

**Кафедра физики**

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.5**

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ**

**Минск 2022**

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### Цель работы:

1. Ознакомиться с одним из методов измерения индукции магнитного поля.
2. Проверить теорему Гаусса для поля вектора  $\vec{B}$ .
3. Проверить теорему о циркуляции вектора  $\vec{B}$ .

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Две интегральные теоремы магнитного поля связаны с двумя важнейшими математическими характеристиками всех векторных полей: *поток* и *циркуляцией*.

*Циркуляцией* вектора  $\vec{B}$  по произвольному замкнутому контуру  $L$  называется интеграл

$$\oint_{(L)} (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint_{(L)} B dl \cos \alpha = \oint_{(L)} B_{\tau} dl, \quad (1)$$

где  $B_{\tau}$  – проекция вектора  $\vec{B}$  на направление элементарного перемещения  $d\vec{l}$  вдоль контура  $L$  в данной точке поля;  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$  (рис. 1);  $d\vec{l} = dl \vec{\tau}$ ; где  $\vec{\tau}$  – единичный вектор касательной к контуру в заданном направлении (рис. 2). Циркуляция является скаляром.

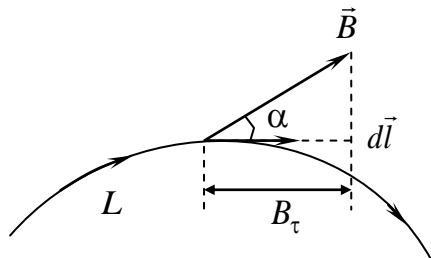


Рис. 1

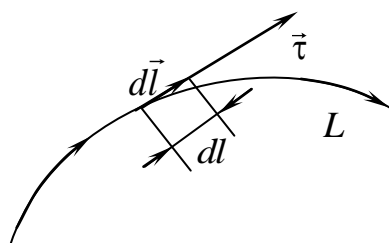


Рис. 2

*Теорема о циркуляции вектора  $\vec{B}$* : Циркуляция вектора  $\vec{B}$  по произвольному замкнутому контуру  $L$  равна произведению  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охваченных контуром  $L$ :

$$\oint_{(L)} (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 \sum_{j=1}^N I_j. \quad (2)$$

Ток считается положительным, если его направление связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта (рис. 3).

Приближенное значение интеграла  $\oint_{(L)} (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint_{(L)} B_{\tau} dl$  можно вычислить,

переходя к суммированию по конечному числу отрезков  $\Delta l_i$ , на которые разбивается замкнутый контур  $L$ :

$$\oint_{(L)} B_{\tau} dl \approx \sum_{i=1}^N B_{\tau_i} \Delta l_i \approx \Delta l (B_{\tau_1} + B_{\tau_2} + \dots + B_{\tau_N}). \quad (3)$$

Таким образом, теорема о циркуляции вектора  $\vec{B}$  для токов проводимости приближенно может быть записана в виде

$$\sum_{i=1}^N B_{\tau} \Delta l_i \approx \mu_0 \sum_{j=1}^N I_j. \quad (4)$$

Поток  $\Phi$  вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через произвольную поверхность  $S$  определяется интегралом

$$\int_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = \int_{(S)} B dS \cos \beta = \int_{(S)} B_n dS \quad (5)$$

где  $\beta$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{S}$ ;  $B_n$  – проекция вектора  $\vec{B}$  на нормаль к поверхности  $S$ .

Направление вектора  $d\vec{S}$  совпадает с направлением вектора нормали  $\vec{n}$  к поверхности  $dS$  (рис. 4):  $d\vec{S} = dS \vec{n}$ ; где  $dS$  – площадь элементарной поверхности, в пределах которой  $\vec{B} = \text{const}$ .

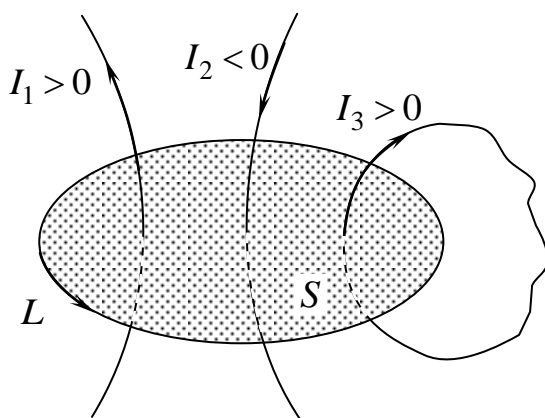


Рис. 3

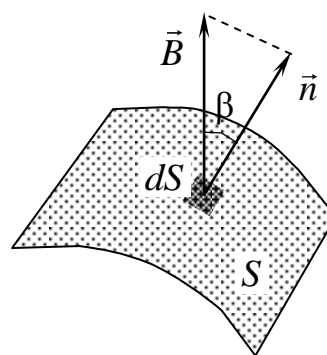


Рис. 4

Поток является скаляром. В СИ магнитный поток измеряется в *веберах* (Вб):

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}. \quad (6)$$

Теорема Гаусса для поля вектора  $\vec{B}$ : *магнитный поток через любую замкнутую поверхность  $S$  равен нулю:*

$$\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (7)$$

В случае замкнутой поверхности, т.е. поверхности, ограничивающей некоторый объем, за положительное направление нормали обычно выбирают внешнюю нормаль (рис. 5).

## Методическое обоснование работы

Для проверки теоремы Гаусса целесообразно выбрать замкнутую поверхность площадью  $S$  произвольной формы, но заведомо такой, чтобы в ее пределах векторы  $\vec{B}$  лежали в параллельных плоскостях (рис. 5).

Магнитный поток через замкнутую поверхность можно представить в виде суммы потоков через боковую  $S_6$  и торцовые поверхности  $S_1$  и  $S_2$ .

Для упрощения измерений поверхности  $S_1$  и  $S_2$  следует ориентировать параллельно векторам  $\vec{B}$ . Тогда во всех точках этих поверхностей угол  $\beta = \pi/2$  и потоки магнитной индукции сквозь торцовые поверхности будут равны нулю (см. рис. 5).

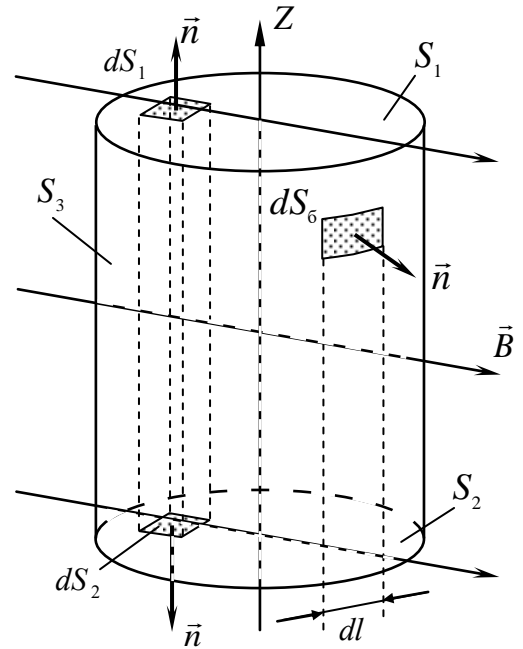


Рис.5

$$\oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = \int_{(S_6)} \vec{B} d\vec{S} + \int_{(S_1)} \vec{B} d\vec{S} + \int_{(S_2)} \vec{B} d\vec{S} \quad (8)$$

Интеграл  $\int_{(S_6)} \vec{B} d\vec{S} = \int_{(S_6)} B_n dS$  приближенно можно представить в виде суммы

$$\int_{(S_6)} B_n dS \approx \sum_{k=1}^K B_{n_k} \Delta S_k \approx \Delta S (B_{n_1} + B_{n_2} + \dots + B_{n_K}). \quad (9)$$

В соответствии с теоремой Гаусса для поля вектора  $\vec{B}$  эта величина должна быть равна нулю:

$$\sum_{k=1}^K B_{n_k} \Delta S_k \approx 0. \quad (10)$$

В работе экспериментально изучаются теорема Гаусса для магнитного поля и закон полного тока.

Для измерения величины вектора магнитной индукции в работе применяется метод, основанный на явлении электромагнитной индукции.

Функциональная схема установки изображена на рис. 6. Установка состоит из кольцевого проводочного проводника  $L_1$ , укрепленного на подставке, и небольшой проводочной катушки  $L_2$ , помещенной в зонд и соединенной с измерительной системой. В измерительную систему входят преобразователь (П) и измерительный прибор (ИП). Диаметр  $d$  измерительной катушки  $L_2$  намного меньше диаметра  $D$  кольцевого проводника  $L_1$ . Измерительная катушка жестко закреплена внутри зонда и подключена к измерительному прибору.

На поверхности зонда параллельно оси катушки  $L_2$  нанесена стрелка.

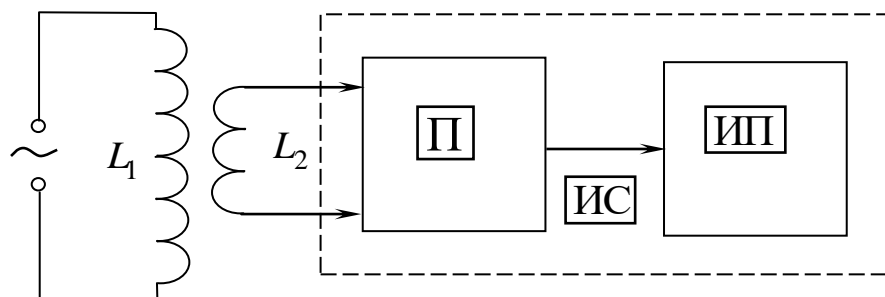


Рис. 6

Кольцевой проводник питается от сети через понижающий трансформатор. Индукция магнитного поля, созданного этим проводником, меняется со временем по закону  $\vec{B} = \vec{B}_0 \cos(\omega t)$ .

В зонде при этом наводится ЭДС и возникает индукционный ток, который идет в измерительную систему. Величина выходного напряжения  $U$  пропорциональна значению величины  $B$  и определяется по отсчетному устройству измерительного прибора:

$$U = k B, \quad (11)$$

где  $k$  – калибровочный коэффициент, учитывающий геометрию датчика, частоту тока и характеристики измерительного преобразователя.

Для проверки теорем выбирают контуры произвольной длины и формы, как охватывающие, так и не охватывающие токи, лежащие в плоскости, перпендикулярной плоскости кольцевого проводника и проходящей через его диаметр (рис. 8).

Выбранный контур делится точками на одинаковые участки  $\Delta l$  (рис. 7). Измерения величины магнитной индукции производятся в середине каждого участка. При проверке теоремы Гаусса зонд ориентируется таким образом, чтобы направление стрелки на нем совпало с направлением нормали  $\vec{n}$  к участку контура, а при изучении теоремы о циркуляции вектора  $\vec{B}$  – с направлением касательной  $\vec{\tau}$  к контуру в направлении его обхода, которое выбирается произвольно.

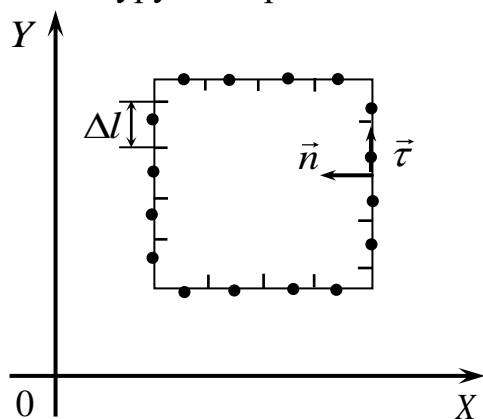


Рис. 7

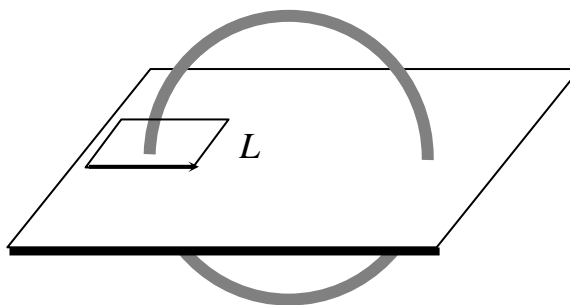


Рис. 8

## Задание

1. Проверить теорему Гаусса поля вектора  $\vec{B}$  для произвольных контуров, охватывающих и не охватывающих токи:

а) выбрать два контура произвольной формы: охватывающий и не охватывающий токи. Зонд при измерениях ориентировать таким образом, чтобы направление стрелки совпадало с направлением внешней нормали  $\vec{n}$  к участку контура (см. рис. 7). Производить считывание результатов измерений при каждом перемещении зонда вдоль контура. Результаты измерений занести в табл. 1;

б) подсчитать сумму  $\sum_{i=1}^k B_{ni} \Delta l_i$ ;

в) проанализировать полученные результаты.

2. Проверить справедливость теоремы о циркуляции вектора  $\vec{B}$ :

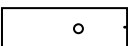

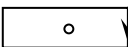
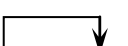
а) измерения производить для тех же контуров, что и в п. 1. Зонд при измерениях ориентировать таким образом, чтобы направление стрелки совпадало с направлением касательной  $\vec{\tau}$  к участку контура. Производить считывание результатов измерений при каждом перемещении зонда вдоль контура. Результаты измерений занести в табл. 1;

б) подсчитать сумму  $\sum_{i=1}^k B_{ni} \Delta l_i$  и сравнить ее с суммарным током, охватыва-

емым соответствующим контуром  $\mu_0 \sum_{j=1}^N I_j$ , где  $N$  – количество витков в кольцевом проводнике;

в) проанализировать полученные результаты.

Таблица 1

 $U, \text{ мВ}$	
 $U, \text{ мВ}$	
 $U, \text{ мВ}$	
 $U, \text{ мВ}$	

## Содержание отчета

1. Формулировка цели работы.
2. Приборы и принадлежности, используемые в процессе выполнения работы (в виде таблицы).
3. Схема используемой установки.
4. Рабочие формулы и формулы расчета погрешности измерений.
5. Результаты измерений и расчетов (в виде таблиц).
6. Графический материал, полученный в результате проведенных измерений и расчетов.
7. Выводы по работе, окончательные результаты.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как подсчитать магнитный поток через некоторую поверхность?
2. Указать способы изменения потока.
3. Чему равен поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность?
4. Дать определение единицы магнитного потока.
5. Сформулировать теорему о циркуляции вектора  $\vec{B}$  и записать ее математическое выражение.
- ~~6. Объяснить, изменится ли циркуляция вектора магнитной индукции по контуру, охватывающему проводник с током, если:~~
  - ~~а) добавить ток за пределами контура;~~
  - ~~б) деформировать контур?~~
- ~~7. Обосновать справедливость метода, использованного в данной лабораторной работе для проверки законов магнитного поля.~~
- ~~8. Какой способ измерения индукции магнитного поля используется в данной лабораторной работе?~~
9. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
10. Записать основной закон электромагнитной индукции – закон Фарадея.
- ~~11. В чем причина возникновения ЭДС индукции в измерительной катушке  $L_2$  зонда?~~

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов, И. Е. Основные законы электромагнетизма / И. Е. Иродов. – М. : Высш. шк., 1983.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм/ И. В. Савельев. – М. : Астрель: АСТ, 2004.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: – в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, МФТИ, 2002 – 2005. – 5 т.
4. Электромагнетизм : лаб. практикум по курсу «Физика» / М. С. Сергеева-Некрасова [и др.]; под общ. ред. В. И. Мурзова, – Минск : БГУИР, 2011.