

Работа №

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНТНОГО ПОЛЯ

Целью работы является измерение индукции магнитного поля прямого и кругового токов. Для бесконечно длинного прямого проводника с током I индукция магнитного поля на расстоянии r от оси проводника легко определяется при помощи теоремы о циркуляции вектора \mathbf{B} :

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot I. \quad (1)$$

Из соображений симметрии следует, что силовые линии поля в этом случае должны представлять собой окружности с центрами на оси проводника (рис.1). Поэтому контур интегрирования в теореме о циркуляции (показан пунктиром на рис.1) удобно выбрать совпадающим с силовой линией, проходящей через точку на расстоянии r от оси проводника, в которой требуется найти индукцию. Модуль вектора \mathbf{B} будет на таком контуре постоянным, а его направление будет совпадать с направлением элемента $d\vec{l}$ в любой точке контура. Тогда можно записать

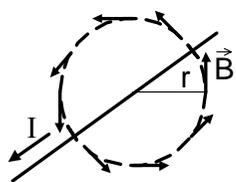


Рис. 1

и из соотношения

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \oint B dl = B \oint dl = B \cdot 2\pi r, \quad (2)$$

получается, что

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot I \quad (3)$$

получается, что

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}. \quad (4)$$

Индукция магнитного поля на оси кольцевого проводника с током I находится из закона Био-Савара:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (5)$$

где $d\vec{B}$ – вектор индукции, создаваемый элементом $d\vec{l}$ проводника, направленным вдоль тока, а \vec{r} – вектор с началом на этом элементе и концом в точке, где определяется индукция поля (рис. 2).

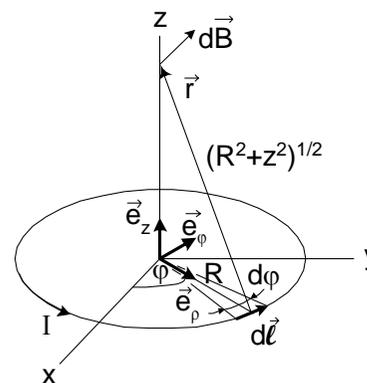


Рис. 2

Поскольку рассматриваемый случай обладает осевой симметрией, задачу целесообразно решать в цилиндрической системе координат, орты которой показаны на рис.2. Разлагая векторы $d\vec{l}$ и \vec{r} на составляющие вдоль соответствующих ортов, будем иметь

$$d\vec{l} = R \cdot d\varphi \cdot \vec{e}_\varphi, \quad (6)$$

$$\vec{r} = -R \cdot \vec{e}_\rho + z \cdot \vec{e}_z, \quad (7)$$

и тогда их векторное произведение представится, как

$$[d\vec{l}, \vec{r}] = R \cdot d\varphi \cdot z \cdot \vec{e}_\rho + R^2 \cdot d\varphi \cdot \vec{e}_z. \quad (8)$$

В соответствии с принципом суперпозиции индукция магнитного поля в точке с координатой $(0,0,z)$ является векторной суммой индукции полей, создаваемых всеми элементами кольца с током I , каждый из которых находится на расстоянии $r = (R^2 + z^2)^{1/2}$ от этой точки. Для определения суммарной индукции возьмем интеграл по $d\vec{B}$ по всему контуру:

$$\vec{B} = \oint d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi} [R \cdot \vec{e}_\rho + R^2 \cdot \vec{e}_z] d\varphi. \quad (9)$$

Орт \vec{e}_z не зависит от угла φ , а зависящий от угла орт \vec{e}_ρ можно выразить через неподвижные орты декартовой системы:

$$\vec{e}_\rho = \vec{i} \cos \varphi + \vec{j} \sin \varphi. \quad (10)$$

При интегрировании косинуса и синуса по периоду получается ноль и, таким образом, индукция поля определяется только интегралом от второго слагаемого в (9). Беря интеграл, получим

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot 2\pi \cdot \vec{e}_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \cdot \vec{e}_z. \quad (11)$$

Приборы и оборудование

В работе используется источник питания, имеющий две ручки регулировки – для изменения выходного напряжения и тока. Установленные значения напряжения и тока указываются на цифровых индикаторах. Погрешность индикатора напряжения составляет ± 0.24 В, индикатора тока – ± 0.4 А. Измерение индукции поля производится датчиками, подключаемыми к магнитометру (тесламетру). Работа датчиков основана на эффекте Холла. При помещении плоского проводника толщины d с током I в магнитное поле, перпендикулярное направлению протекания тока, на противоположных гранях проводника возникает разность потенциалов, равная

$$U_H = \frac{1}{n \cdot e} \frac{B \cdot I}{d}, \quad (12)$$

где n – концентрация носителей тока, e – элементарный заряд, B – модуль вектора индукции. Эффект объясняется отклонением движущихся носителей тока под действием силы Лоренца F_L (см. рис. 3). Возникающее при этом разделение зарядов продолжается до тех пор, пока сила, действующая на движущиеся заряды со стороны магнитного поля, не будет скомпенсирована силой F_E , обусловленной электрическим полем, которое создается разделенными зарядами. Этому полю соответствует разность потенциалов U_H . Поскольку согласно (12) разность потенциалов U_H прямо пропорциональна B , ее измерение дает информацию об индукции магнитного поля.

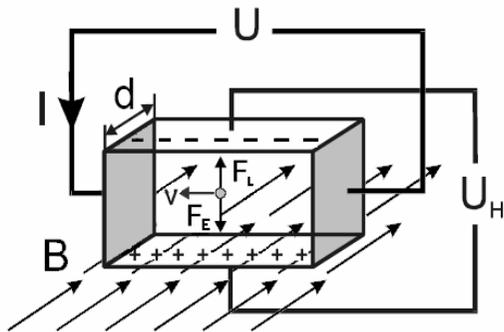


Рис. 3

В работе используются два датчика – аксиальный и тангенциальный (см. рис. 4). Они отличаются расположением чувствительного элемента относительно щупа. В аксиальном датчике он расположен так, что измеряется составляющая магнитного поля, направленная вдоль оси щупа, а в тангенциальном его расположение обеспечивает измерение составляющей, перпендикулярной плоскости щупа.

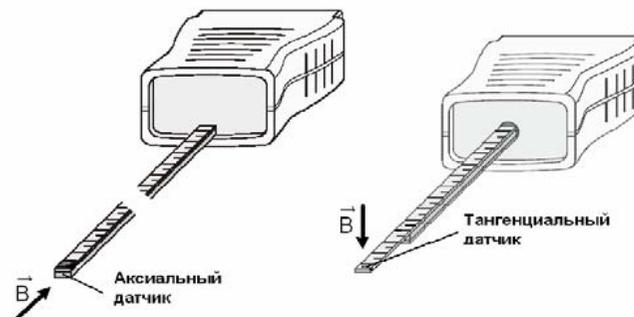


Рис. 4

Выполнение работы

Упражнение 1. Измерение магнитной индукции прямого проводника с током.

Схема опыта приведена на рис. 5. Как показано на рис.1, вектор B перпендикулярен любой плоскости, содержащей проводник. Поэтому, для измерения поля на перпендикуляре к проводнику следует использовать тангенциальный датчик. В первой части упражнения измеряется зависимость величины магнитной индукции от величины тока в проводнике:

- 1) повернуть ручки «Ток» и «Напряжение» на блоке питания против часовой стрелки до упора и включить блок питания и магнитометр;
- 2) после прогрева в течение 30 минут нажать кнопку «Уст. 0» на магнитометре;

- 3) расположить датчик так, чтобы щуп был на одном уровне с осью проводника, и чтобы расстояние s от конца щупа до проводника было равно 1 мм;
- 4) измерить при помощи штангенциркуля диаметр проводника и определить расстояние r от оси проводника до центра датчика, приняв s_0 равным 1,5 мм (см. рис. 5);

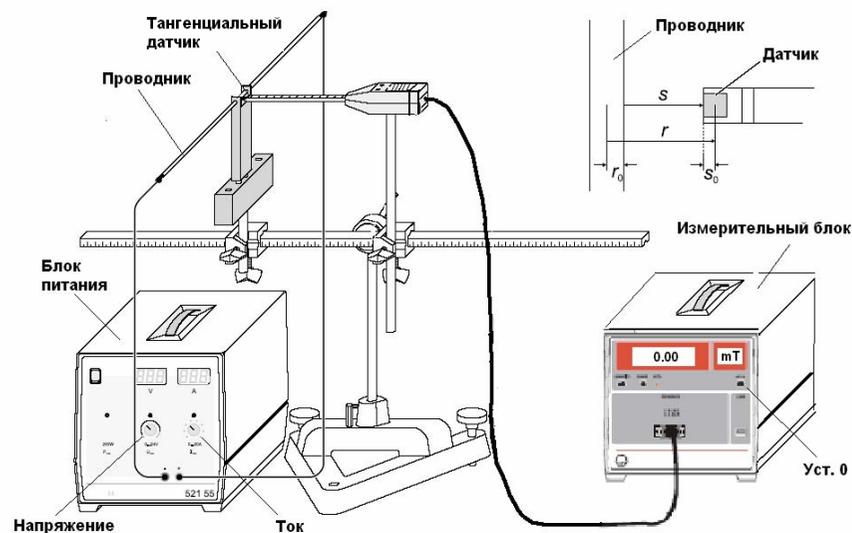


Рис. 5

- 5) установить ручку «Напряжение» на блоке питания так, чтобы указатель на ручке был направлен горизонтально влево;
- 6) изменяя ток с шагом в 2 А от 0 до 20 А, записать показания магнитометра в таблицу в лабораторном журнале;
- 7) повторить п.6 еще два раза;
- 8) найти средние значения индукции и их погрешности (систематическую погрешность магнитометра принять равной $\pm 2\%$) и построить график экспериментальной зависимости $B(I)$;
- 9) на этом же графике построить теоретическую зависимость $B(I)$ согласно (4).

Во второй части упражнения измеряется зависимость магнитной индукции от расстояния r от оси проводника:

- 1) установить ток в проводнике равным 20 А;
- 2) увеличивая расстояние r с шагом в 1 см до $r = 10$ см, записать показания магнитометра в таблицу в лабораторном журнале;
- 3) повторить п.2 еще два раза;
- 4) выключить приборы;
- 5) найти средние значения индукции и их погрешности и построить график экспериментальной зависимости $B(r)$;
- 6) на этом же графике построить теоретическую зависимость $B(r)$ согласно (4).

При сравнении теории с экспериментом следует иметь в виду, что соотношение (4) дает индукцию бесконечно длинного проводника, тогда как используемый в работе проводник может считаться таковым только при малых расстояниях r . Кроме того, следует принять во внимание, что подводящие провода также дают вклад в измеряемую индукцию.

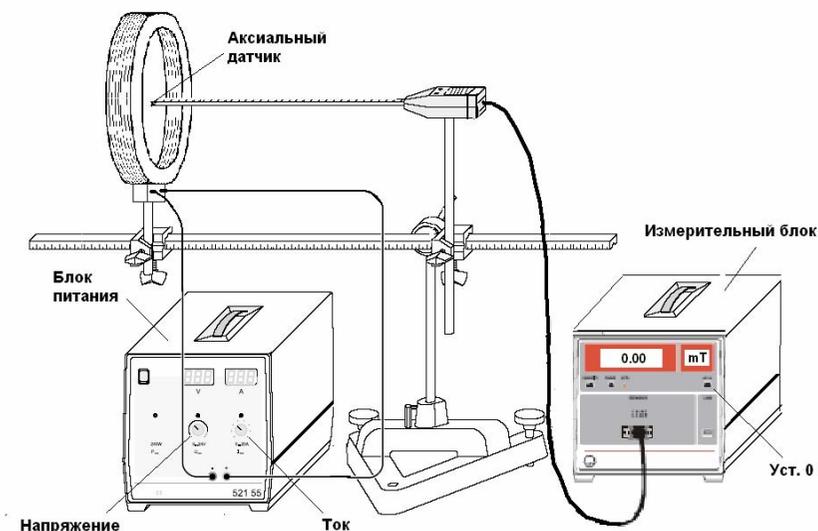


Рис. 6

Упражнение 2. Измерение магнитной индукции на оси кругового тока.

Схема опыта приведена на рис. 6. При сборке установки приборы должны быть выключены. Круговой ток создается в катушке со

средним диаметром 13.4 см, содержащей $N=320$ витков провода. Поскольку толщина и высота обмотки много меньше ее диаметра, магнитное поле катушки можно приближенно рассматривать, как поле N совпадающих витков одного диаметра. Магнитная индукция каждого витка на его оси определяется формулой (11). Тогда, в соответствии с принципом суперпозиции, индукция магнитного поля катушки будет в N раз больше. Так как согласно (11) поле кругового тока направлено вдоль оси катушки, в этом упражнении используется аксиальный датчик.

В упражнении измеряется зависимость магнитной индукции от расстояния r от центра катушки:

- 1) включить блок питания и измерительное устройство;
- 2) через несколько минут после включения нажать кнопку «Уст. 0»;
- 3) установить ток в катушке равным 2 А;
- 4) установить аксиальный датчик в центре катушки;
- 5) увеличивая расстояние r последовательно в обе стороны от центра с шагом 2 см до $r = \pm 20$ см, записать показания магнитометра в таблицу в лабораторном журнале;
- 6) повторить п.3 еще два раза;
- 7) выключить приборы;
- 8) найти средние значения индукции и их погрешности и построить график экспериментальной зависимости $B(r)$;
- 9) на этом же графике построить теоретическую зависимость $B(r)$.

При сравнении теории с экспериментом принять во внимание приближенное соответствие поля плоской катушки полю совпадающих витков.

Литература

1. И.В.Савельев. Курс общей физики, т.2. Наука, М. 1988.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип суперпозиции для индукции магнитного поля?
2. Как выбирается контур интегрирования при применении теоремы о циркуляции для определения магнитной индукции бесконечно длинного проводника с током?
3. Изменится ли магнитное поле витка с током при изменении направления протекания тока по витку на противоположное? Если изменится, то как?

4. Что утверждает теорема Гаусса для потока вектора \mathbf{B} ?
5. В каких единицах измеряется индукция магнитного поля в системе СИ?
6. Чему равна сила Лоренца?
7. В чем состоит эффект Холла?