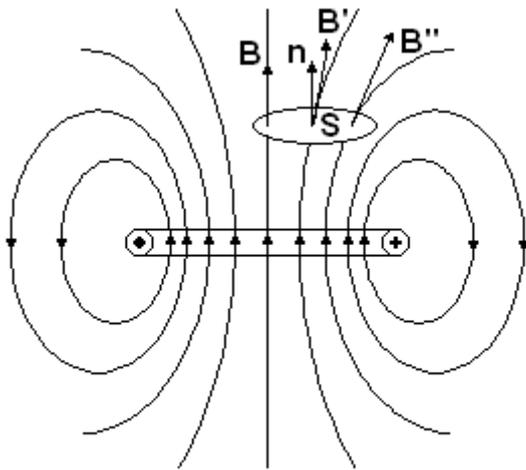


Рис. 3

Магнитным потоком называют физическую величину, определением которой следует считать выражение

$$d\Phi = \mathbf{B}d\mathbf{S},$$

из которого следует

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{B}\mathbf{n}dS = \int_S BdS \cos(\mathbf{B}\mathbf{n}) = \int_S B_n dS, \quad (2)$$

(см. рис. 3). Единицей магнитного потока в СИ

служит 1 Вебер (Вб).

Поскольку магнитное поле является вихревым, то магнитный поток через произвольную замкнутую поверхность равен нулю. Это фундаментальное свойство выражается интегральным соотношением

$$\oint_S \mathbf{B}d\mathbf{S} = 0, \quad (3)$$

которое является одним из уравнений Максвелла.

Изменение во времени магнитного потока приводит к возникновению вихревого электрического поля. Если магнитный поток охвачен проводящим контуром, в последнем индуцируется электродвижущая сила

$$E = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (4)$$

где  $\Psi$  - магнитный поток, «сцепленный» с проводящим контуром, т.е. - магнитный поток, усредненный по всем поверхностям, опирающимся на линии тока в контуре. В простейшем случае для контура, состоящего из  $N$  витков, это означает

$$\Psi = N\Phi.$$

*Индуктивность.* Индуктивность ( $L$ ) называют также коэффициентом самоиндукции, поскольку эта величина определяет электродвижущую силу самоиндукции в контуре при изменении силы тока в нем.

$$E_{\text{н\acute{e}}} = -L\frac{dI}{dt}. \quad (5)$$

Выражение (4) часто называют динамическим определением индуктивности. Во всех случаях считается, что магнитный поток, сцепленный с контуром, пропорционален силе тока в этом контуре. Из выражений (4) и (5) следует, таким образом, статическое определение индуктивности.

$$\Psi = LI. \quad (6)$$

В известном смысле индуктивность характеризует энергию, запасенную в контуре, при прохождении через него тока. Соответствующее выражение

$$W_m = \frac{LI^2}{2} \quad (7)$$

называют энергетическим определением индуктивности.

*Измерение индукции магнитного поля.* Процесс измерения значений индукции магнитного поля основан на использовании явления электромагнитной индукции

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

Поскольку катушка, создающая исследуемое магнитное поле, питается переменным током частоты  $f$ , то

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f B S w, \quad (8)$$

где  $S$  – эффективная площадь сечения катушки датчика,  $w$  – число витков катушки датчика.

### Указания по выполнению наблюдений

1. Включить генератор, питающий катушку кругового тока, измерить силу тока, протекающего в катушке. Поместить катушку-датчик в центр витка, измерить максимальное напряжение, индуцированное в катушке. Пользуясь выражением (1) и параметрами макета, указанными на панели установки, вычислить значение индукции магнитного поля в центре витка и определить масштабный коэффициент (Тл/В) для данного макета. Здесь и далее координаты датчика определять по положению центра его проекции на плоскость планшета.
2. Измерить распределение индукции магнитного поля в плоскости витка. Для этого, перемещая датчик по радиусу витка от центра к токоведущей обмотке в обе стороны, измерять максимальные значения индуцированного напряжения в точках, лежащих на радиусе витка, на расстояниях примерно 0.5 см одна от другой.
3. Выбрав на планшете произвольным образом расположенный отрезок прямой длиной около 5 см, измерить на этом отрезке в 10 точках на равных расстояниях значения проекций индукции магнитного поля на нормаль к этому отрезку.

### Задание на подготовку к работе:

1. Выполните индивидуальное домашнее задание.
2. Изучите описание лабораторной работы.
3. Запишите расчетную формулу для определения масштабного коэффициента.
4. Выведите формулы для определения проекций и результирующих величин индукции магнитного поля во всех характерных областях, где будут проводиться измерения.
5. Выведите формулы для определения погрешностей проекций индукции магнитного поля и ее результирующих величин, основываясь на величинах инструментальных погрешностей измерения индуцированного напряжения и координат.
6. Подготовьте бланк Протокола наблюдений, основываясь на содержании раздела «Указания по проведению наблюдений», разработайте и внесите в бланк Протокола наблюдений таблицы для записи результатов измерений, описанных в пунктах 1 - 5.

### Задание по обработке результатов:

1. По данным таблиц наблюдений определите значения индукции магнитного поля в точках, где проводились измерения (пункты 2, 3).
2. Нанесите на график, используя те же оси, что и на рис. 2, ход изменения индукции магнитного поля в плоскости витка (только экспериментальные точки). Воспользо-

вавшись рис. 2 и параметрами установки, нанесите на этот же график рассчитанные кривые. Сравните полученные результаты.

3. Рассчитайте, используя результаты измерений п. 2, магнитный поток, сцепленный с исследуемым круговым током. Определите индуктивность катушки кругового тока.
4. Рассчитайте электродвижущую силу самоиндукции в исследуемом контуре.
5. Изменяя положение датчика по вертикали на небольшую (не более 1 см) высоту, можно заметить, что магнитная индукция при таких перемещениях практически не изменяется. Таким образом, отрезок прямой, выбранный в п. 3 раздела «Указаний по выполнению наблюдений», можно считать нижней стороной прямоугольника высотой 1 см, расположенного перпендикулярно планшету лабораторного макета. Воспользовавшись результатами измерений п. 3, вычислить значение магнитного потока через указанную прямоугольную площадку.
6. Начертите на листе миллиметровой бумаги формата А4 эскиз установки с проекцией на его плоскость катушки кругового витка и осями координат. Нанесите на чертеж несколько векторов индукции магнитного поля (6 – 8 точек в каждой области, где проводились измерения).
7. Рассчитайте для выбранных векторов индукции погрешности их модулей, запишите полученные результаты в стандартном виде на чертеже, рядом с соответствующим вектором.
8. Сформулируйте выводы по проведенному исследованию.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой вывод следует из равенства нулю магнитного потока через замкнутую поверхность?
2. Сформулируйте закон индукции.