

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСИ СОЛЕНОИДА

#### 1. Цель работы.

Изучение магнитного поля соленоида.

#### 2. Содержание работы.

Измерение магнитного поля соленоида и сравнение расчётом.

#### 3. Краткие сведения о магнитном поле

##### Общие положения

Известные виды взаимодействия тел на расстоянии, такие, как гравитационное, электрическое и магнитное, основаны на том, что тела объединяет общая среда, называемая физическим вакуумом. Всякое тело вызывает изменение этой среды, которое по определённому закону распространяется в ней. Принято считать упомянутое изменение *полем*.

Название вида взаимодействия присваивают полю. В данной работе исследуется *магнитное поле*. Специфика этого поля заключается в том, что невозможно указать его точечного источника, магнитного заряда. Иными словами, нет точки, из которой исходят *силовые линии*. Силовые линии магнитного поля это кривые, касательные в каждой точке к которым совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этих точках. Сколько бы мы ни делили магнит, каждая его частица имеет равное число входящих и исходящих силовых линий, тех, по которым выстраиваются магнитные стрелки.

Природные источники магнитного поля: наша Земля, содержащие железо руды и некоторые элементарные частицы. Искусственно созданные источники магнитного поля это *постоянные магниты*, тела, которые сохраняют в своей окрестности магнитное поле, не потребляя энергии извне. В технике магнитное поле получают путём пропускания тока по проводнику. Итак, магнитное поле это силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на намагниченные тела. И вообще, каждое поле воздействует только на тела, которые сами обладают таким полем.

Такие тела обладают *магнитным моментом*. Это значит, что в однородном магнитном поле на них действует вращающий момент, поворачивающий тело вдоль силовых линий внешнего поля. В неоднородном магнитном поле они устремляются в сторону усиления поля, сгущения силовых линий. Например, магнитный момент витка с током  $I$  (рис. 1) численно равен  $p=IS$ , где  $S$  – площадь, охватываемая

витком. Здесь  $B$  – направление вектора магнитной индукции.

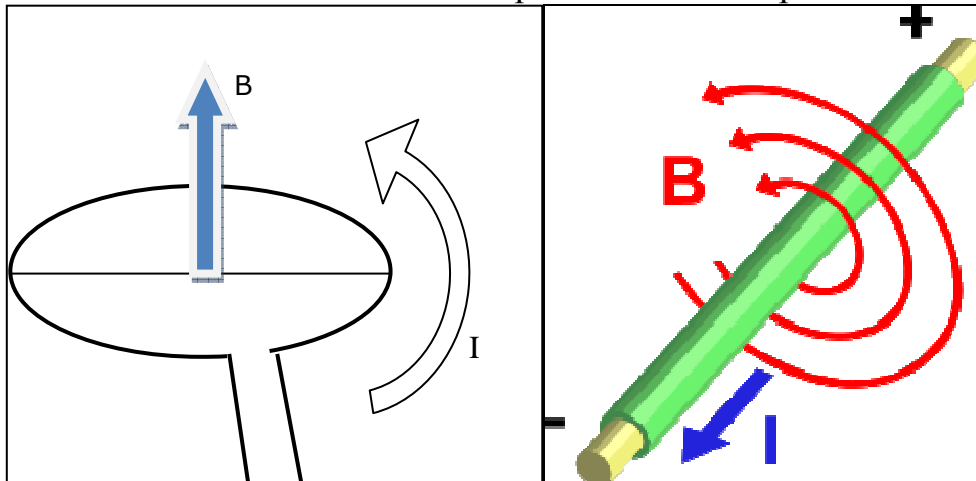


Рис. 1. Направление вектора магнитной индукции витка с током (слева: ток идёт по часовой стрелке, если смотреть снизу. По правилу буравчика, вращаясь по направлению тока, он ввинчивается по направлению  $B$ ) и прямого проводника (справа <http://ru.wikipedia.org>. По правилу буравчика, ввинчиваясь по направлению тока, он вращается по часовой стрелке.).

В данной работе рассматривается магнитное поле, создаваемое катушкой с током. Катушка, длина которой много больше диаметра, называется соленоидом. Если по проводу, которым намотан соленоид, пропускать постоянный ток, то магнитное поле, создаваемое соленоидом, будет сходно с полем прямого постоянного магнита.

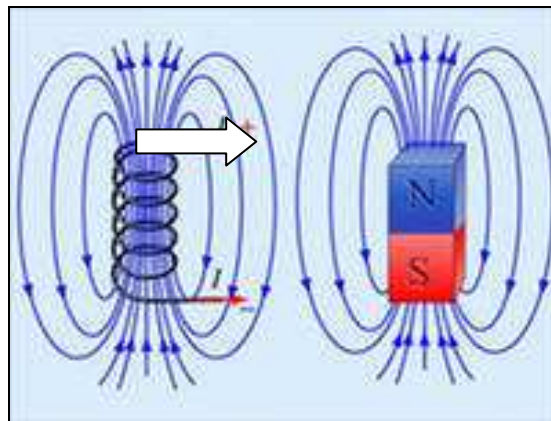


Рис. 2. Направление силовых линий многовиткового соленоида (слева, ток по часовой стрелке, если смотреть снизу) и прямого магнита (справа, <http://images.yandex.ru>).

Имея это в виду, магнитное поле постоянных магнитов многие считают следствием протекания в них круговых токов, другие же считают, что это зафиксированное (замороженное) состояние однонаправленных ориентированных электронов. В самом деле, размагничивание имеет место при нагреве магнита, при ударе по нему и даже при встряхивании.

Наименьшим носителем магнитного поля является электрон, что проявляется в наличии у него магнитного момента, а его магнитное поле похоже на магнитное поле витка с током, как показано на рис. 3.

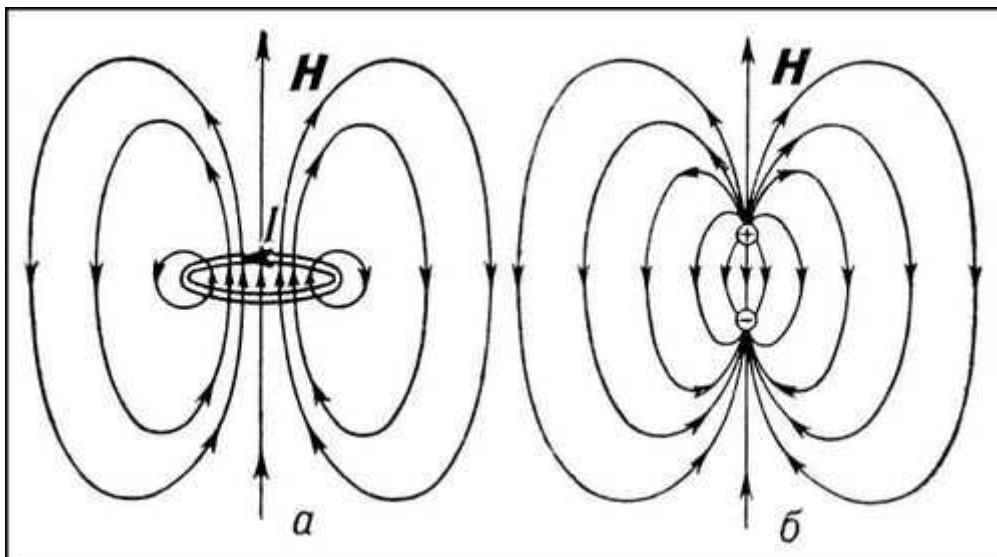


Рис. 3. Сравнение конфигурации магнитных полей витка с током (а) и магнита (б, <http://bse.sci-lib.com/particle015463.html>)

На рис. 3. Показаны линии напряжённости  $H$  магнитного поля, плюсом и минусом обозначены полюса магнита. Что же касается магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током  $I$ , то, скорее всего, в этом случае получается сложение магнитных моментов электронов проводимости, согласно ориентированных при движении в проводнике под действием электрического поля, создаваемого источником с напряжением  $U$ . При постоянном токе по закону Ома  $U=I \cdot R$ , где  $R$  – сопротивление проводника.

#### Основные соотношения.

Прежде всего, вводится понятие пробника, т.е. элемента, однозначно реагирующего на магнитное поле. В качестве такового взят элемент тока, прямой участок проводника длиной  $l$  и током  $i$ . Пробник вносят в магнитное поле и измеряют силу  $F$ , с которой поле действует на него. Далее используем скалярные записи векторов, для чего будем оперировать их модулями. Например, пробник поворачивают по трём пространственным осям до тех пор, пока не будет найдено положение с максимальной величиной силы, и фиксируем эту величину. На практике чаще всего используют датчики магнитного поля, например, датчики Холла.

Оказалось, что сила  $F$  прямо пропорциональна току  $i$  и длине  $l$ :  $F=B \cdot i \cdot l$ , а  $B$  – коэффициент, выравнивающий размерности, который назван магнитной индукцией. Вычислив  $B=F/i \cdot l$ , находят полную силовую характеристику заданного извне магнитного поля в данной точке.

Если поле создаётся не в вакууме, а в способном намагничиваться веществе (*магнетике*), то  $B=B_0 + B_n$ , где  $B_0$  – индукция источника поля, а  $B_n$  – индукция, создаваемая этим веществом. Поэтому в простых случаях записывают  $B=\mu B_0$ , где  $\mu$  – *относительная магнитная проницаемость* конкретного магнетика, показывающая, во сколько раз он повышает индукцию. Часто используют также  $H$  – *напряженность магнитного поля*, равная  $H=B_0/\mu_0$ , где  $\mu_0=4\cdot\pi\cdot 10^{-7}$  Гн/м – *магнитная постоянная*, магнитная проницаемость вакуума. Как видно,  $H$  определяет не индукцию, а поле источников без учёта влияния среды, а также имеет другую размерность.

Соленоид состоит из многих витков, и создаваемое им поле вычисляется как суперпозиция полей всех витков.

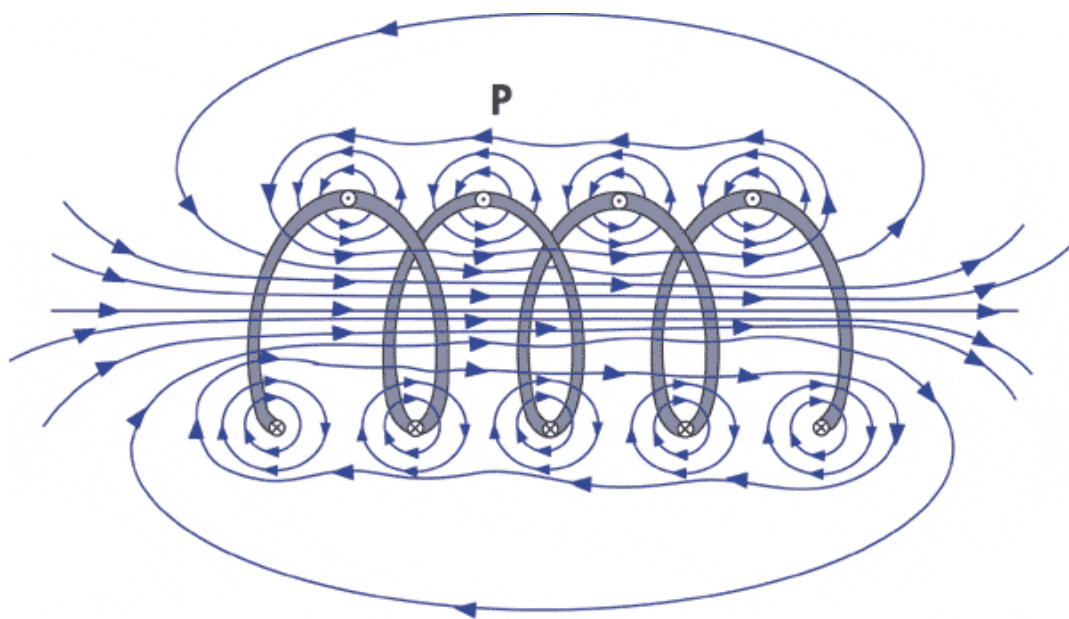


Рис. 4. Поле соленоида(<http://www.ndt-ed.org>)

На рис. 4 ток имеет спиралевидную форму, в поперечном сечении направлен по часовой стрелке, если смотреть слева. Межвитковые поля взаимно компенсируются, внутри соленоида поля складываются, снаружи вычитаются; поэтому поле внутри сильнее, чем снаружи. Максимум магнитной индукции достигается на середине оси соленоида:

$B_{\text{макс}} = \mu \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I \cdot P / (D^2 + P^2)^{0.5}$ , где  $n$  – число витков,  $I$  – ток,  $P$  – длина,  $D$  – диаметр соленоида. На краю соленоида индукция равна  $B_{\text{макс}}/2$ .

Магнитное поле имеет сложную конфигурацию, поэтому в большинстве случаев в электротехнике вычисляют не распределение поля в пространстве, а суммарный эффект его действия. Для этого вводят величину, зависящую от значения вектора магнитной индукции не в одной точке, а во всех точках произвольно выбранной поверхности. Её называют *магнитным потоком* и обозначают греческой буквой  $\Phi$  (фи).

Магнитный поток  $\Phi$  *однородного поля* через плоскую поверхность это скалярная физическая величина, численно равная произведению

модуля индукции  $\mathbf{B}$  магнитного поля, площади поверхности  $S$  и косинуса угла  $\alpha$  между нормалью  $\vec{n}$  к поверхности и вектором индукции  $\vec{B}$  (рис. 5):  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha)$ . Если поле неоднородное, то вычисляется интеграл от  $B$  по поверхности.

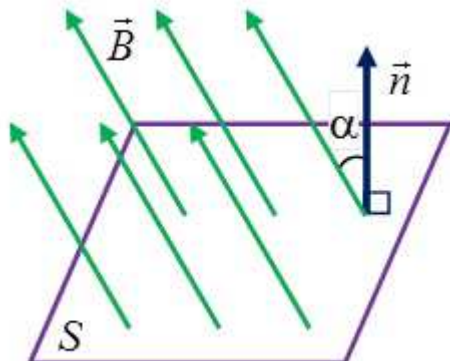


Рис. 5. Магнитный поток через контур.

В СИ единицей измерения магнитной индукции является *тесла* (Тл), а магнитного потока - *вебер* (Вб):  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ . Магнитный поток в  $1 \text{ Вб}$  — это магнитный поток однородного магнитного поля с индукцией  $1 \text{ Тл}$  через перпендикулярную ему плоскую поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ . Поток может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от значения угла  $\alpha$ . Поток магнитной индукции наглядно может быть истолкован как величина, пропорциональная числу линий вектора индукции  $\vec{B}$ , пронизывающих данную площадку поверхности.

Итак, если в контуре, например, в круговом витке, существует ток  $I$ , то через охватываемую им поверхность проходит магнитный поток  $\Phi$ . Опытно установлено, что он пропорционален току:  $\Phi = L \cdot I$ , где  $L$  — коэффициент пропорциональности, называемый *индуктивностью* контура. Индуктивность  $L$  полностью определяется геометрией контура, измеряется в единицах Гн (*генри*) и может быть рассчитана или измерена. Для ряда видов контуров и катушек составлены таблицы величин индуктивности. Например, индуктивность соленоида по разным источникам равна  $L_1 = k_1 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot S / l$  или  $L_2 = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot D \cdot k_2 / 4\pi$ , где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты формы,  $n$  — число витков,  $S = \pi \cdot D^2 / 4$  — площадь сечения,  $D$  — диаметр,  $l$  — длина соленоида.

Если подключить контур к источнику переменного по знаку тока, чаще всего, синусоидального, то магнитный поток  $\Phi$  также будет синусоидальным. Согласно закону электромагнитной индукции, в контуре будет наводиться ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{\text{си}} = -d\Phi/dt$ , по правилу Ленца со знаком минус, то есть направленная встречно источнику. В электротехнике это учитывают тем, что на переменном токе сопротивление контура или катушки записывают как  $X_L = \omega \cdot L$ , где  $\omega = 2\pi f$  есть круговая частота,  $f$  —

частота изменения тока. Поскольку  $L = \Phi/I$ , она численно равна потоку самоиндукции (ибо поток задаётся не извне, а собственным током) контура при единичном токе. Функция источника тока состоит к компенсации этой ЭДС.

Наоборот, если контур поместить во внешнее переменное поле, то в контуре наводится ЭДС индукции  $\mathcal{E}_n = d\Phi/dt = LdI/dt$ , равная скорости изменения магнитного потока. В замкнутом контуре возникает индукционный ток, имеющий такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.

#### 4. Описание измерительной установки.

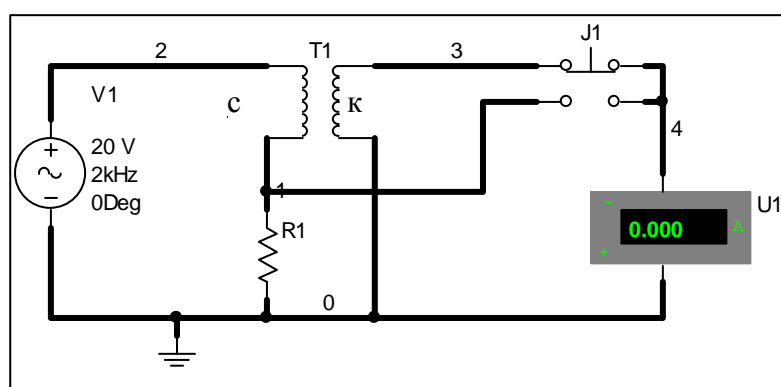


Рис. 6. Электрическая схема измерений

Схема измерений дана на рис. 6, где приняты следующие обозначения: V1 – источник переменного напряжения, R1 – измерительный резистор, U1 – вольтметр переменного тока, C – исследуемый соленоид (слева) и K – измерительная катушка (справа), J1 – переключатель, который в верхнем положении подключает вольтметр к измерительной катушке, а в нижнем – к измерительному резистору. Источник задаёт ток в цепи, вольтметр измеряет напряжение на резисторе, что позволяет вычислить ток в цепи.

#### 5. Приборы для выполнения работы

1. Генератор синусоидального переменного тока.
2. Милливольтметр.
3. Исследуемый соленоид с измерительной катушкой.



Рис. 7. Генератор

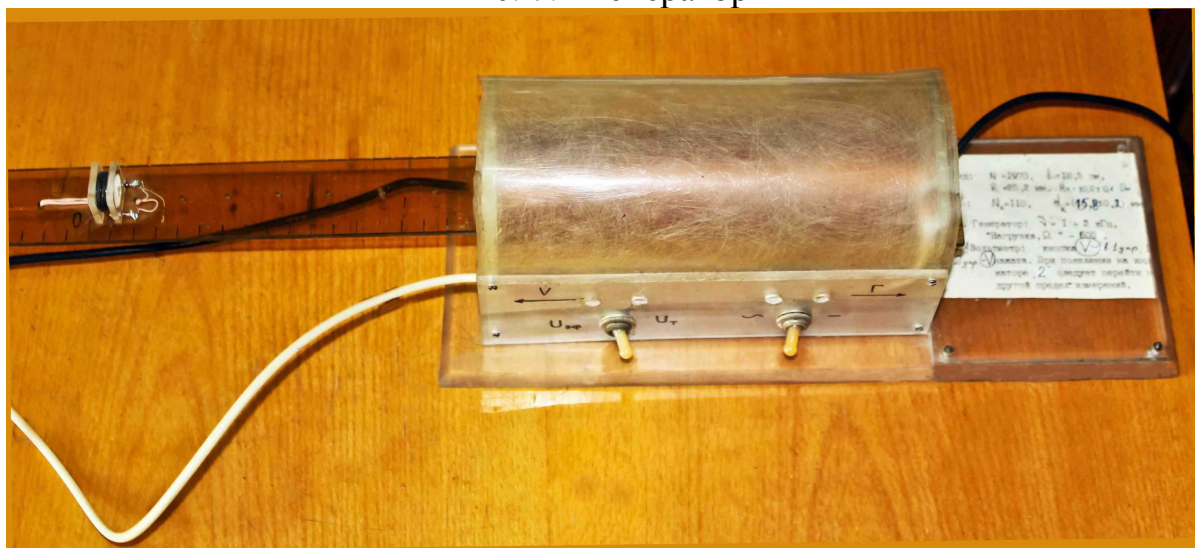


Рис. 8. Исследуемый соленоид.

Соленоид размещён в пластиковом футляре. Измерительная катушка (слева) установлена на линейке, при помощи которой её можно поместить в нужной точке на оси соленоида. Переключатель слева выполняет функции переключателя J1.





## 7. Обработка результатов измерений.

*Данные для расчёта.* Длина соленоида  $l=185 \pm 2$  мм, диаметр  $D_c=50.4 \pm 0.3$  мм, число витков  $N_c=1970$ , омическое сопротивление  $R_c=56 \pm 1$  Ом, измерительное сопротивление  $R_1=10.0 \pm 0.1$  Ом. Измерительная катушка: диаметр  $D_k=15.8 \pm 0.2$  мм, число витков  $N_k=110$ , омическое сопротивление  $R_k=11.2 \pm 0.5$  Ом.

Обозначения:  $f$  – частота генератора,  $U_{R1}$  – напряжение на измерительном сопротивлении  $R_1$ ,  $I$  – ток соленоида,  $U_{ген} = 30$  В – напряжение генератора,  $U_c$  – напряжение на соленоиде,  $\mu_0=4\pi 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума), для воздуха  $\mu=1$ ,  $U_k$  – напряжение на катушке,  $B$  – индукция магнитного поля на оси соленоида.

*Расчёт.*  $I = U_{R1} / R_1$ ;  $U_c = U_{ген} - U_{R1}$ ;  $X_L = \omega L_c^{изм} = U_c / I$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $L_c^{изм} = U_c / I\omega$  – индуктивность соленоида;  $U_k^{центр} = dF/dt = \omega F$  (для синусоидального поля);  $F = U_k^{центр} / \omega$ ;  $B^{центр} = F / S_k$ ;  $S_k = \pi D_k^2 / 4$ ; то же для края.

Для продвинутых. Рассчитать и сравнить с результатами измерений:

$L_{расч}$ ,  $L_k^{расч}$  – индуктивность катушки,  $B_{расч}^{центр}$ ,  $\Phi^{расч}$ .

## 8. Вопросы для самопроверки.

1. В чём состоит явление электромагнитной индукции и самоиндукции?
2. Что такое индуктивность и как она определяется?
3. Каков физический смысл  $\mu$  – относительной магнитной проницаемости магнетика  $\mu$ ?
4. Как определяется магнитное поле?
5. Какие существуют источники магнитного поля?
6. Что такое магнитный поток, как он измеряется?

## 9. Литература.

1. Савельев И.В. Курс физики, кн.2. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 2004.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.  
Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 5. "Электричество и магнетизмом". Изд.: Едиториал УРСС, 2004 г.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3, -М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд. МИФИ, 2002.