

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 27.4

### Исследование магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла

**Цель работы:** ознакомиться с принципом работы датчика Холла, исследовать распределение магнитного поля внутри соленоида

**Приборы и принадлежности:** кассета ФПЭ – 04 с соленоидом и датчиком Холла на штоке, источник питания, цифровой вольтметр.

### Теоретическое введение

#### Магнитное поле соленоида

Соленоид представляет собой изолированный проводник, спирально намотанный на цилиндрический каркас. Слово «соленоид» в переводе с греческого означает «похожий на трубу». То есть соленоид — это катушка индуктивности, по форме напоминающая трубу (рис.1).

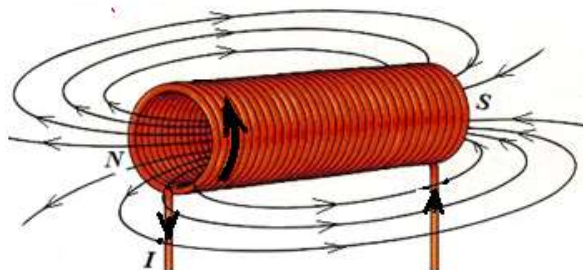


Рис.1

Если по виткам проходит электрический ток, в полости соленоида создаётся магнитное поле. Линии магнитного поля соленоида показаны на рис. 1 и рис. 2. Внутри соленоида

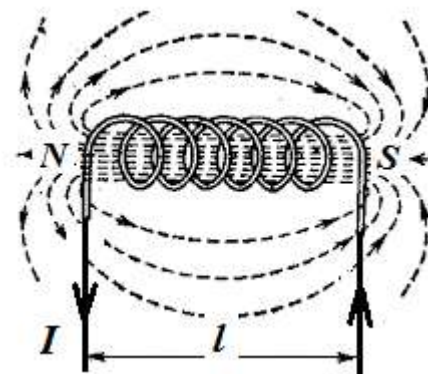


Рис. 2.

направление линий образует с направлением тока правовинтовую систему.

Магнитная индукция в центре соленоида на его оси вычисляется [см. рекомендованную в конце указаний литературу] по формуле

$$B_0 = \frac{\mu_0 I_c N}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (1)$$

где  $I_c$  – ток в соленоиде,  $N$  – число витков в соленоиде,  $L$  – его длина  $D$  – диаметр витков катушки,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Если длина  $L$  обмотки соленоида значительно больше его диаметра  $D$ , то соленоид считается бесконечно длинным. Внутри бесконечного соленоида магнитное поле однородно, т.е. во всех точках внутри соленоида вектор  $\mathbf{B}$  индукции магнитного поля является постоянным, направленным по оси соленоида и имеющим величину

$$B = \mu_0 n I_c, \quad (1, a)$$

где  $n = N/L$  – число витков на единицу длины.

Соленоиды практически используются во многих областях деятельности человека. Например, клапаны двигателей, тяговое реле стартера автомобиля, клапаны гидравлических систем, подъемные электромагниты, соленоидные замки, детекторы в

ускорителях заряженных частиц, установки индукционной заковки и нагрева и многое другое.

## Эффект Холла

Для исследования магнитного поля на оси соленоида в установке используется измеритель магнитной индукции  $B$ , принцип работы которого основан на эффекте Холла.

**Эффект Холла** объясняется взаимодействием носителей заряда (электронов проводимости в металлах, электронов проводимости и дырок в полупроводниках) с магнитным полем.

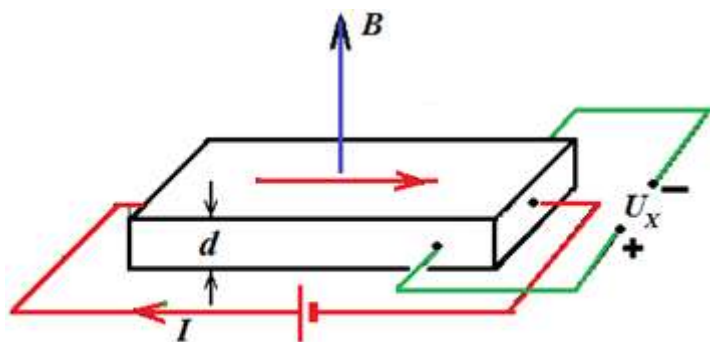


Рис. 3.

Если пропускать ток  $I$  через прямоугольную пластинку проводника или полупроводника вдоль длины пластинки, а перпендикулярно плоскости пластинки и направлению тока приложить магнитное поле  $B$ , то на боковых гранях пластинки возникает разность потенциалов  $U_x$  (рис. 3).

На движущиеся носители тока с зарядом  $q$  в магнитном поле действует

*сила Лоренца*  $F_L$ , величина и направление которой определяется векторным произведением

$$F_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

Это значит, что сила Лоренца отклоняет носители тока от первоначального направления движения в направлении, перпендикулярном как вектору скорости  $\mathbf{v}$  направленного движения, так и вектору магнитной индукции  $\mathbf{B}$ .

На рис. 4 показано направление силы Лоренца, действующей на электроны проводимости в помещенном в магнитное поле металле или в полупроводнике  $n$ -типа (с электронным типом проводимости). Ток  $I$  вдоль пластинки идет слева направо, вектор магнитной индукции  $B$  направлен вертикально вверх. Напомним, что электроны, имеющие отрицательный заряд, движутся в сторону противоположную току. Воспользовавшись правилом векторного произведения и учитывая отрицательный знак заряда электрона, из формулы (2) определяем, что электроны отклоняются силой Лоренца на дальнюю грань пластинки. Вследствие этого на ней возникает избыток электронов, а на ближней грани – их недостаток. Дальняя грань пластинки заряжается отрицательно, а ближняя – положительно, и между ними возникает *поперечная разность потенциалов*  $U_x$ , называемая *ЭДС Холла* (рис. 3).

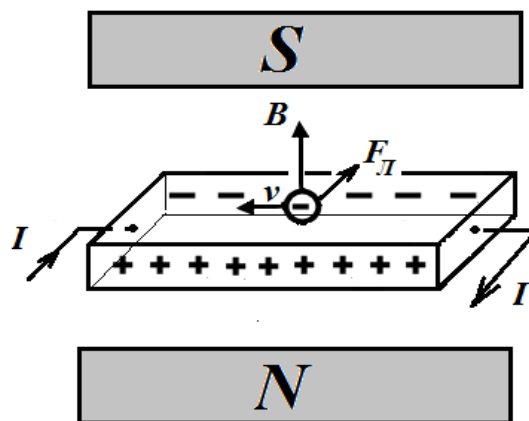


Рис. 4.

Можно показать (см., например, [1, 2]), что это напряжение  $U_X$  рассчитывается по формуле

$$U_X = R_X \cdot \frac{I_X \cdot B}{d}. \quad (3)$$

Здесь  $I_X$  – сила тока, протекающего через пластинку,  $B$  – модуль вектора магнитной индукции,  $d$  – толщина пластинки. Коэффициент пропорциональности  $R_X$  называется **постоянной Холла**. Она имеет размерность  $[м^3/А \cdot с]$ , зависит только от материала проводника и является его характеристикой.

Классическая теория электропроводности дает такое выражение для постоянной Холла:

$$R_X = \frac{1}{nq}, \quad (4)$$

( $n$  – концентрация, т.е. число носителей тока в единице объема,  $q$  – их заряд).

Для *металлов*, у которых концентрация электронов  $n \sim 10^{28} м^{-3}$ ,  $R_X \sim 10^{-9} м^3/А \cdot с$ , для *полупроводников*  $R_X \sim 10^{-5} \div 0,1 м^3/А \cdot с$ .

Ценность постоянной Холла состоит в том, что измерив постоянную Холла  $R_X$ , можно найти концентрацию носителей тока, а определив ее знак, можно судить о природе проводимости данного полупроводника или металла. Если окажется, что  $R_X < 0$ , это будет означать, что проводимость осуществляется электронами, если  $R_X > 0$  – дырками.

На основе эффекта Холла работают **датчики Холла** – приборы, позволяющие прямо и точно *измерять индукцию  $B$  магнитного поля*, а также выполняющие другие задачи автоматики.

Как следует из формулы (3) индукция  $B$  магнитного поля выражается формулой

$$B = \frac{d}{R_X I_X} U_X = K U_X. \quad (5)$$

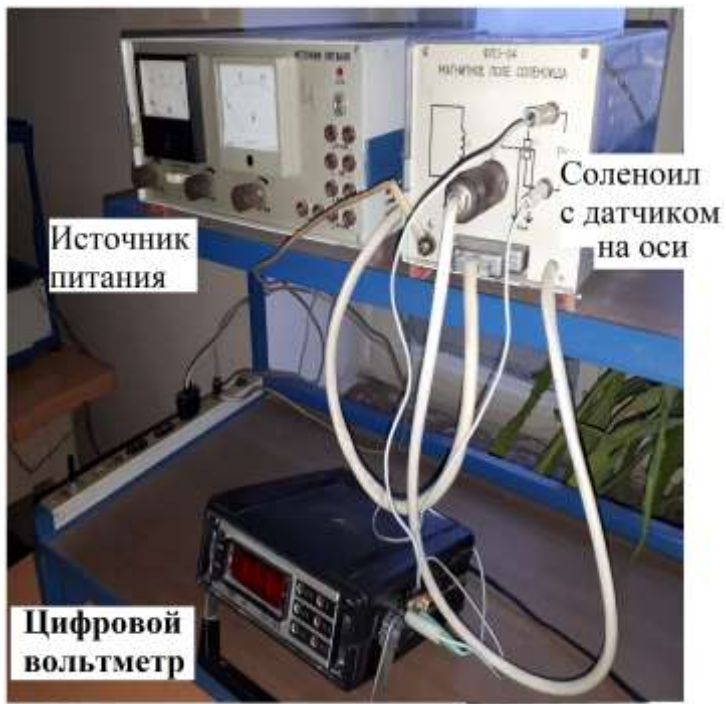
Измерив ЭДС Холла  $U_X$  с помощью специального датчика, можно по формуле (5) рассчитать индукцию  $B$  магнитного поля. При этом коэффициент пропорциональности  $K$  (комбинация постоянной Холла  $R_X$  данного датчика, толщины  $d$  датчика Холла и силы управляющего тока  $I_X$  в ней) определяется заранее.

## Методика эксперимента и экспериментальная установка

Таким образом, цель работы – изучение магнитного поля внутри соленоида с током – будет достигнута после выполнения двух экспериментов:

- определения коэффициента  $K$  ( $B = K U_X$ ) для данного датчика (градуировка датчика Холла);
- измерения с помощью датчика Холла магнитной индукции  $B$  в разных точках на оси соленоида конечной длины.

Лабораторная установка состоит из блока источников питания (ИП), блока «магнитное поле соленоида» ФПЭ-04 и цифрового вольтметра (см. фото и схему на рис.5).



Фото

Исследуемый соленоид закреплен в блоке ФПЭ-04 в пластмассовой коробке (рис. 6). Соленоид посредством кабеля подключен к источнику питания ИП.

Вдоль оси соленоида перемещается шток, на конце которого находится измеритель магнитной индукции – датчик Холла. На штоке через 1 см нанесены деления, с помощью которых ведётся отсчет перемещения датчика Холла вдоль оси соленоида. По делениям на штоке определяется координата  $x$ , указывающая положение датчика.

К штоку подсоединен жгут для подключения электродов.

В датчике возникает напряжение  $U_x$ , которое пропорционально магнитной индукции поля  $B$  и измеряется цифровым вольтметром.

Блок ИП служит для питания постоянным напряжением соленоида и датчика Холла.



Рис. 6.



Рис. 5.

От источника питания (см. фото) на соленоид подается ток  $I_c$ , силу которого можно изменять. Ток в соленоиде  $I_c$  фиксируется амперметром [А] источника питания (см. схему рис.5). Вольтметр ИП [V] показывает напряжение на соленоиде.

Параметры соленоида: число витков  $N = 2700$ , длина  $l = 15$  см, диаметр соленоида  $D = 85$  мм. Толщина датчика  $d = 0,2$  мм. Управляющий ток датчика Холла  $I_x = 90$  мА.

### **Порядок выполнения работы**

**Задание 1. Градуировка датчика Холла (определение коэффициента пропорциональности  $K$  в формуле  $B = KU_x$  для данного датчика).**

**Идея опыта.** Помещают датчик Холла в центр соленоида, индукция поля в этой точке  $B_0$  рассчитывается по формуле (1), т.е. **считается известной**. **Измеряют** в этой точке ЭДС Холла  $U_{x0}$ . Затем по формуле

$$K = \frac{B_0}{U_{x0}} \quad (6)$$

**рассчитывают** коэффициент  $K$ .

### Измерения

1. Соединить блоки согласно схеме. Поместить датчик Холла в центр соленоида. Для этого выдвинуть шток с датчиком в положение «0» по шкале штока.
2. Повернуть ручки регуляторов тока и напряжения на панели ИП до упора **против часовой стрелки**, тумблером СЕТЬ включить блок ИП.
3. Включить тумблер СЕТЬ цифрового вольтметра, переключателем РОД РАБОТЫ установить режим измерения постоянного напряжения "U".
4. Тумблер «Контроль тока» ИП поставить в положение 5-25 В. Регулятором тока соленоида установить по амперметру ток в соленоиде  $I_{1c} = 0,5$  А.
5. По цифровому вольтметру определить ЭДС Холла  $U_{x0}$  для координаты  $x = 0$  см и записать  $U_{x0}$  в таблицу 1.
6. Увеличивая силу тока в соленоиде через 0,5 А до максимального значения 2 А, провести измерения  $U_x$  для остальных значений тока, указанных в таблице.

Таблица 1.

N п/п	Ток соленоида $I_c$ , А	ЭДС датчика Холла в средней точке соленоида, $U_{x0}$ , мВ	Вычисленная по формуле (1) магнитная индукция $B_0$ , Тл	Коэффициент $K$ , Тл/мВ	$\langle K \rangle$ Тл/мВ
1	0,5				
2	1,0				
3	1,5				
4	2,0				

7. Вычислить по формуле (1) значение магнитной индукции  $B_0$  в центре соленоида для разных значений силы тока в соленоиде  $I_c$  и занести в таблицу.
8. Рассчитать по формуле (6) коэффициент  $K$  для разных значений силы тока в соленоиде  $I_c$  и занести в таблицу. Найти среднее значение  $\langle K \rangle$ .

**Задание 2. Исследование зависимости индукции магнитного поля соленоида в разных точках на его оси от координаты  $x$ , отсчитываемой от средней точки.**

### Измерения

1. Установить величину тока в катушке соленоида  $I_c = 1$  А.

2. Перемещая шток с датчиком Холла вдоль оси соленоида с интервалом 2 см, измерить ЭДС Холла  $U_x$  в разных точках на его оси. Полученные данные занести в таблицу 2.

3. Вычислить индукцию поля  $B$  для каждого положения датчика Холла по формуле

$$B = KU_x.$$

При расчете использовать значение  $K$ , полученное в задании 1. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2. Сила тока  $I_c = 1 \text{ А}$ ,  $K = 000$

Положение датчика $x$ , см	ЭДС датчика Холла, $U_x$ , мВ	Магнитная индукция $B = KU_x$ , $10^{-4}$ Тл
-10		
-8		
-6		
-4		
-2		
0		
+2		
+4		
+6		
+8		
+10		

4. По данным таблицы 2 построить график зависимости индукции магнитного поля от координаты вдоль оси соленоида  $B = f(x)$ .

Приблизительный вид графика показан на рис. 7.

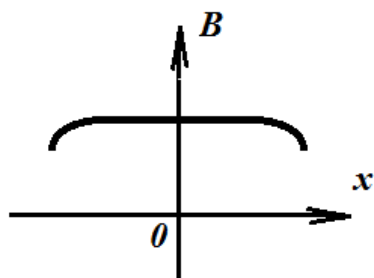


Рис. 7.

5. При наличии учебного времени повторить измерения и расчеты для нового значения силы тока в соленоиде (по заданию преподавателя).

### Литература

1. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. У 3 т. 2-ге вид., випр.. – К. :Техніка, 2006. Т.2. Електрика і магнетизм.
2. Савельев И.В. Курс физики. Учеб: В 3-х т. Т. 2 Электричество. Колебания и волны. – М.: Наука, 1989.

### Контрольные вопросы

1. Почему индукция магнитного поля  $B$  является силовой характеристикой магнитного поля? Написать выражение для магнитной силы, действующей на заряженную частицу.
2. Описать магнитное поле идеального бесконечного соленоида.

3. Описать магнитное поле конечного соленоида. Описать отличия магнитного поля конечного соленоида от магнитного поля идеального бесконечного соленоида. В какой области пространства магнитное поле конечного соленоида наиболее близко к магнитному полю соответствующего идеального бесконечного соленоида?
4. Что такое эффект Холла?
5. В каких веществах – металлах или полупроводниках – ЭДС Холла больше? Почему?
6. Как устроен датчик Холла? На каких принципах основаны методы измерения индукции магнитного поля?

**Правила техники безопасности.** При включенном источнике тока изменять схему нельзя. Источник тока включаются в последнюю очередь после сборки схемы и отключаются перед ее разборкой. До включения источника и перед его выключением регуляторы величины выходного тока должны быть установлены на нуль (**до отказа против часовой стрелки**).

Составил И.П.Гаркуша