



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

## **Лабораторный практикум**

по дисциплине

«Физика»

по разделу

### **«Магнетизм»**

Лабораторные работы  
Э12, Э13, Э14.

Авторы

Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н.,  
Егорова С.И., Ершов И.В.,  
Лемешко Г.Ф., Максимов С.М.,  
Пруцакова Н.В., Тимолянов К.А.,  
Шкиль Т.В.

Ростов-на-Дону, 2022

## Аннотация

Содержит методические указания к трем лабораторным работам по теме «Магнетизм». В каждой работе даны краткое описание рабочей установки и методика выполнения работы.

Предназначен для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, изучающих физику.

## Авторы

д.т.н., профессор Вернигоров Ю.М.,  
к.т.н., доцент Егоров И.Н.,  
д.т.н., профессор Егорова С.И.,  
к.т.н., доцент Ершов И.В.,  
к.ф.-м.н., профессор Лемешко Г.Ф.,  
к.ф.-м.н., доцент Максимов С.М.,  
к.ф.-м.н., доцент Пруцакова Н.В.,  
к.т.н., ассистент Тимолянов К.А.,  
к.ф.-м.н., доцент Шкиль Т.В.



## Оглавление

### **Лабораторная работа Э12 Магнитное поле рамки с током.4**

Краткая теория .....	4
Описание экспериментальной установки .....	7
Порядок выполнения работы .....	8
Контрольные вопросы .....	10

### **Лабораторная работа Э13 Изучение явления взаимной индукции .....11**

Краткая теория .....	11
Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы .....	13
Контрольные вопросы .....	18

### **Лабораторная работа Э14 Использование эффекта Холла для определения концентрации и подвижности основных носителей тока в полупроводниках .....19**

Теоретическая часть .....	19
Описание установки .....	20
Порядок выполнения работы .....	21
Контрольные вопросы .....	25

### **Рекомендуемая литература .....26**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э12

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РАМКИ С ТОКОМ

**Цель работы:** исследование магнитного поля прямоугольной рамки с током, экспериментальная проверка принципа суперпозиции магнитных полей.

**Оборудование:** источник питания, трансформатор, проводящая прямоугольная рамка, токоизмерительные клещи, мультиметр, датчик Холла, миллитесламетр.

### Краткая теория

**Магнитное поле** – это форма материи, окружающей движущиеся электрические заряды и намагниченные тела. Силовую характеристику магнитного поля называют индукцией магнитного поля  $\vec{B}$ .

Графически магнитное поле принято изображать с помощью линий магнитной индукции. *Линии магнитной индукции (силовые линии магнитного поля)* – воображаемые линии, в каждой точке которой вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной.

Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты, т. е. не имеют ни начала, ни конца и всегда охватывают проводники с током. Замкнутость линий индукции свидетельствует об отсутствии в природе магнитных зарядов. Поле, силовые линии которого всегда замкнуты, называется *вихревым*. Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля: магнитное поле не имеет микроскопических источников. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

Магнитное поле называется *однородным*, если вектор индукции  $\vec{B}$  во всех точках поля одинаков по модулю и направлению.

Для магнитного поля справедлив **принцип суперпозиции**: вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля, порождаемого несколькими движущимися зарядами (или токами), равен векторной сумме векторов индукции  $\vec{B}_i$  полей, порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i.$$

**Закон Био-Савара-Лапласа** позволяет определить вектор индукции магнитного поля  $d\vec{B}$ , создаваемого элементарным проводником  $d\vec{l}$  с током  $I$  в некоторой произвольной точке в векторной и скалярной форме:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где  $d\vec{l}$  – вектор, численно равный длине  $dl$  элемента проводника и совпадающий по направлению с током  $I$ ;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника  $dl$  в рассматриваемую точку поля.

В данной работе изучается магнитное поле прямоугольной рамки с током, которую можно рассматривать как систему попарно параллельных конечных проводников равной длины (рис. 1). Согласно принципу суперпозиции, индукция  $\vec{B}$  магнитного поля, созданного такой рамкой в произвольной точке наблюдения  $M$ , определяется векторной суммой магнитных индукций полей, созданных проводниками с током 1, 2, 3 и 4:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4.$$

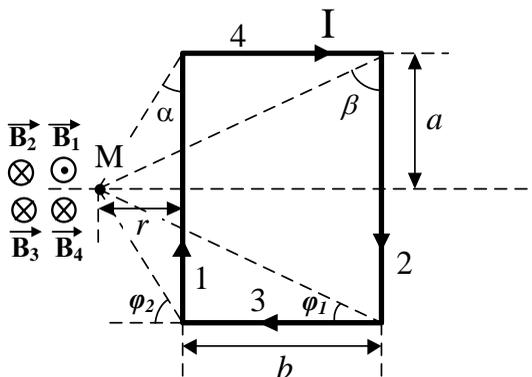


Рис. 1

Пусть точка наблюдения  $M$  расположена в плоскости рамки слева от нее (см. рис. 1). Согласно правилу правого винта, вектор  $\vec{B}_1$  направлен к нам, а векторы  $\vec{B}_2$ ,  $\vec{B}_3$  и  $\vec{B}_4$  – от нас, поэтому теоретическое значение модуля магнитной индукции результирующего поля в точке  $M$  можно рассчитать по формуле

$$B_{теор} = B_1 - B_2 - B_3 - B_4. \quad (1)$$

Используя закон Био-Савара-Лапласа, можно получить формулы

для расчета модулей магнитной индукции соответствующих полей в точке  $M$ , лежащей слева от рамки:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \cdot 2 \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \cdot 2 \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}}; \quad (2)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi(b+r)} \cdot 2 \cos \beta = \frac{\mu_0 I}{4\pi(b+r)} \cdot 2 \frac{a}{\sqrt{(b+r)^2 + a^2}}; \quad (3)$$

$$B_3 = B_4 = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left( \frac{b+r}{\sqrt{(b+r)^2 + a^2}} - \frac{r}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right) \quad (4)$$

где  $a = 0,2$  м и  $b = 0,3$  м – параметры рамки;  $r$  – расстояние от первого проводника до точки наблюдения (см. рис. 1),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I$  – сила тока в рамке.

Когда точка наблюдения  $M$  расположена **внутри** рамки (рис. 2), согласно правилу правого винта, векторы  $\vec{B}_1$ ,  $\vec{B}_2$ ,  $\vec{B}_3$  и  $\vec{B}_4$  направлены от нас, поэтому теоретически модуль магнитной индукции результирующего поля в точке  $M$  можно рассчитать по формуле:

$$B_{\text{реор}} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4. \quad (5)$$

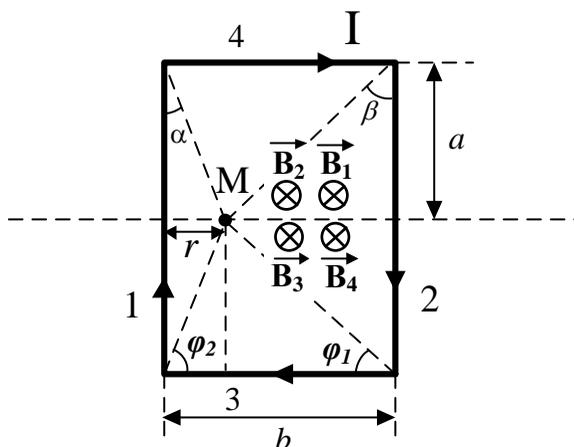


Рис. 2

Используя закон Био-Савара-Лапласа, можно получить формулы для расчета магнитной индукции соответствующих полей в точке  $M$ , лежащей внутри рамки (см. рис. 2):

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \cdot 2 \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \cdot 2 \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}}; \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi(b-r)} \cdot 2 \cos \beta = \frac{\mu_0 I}{4\pi(b-r)} \cdot 2 \frac{a}{\sqrt{(b-r)^2 + a^2}}; \quad (7)$$

$$B_3 = B_4 = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) =$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left( \frac{b-r}{\sqrt{(b-r)^2 + a^2}} + \frac{r}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right). \quad (8)$$

Относительную погрешность экспериментального значения магнитной индукции можно оценить по формуле:

$$\delta B = \frac{|B - B_{теор}|}{B_{теор}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

### Описание экспериментальной установки

Для выполнения работы собирается измерительная установка (рис. 3). Источник питания 1 подключен к трансформатору тока 2. Для измерения силы тока в исследуемой рамке 3 используются токоизмерительные клещи 4. Величину тока в рамке изменяют с помощью регулятора, который расположен в центре лицевой панели источника питания, а значение силы тока считывается с дисплея мультиметра 5. Измерение индукции магнитного поля осуществляется с помощью осевого датчика Холла 6 и цифрового тесламетра 7. Измерительный зонд с датчиком Холла закреплен на штативе, который может перемещаться вдоль линейки на поверхности стола перпендикулярно плоскости рамки. Линейка, закрепленная на рамке, позволяет устанавливать расстояние от датчика Холла до вертикального проводника с током.

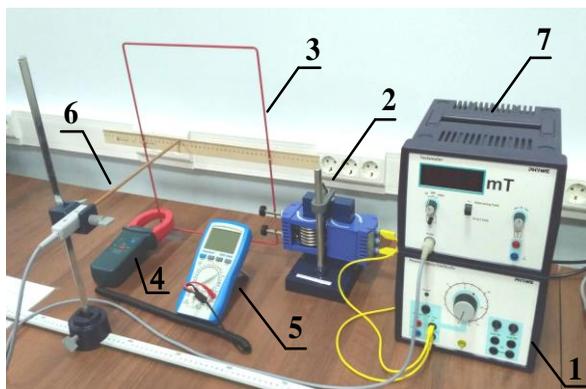


Рис. 3. Вид рабочей установки: 1 – источник питания; 2 – трансформатор; 3 – прямоугольная рамка с током; 4 – токоизмерительные клещи; 5 – мультиметр; 6 – измерительный зонд, на конце которого находится датчик Холла; 7 – цифровой тесламетр

### Порядок выполнения работы

**Задание 1.** *Определение индукции магнитного поля в точке, лежащей вне рамки с током слева от нее.*

1. К выходным клеммам трансформатора прикрепить прямоугольную рамку.

2. Включить тесламетр.

3. Обхватить токоизмерительными клещами провод рамки (см. рис. 3) и включить мультиметр.

4. Включить источник питания и установить с помощью регулятора значение силы тока в рамке 50 А (на дисплее мультиметра).

5. Датчик Холла установить **слева** от проводника 1 (см. рис. 1) на расстояниях  $r$ , указанных в табл. 1. Датчик Холла должен находиться вблизи измерительной линейки, при этом стержень измерительного зонда необходимо располагать перпендикулярно плоскости рамки. **Внимание! В процессе измерения не прикасаться датчиком Холла к рамке с током!** С помощью тесламетра измерить магнитную индукцию в данных точках. Так как при отсутствии тока тесламетр показывает 0,02 мТл (систематическая погрешность прибора), из всех показаний нужно вычесть 0,02 мТл и занести значения магнитной индукции (в миллитеслах) в строку ***B*** табл. 1.

Таблица 1

$r$ , м	0,03	0,04	0,05
$B$ , мТл			
$B_1$ , мТл			
$B_2$ , мТл			
$B_3$ , мТл			
$B_{теор}$ , мТл			
$\delta B$ , %			

6. Выключить источник питания.
  7. Рассчитать  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_{теор}$  для данных расстояний  $r$  по формулам (1) – (4) и занести полученные значения в табл. 1.
  8. По формуле (9) вычислить относительную погрешность  $\delta B$  измерений и занести в табл. 1.
- Задание 2. Определение индукции магнитного поля в точке, лежащей внутри рамки с током.**
1. Включить источник питания и установить с помощью регулятора значение силы тока в рамке 50 А.
  2. Датчик Холла установить **справа** от проводника 1 (см. рис. 2) на расстояниях  $r$ , указанных в табл. 2, включая  $r = 0,15$  м - центр рамки. С помощью тесламетра измерить магнитную индукцию в каждой точке. Учитывая систематическую погрешность прибора 0,02 мТл, занести значения магнитной индукции (в миллитеслах) в строку  $B$  табл. 2.
  3. Выключить источник питания.
  4. Рассчитать  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_{теор}$  для данных расстояний  $r$  по формулам (5) – (8) и занести полученные значения в табл. 2.
  5. По формуле (9) вычислить относительную погрешность  $\delta B$  измерений и занести в табл. 2.

Таблица 2

$r, \text{ м}$	0,03	0,04	0,05	0,15 (центр рамки)
$B, \text{ мТл}$				
$B_1, \text{ мТл}$				
$B_2, \text{ мТл}$				
$B_3, \text{ мТл}$				
$B_{\text{теор}}, \text{ мТл}$				
$\delta B, \%$				

### Контрольные вопросы

1. Что является источником магнитного поля?
2. Какие существуют характеристики магнитных полей? Раскройте их физический смысл.
3. Что называется линией магнитной индукции?
4. Как определить направление вектора магнитной индукции?
5. Сформулируйте и запишите закон Био-Савара-Лапласа.
6. В чем заключается принцип суперпозиции магнитных полей? Поясните графическим построением.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э13

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ

**Цель работы:** экспериментально проверить справедливость теоремы взаимности; исследовать зависимость ЭДС взаимной индукции от частоты переменного тока; выяснить влияние взаимного расположения катушек на величину ЭДС и коэффициент взаимной индукции.

**Оборудование:** генератор сигналов, осциллограф, катушки индуктивности, резисторы, соединительные провода, измерительная линейка.

### Краткая теория

**Электромагнитная индукция** – явление возникновения индукционного тока  $I_i$  в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока  $\Phi$  через площадь, ограниченную этим контуром.

Если в контуре протекает ток  $I_i$ , значит в нем действует электродвижущая сила, которая получила название *ЭДС электромагнитной индукции*.

**Закон Фарадея.** ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, взятой со знаком «минус»,

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} .$$

Знак «минус» следует из закона сохранения энергии и соответствует **правилу Ленца:** *индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине, его вызвавшей.*

Вокруг каждого проводника с током существует магнитное поле. Поэтому с проводящим контуром, по которому протекает ток, всегда сцеплен некоторый магнитный поток, который пропорционален силе тока, текущего по контуру,  $\Phi \sim I$ ; коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью контура*, которая зависит от размеров, формы контура и магнитной проницаемости среды  $\mu$

$$\Phi = L \cdot I .$$

Индуктивность измеряется в генри (Гн). 1 Гн – индуктивность контура, с которым при протекании тока силой 1А сцеплен магнитный поток 1 Вб.

При изменении силы тока в контуре будет изменяться также и сцепленный с ним магнитный поток, следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется **самоиндукцией**.

Если контур не деформируется и  $\mu$  не изменяется,  $L = const$  .  
Применим к явлению самоиндукции закон Фарадея.

$$\mathcal{E}_{Si} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Рассмотрим два контура, расположенных на расстоянии, сравнимом с их размерами (рис. 1). Ток  $I_1$ , текущий в первом контуре, порождает магнитное поле  $\vec{B}_1$ . На рис. 1 изображена только одна силовая линия этого поля, проходящая через центр контура. Если  $I_1$  нарастает, создаваемый этим током сквозь поверхность контура 2 магнитный поток  $\Phi_{21} = L_{21}I_1$  также нарастает, в контуре 2 возникает ЭДС электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E}_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

где  $L_{21}$  – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом взаимной индукции*.

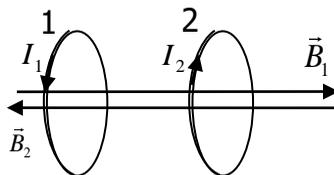


Рис. 1

Явление возникновения ЭДС индукции в одном контуре при изменении тока в другом контуре называется **взаимной индукцией**.

Если  $I_1$  нарастает,  $I_2$  будет направлен противоположно, если  $I_1$  убывает, то  $I_2$  будет сонаправлен с ним (согласно правилу Ленца).

По аналогии, если пропускать по второму контуру изменяющийся ток  $I_2$ ,  $\mathcal{E}_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$ , где  $L_{21}$  и  $L_{12}$  – коэффициенты взаимной индукции или взаимная индуктивность контуров 1 и 2, зависят от размеров, формы, взаимного расположения контуров и магнитных свойств среды.

**Теорема взаимности:** коэффициенты взаимной индукции всех индуктивно связанных контуров одинаковы:  $L_{12} = L_{21}$ .

Физический смысл  $L_{12}$ : взаимная индуктивность двух контуров численно равна ЭДС взаимной индукции, возникающей в одном контуре при изменении тока в другом контуре на единицу силы тока за единицу времени,

$$L_{12} = \frac{\mathcal{E}_{i1}}{\frac{dI_2}{dt}}.$$

## Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

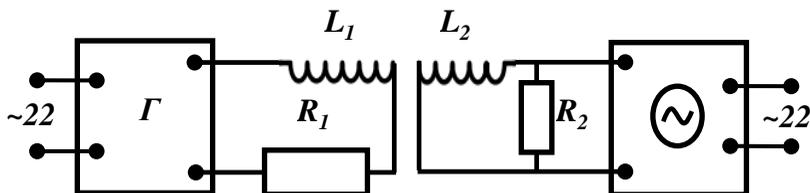


Рис. 2. Схема экспериментальной

Генератор  $\Gamma$  создаёт в первичном контуре переменное напряжение  $U$  и, соответственно, переменный ток  $I_1$ , протекающий через катушку  $L_1$ . На переднюю панель генератора выводятся значения частоты генератора  $\nu$  и действующее значение напряжения на выходе генератора  $U_D$ , которые можно устанавливать и изменять с помощью системы управления. Осциллограф позволяет определять амплитудное значение ЭДС взаимной индукции  $\mathcal{E}_{02}$ , возникающий в катушке  $L_2$ . Питание генератора и осциллографа осуществляется от сети напряжением  $\sim 220$  В.

Как известно, сопротивление катушки индуктивности в цепи переменного тока зависит от его частоты и определяется формулой

$$R_K = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2},$$

где  $R$  – активное сопротивление катушки;  $\omega L$  – реактивное индуктивное сопротивление;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота.

С ростом  $\omega$  сопротивление катушки увеличивается, что должно приводить к уменьшению силы тока  $I_1$  (согласно закону Ома). Чтобы практически исключить влияние  $\omega$  на величину тока  $I_1$ , в цепь первичного контура последовательно катушке  $L_1$  подключен резистор  $R_1$ , сопротивление которого значительно больше сопротивления катушки,

$$R_1 \gg \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Такое условие должно выполняться для любой катушки, подключенной к первичной цепи. В этом случае падение напряжения на резисторе  $R_1$  будет намного больше, чем на катушке, и ток  $I_1$  можно определить по формуле

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{U_0}{R_1} \cos \omega t,$$

где  $U_0$  – амплитудное значение напряжения генератора.

Резистор  $R_2$  не влияет на величину ЭДС взаимной индукции и служит для стабилизации сигнала на входе осциллографа. Величина сопротивления  $R_2$  должна удовлетворять условию  $R_2 \gg R_{K2}$ , но не должна быть слишком большой. В настоящей работе  $R_2 = 350$  Ом.

При протекании переменного тока  $I_1$  через катушку  $L_1$  в катушке  $L_2$  возникает переменная ЭДС взаимной индукции

$$\mathcal{E}_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} = -L_{21} \frac{U_0}{R_1} \frac{d}{dt} \cos \omega t = L_{21} \frac{U_0}{R_1} \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{02} \sin \omega t,$$

где  $\mathcal{E}_{02} = L_{21} \omega \frac{U_0}{R_1}$  – амплитуда ЭДС, индуцированной во второй катушке  $L_2$ .

Измерив с помощью осциллографа амплитуду  $\mathcal{E}_{02}$ , можно определить значение коэффициента взаимной индукции:

$$L_{21} = \frac{\mathcal{E}_{02} R_1}{\omega U_0} = \frac{\mathcal{E}_{02} R_1}{2\pi \nu U_0}.$$

Поскольку измерительные приборы в основном отображают действующее значение напряжения  $U_D$ , перепишем формулу для  $L_{21}$ ,

учитывая, что  $U_D = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ :

$$L_{21} = \frac{\mathcal{E}_{02} R_1}{2\sqrt{2}\pi\nu U_D} \quad (1)$$

Если подавать переменное напряжение на катушку  $L_2$ , а измерять значение  $\mathcal{E}_{01}$ , возникающей в катушке  $L_1$  (т.е. поменять катушки местами), то по аналогии можно записать:

$$L_{12} = \frac{\mathcal{E}_{01} R_1}{2\sqrt{2}\pi\nu U_D} \quad (2)$$

### Порядок выполнения работы

Включить генератор нажатием кнопки , включить осциллограф.

**Задание 1.** *Определение зависимости ЭДС взаимной индукции от частоты питающего напряжения (частоты генератора); определение величины  $L_{21}$ .*

1. Расположить катушки  $L_1$  и  $L_2$  соосно, чтобы их торцы соприкасались.

2. Установить действующее напряжение на выходе генератора  $U_D = 7$  В. Для этого на генераторе нажать кнопку , затем кнопку  и с помощью джойстика  и поворота ручки  выставить требуемое значение напряжения.

3. Для выставления требуемого значения частоты нажать кнопку  и с помощью джойстика  и поворота ручки  установить необходимое значение.

4. Изменяя частоту генератора в пределах от 8 до 16 кГц с интервалом 2 кГц, определить с помощью осциллографа значения  $\mathcal{E}_{02}$  во вторичном контуре; результаты измерений занести в табл. 1 ( $\mathcal{E}_{02} = C_V n$ , где  $n$  – число делений,  $C_V$  – цена деления шкалы осциллографа).

Таблица 1

№	$U_D = 7 \text{ В}, C_V = \text{--- В/дел}, R_I = 680 \text{ Ом}$					
	$\nu$ , Гц	$n$ , дел	$\mathcal{E}_{02}$ , В	$L_{21}$ , Гн	$\Delta L_{21}$ , Гн	$\delta L_{21}$ , %
1						X
2						
3						
4						
5						
Среднее значение:						

5. Рассчитать по формуле (1) значения  $L_{21}$ . Результаты занести в табл.1.

6. Построить график зависимости  $\mathcal{E}_{02} = f(\nu)$ .

7. Рассчитать среднее значение коэффициента взаимной индукции

$$\langle L_{21} \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 L_i,$$

абсолютные погрешности каждого измерения

$$\Delta L_i = \left| \langle L_{21} \rangle - L_i \right|,$$

среднюю абсолютную и относительную погрешности

$$\langle \Delta L_{21} \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta L_i, \quad \delta L_{21} = \frac{\langle \Delta L_{21} \rangle}{\langle L_{21} \rangle} \cdot 100\%.$$

8. Записать окончательный результат в виде

$$L_{21} = \langle L_{21} \rangle \pm \langle \Delta L_{21} \rangle.$$

**Задание 2.** Изучение влияния взаимного расположения катушек  $L_1$  и  $L_2$  на величины  $\mathcal{E}_{02}$  и  $L_{21}$

1. Установить на выходе генератора действующее значение напряжения  $U_D = 7 \text{ В}$  и частоту генератора  $\nu = 16 \text{ кГц}$ .

2. Изменяя расстояние между катушками от 0 до 3,5 см с интервалом 0,5 см, определить с помощью осциллографа значения  $\mathcal{E}_{02}$ . Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

№	$U_D = 7 \text{ В}, R_I = 680 \text{ Ом}, C_V = \text{--- В/дел}, \nu = 16000 \text{ Гц}$			
	$l, \text{ см}$	$n, \text{ дел}$	$\mathcal{E}_{02}, \text{ В}$	$L_{21}, \text{ Гн}$
1	0			
2	0,5			
3	1,0			
4	1,5			
5	2,0			
6	2,5			
7	3,0			
8	3,5			

3. Рассчитать по формуле (1) значения  $L_{21}$ . Занести в табл.2.

4. Построить графики зависимости  $\mathcal{E}_{02} = f(l)$  и  $L_{21} = f(l)$ .

**Задание 3.** Проверка теоремы взаимности.

1. Поменять катушки  $L_1$  и  $L_2$  местами, т.е. первую катушку подключить к осциллографу, а вторую – к генератору.

2. Установить напряжение на выходе генератора  $U_D = 7 \text{ В}$ .

3. Изменяя частоту генератора в пределах от 8 до 16 кГц с интервалом 4 кГц, определить с помощью осциллографа значения  $\mathcal{E}_{01}$  в катушке  $L_1$ ; результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

№	$U_D = 7 \text{ В}, C_V = \text{--- В/дел}, R_I = 680 \text{ Ом}$				
	$\nu, \text{ Гц}$	$n, \text{ дел}$	$\mathcal{E}_{01}, \text{ В}$	$L_{21}, \text{ Гн}$	$L_{12}, \text{ Гн}$
1					
2					
3					
Среднее значение:					

4. Записать в табл. 3 значения  $L_{21}$  из табл.1 при тех же значениях частоты генератора.

5. Рассчитать по формуле (2) значения  $L_{12}$ , записать их в табл. 3, сравнить с  $L_{21}$  и сделать вывод.

### Контрольные вопросы

1. Запишите формулу для магнитного потока. В каких единицах он измеряется?
2. Что называется электромагнитной индукцией? Самоиндукцией? Взаимоиндукцией?
3. Запишите и сформулируйте основной закон электромагнитной индукции.
4. Сформулируйте правило Ленца.
5. Запишите выражение для ЭДС самоиндукции.
6. От каких факторов зависит индуктивность контура?
7. Дайте определение коэффициента взаимной индукции. В каких единицах он измеряется? От каких факторов зависит?
8. В чем заключается физический смысл единицы измерения 1 Гн?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э14

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

- Цель работы:** 1. Изучение эффекта Холла.  
 2. Исследование основных закономерностей эффекта Холла.  
 3. Расчет концентрации и подвижности основных носителей тока.

**Оборудование:** модуль для изучения эффекта Холла, Ge-полупроводник p-типа, катушка на 600 витков, датчик Холла, источники питания, универсальная установка Кобра 3, Измерительный модуль Тесла.

### Теоретическая часть

В 1879 г. американский физик Эдвин Холл (E.H. Hall) обнаружил следующее явление: если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между параллельными току и полю гранями (рис. 1) возникает разность потенциалов  $U_x = \varphi_2 - \varphi_1$ . Этот эффект впоследствии был назван **эффектом Холла**, а поперечное электрическое поле – полем Холла.

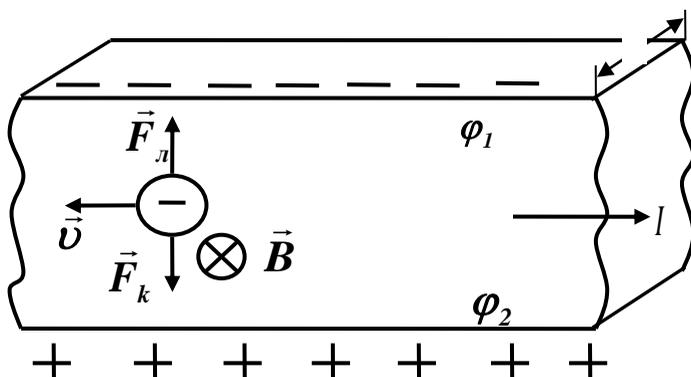


Рис. 1

По пластине, находящейся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , направленной перпендикулярно плоскости рисунка от нас, протекает ток силы  $I$  (см. рис. 1). На электроны, движущиеся со скоростью  $\vec{v}$ , начинает действовать сила Лоренца. Под ее действием электроны смещаются к верхней части проводника, образуя там избыток отрицательных зарядов. В нижней части образуется избыток положительных зарядов. Элек-

трон оказывается под действием силы Кулона со стороны возникшей разности потенциалов. Процесс накопления зарядов на пластине Холла прекращается тогда, когда появляющаяся за счет этого накопления сила Кулона становится равна по модулю силе Лоренца, т.е.  $F_k = F_L$ .

Величина возникающей разности потенциалов определяется выражением

$$\varphi_2 - \varphi_1 = U_x = \frac{I B I}{e n a}, \quad (1)$$

где  $\frac{I}{e n} = R$  – постоянная Холла;  $n$  – концентрация электронов;

$e$  – элементарный заряд;  $B$  – индукция магнитного поля;

$I$  – сила тока;  $a$  – толщина пластины.

Эффект Холла используется в научных исследованиях (например, для исследования топологии поверхности Ферми в металлах, определения концентрации, подвижности и эффективной массы носителей тока в полупроводниках и т.д.), а также в технических устройствах – для измерения индукции магнитных полей, в качестве чувствительных элементов в автоматике, в множительных устройствах, в бесколлекторных двигателях, модуляторах и т.п.

### Описание установки

Установка (рис. 2) содержит модуль 1, в котором находится пластина Холла (рис. 3), измерительный модуль Cobra3 с присоединенным датчиком Холла 2 (см. рис. 2), электромагнит постоянного тока со съемными полюсами 3, блок регулировки силы тока через образец 4, рукоятка 5 позволяет изменять силу тока в обмотках электромагнита.

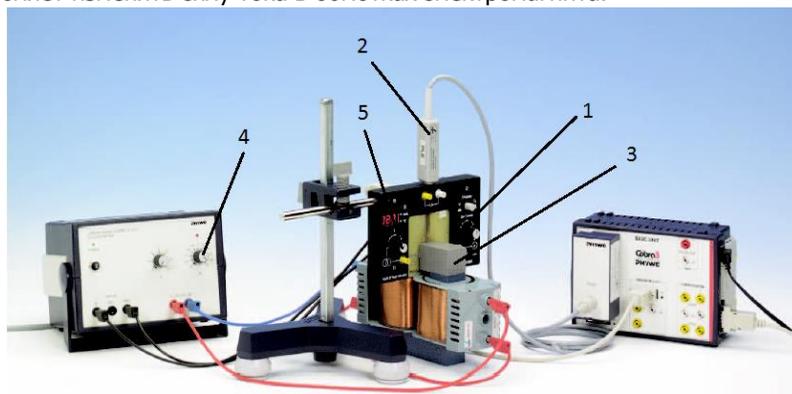


Рис. 2

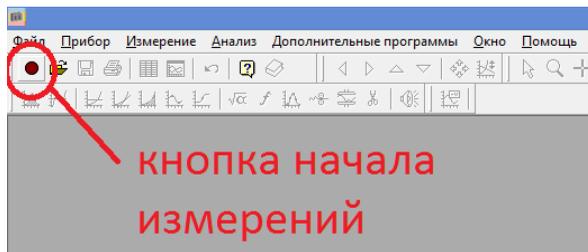


Рис. 3

## Порядок выполнения работы

1. Вставьте в верхнюю часть модуля *1* датчик Холла *2* так, чтобы он находился напротив пластины Холла.
2. Осторожно вставьте модуль *1* с пластиной и датчиком Холла *2* между полюсами магнита *3*, чтобы не повредить кристалл и не погнуть пластину.
3. Контроль за измерениями осуществляется при помощи программного обеспечения. Откройте программу для проведения измерений. Откроется окно (см. рис. 3), в нем нажмите кнопку начала измерений:
4. Перед каждым новым измерением открывается окно выбора параметров измерения (рис. 4), в нем приведены параметры измерения зависимости напряжения Холла от тока в образце:

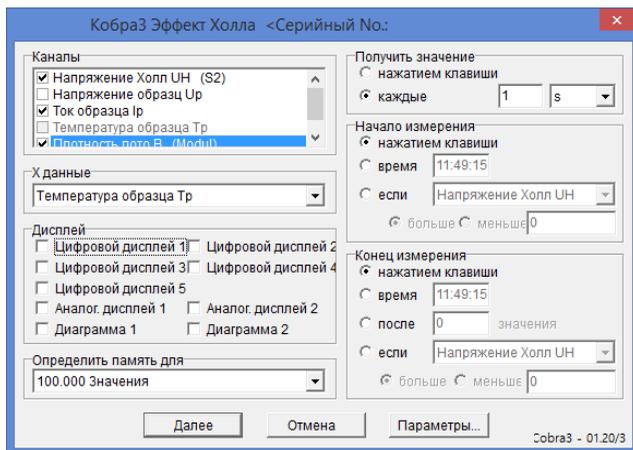


Рис. 4

5. В окошке «Каналы» отметьте пункты измеряемых величин «Напряжение Холл  $U_H$  ( $S_2$ )», «Ток образца  $I_p$ », «Плотность пото  $J$  ( $Modul$ )», что соответствует измерению модуля вектора магнитной ин-

дукции  $\vec{B}$  (рис. 5). В области окна «Дисплей», отметьте «Цифровой дисплей», выбирая нужный канал (из списка отмеченных ранее) в открывшемся окне (см. рис. 5).

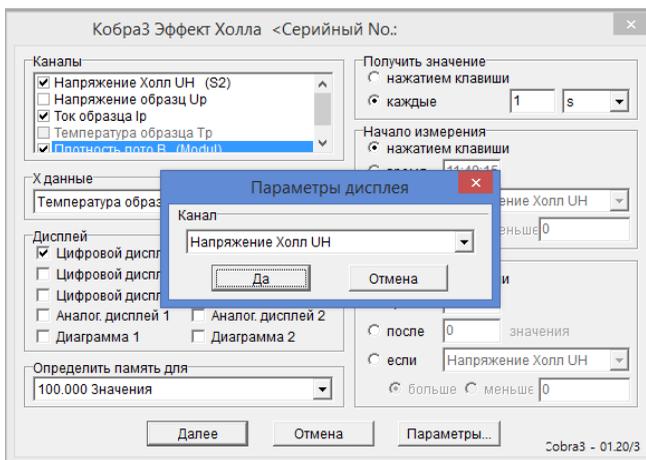


Рис. 5

6. Отметив три дисплея, нажмите кнопку «Далее». Появится окно с выбранными дисплеями, отображающими результаты измерений напряжения Холла УН, тока образца  $I_p$  и индукции  $B$  (рис. 6). Данные для выполнения работы снимаются непосредственно из этого окна.

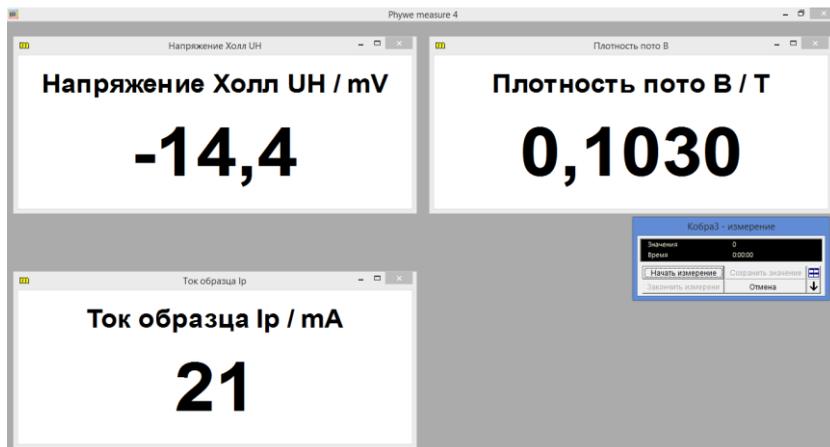


Рис. 6

**Задание 1.** Проверка зависимости напряжения Холла  $U_x$  от индукции магнитного поля  $B$  и силы тока  $I$ .

В соответствии с теорией напряжение Холла

$$U_x = \frac{R \cdot B \cdot I}{a}, \quad (2)$$

т.е. линейно возрастает с ростом  $B$  и  $I$  (здесь  $R$  - постоянная Холла,  $a$  - толщина пластины).

Для экспериментальной проверки этой закономерности необходимо:

1. Снять зависимость  $U_x = f(B)$  при двух значениях тока через пластину Холла  $I$  (значения задаются преподавателем, например  $I = 20$  и  $40$  мА). Индукция магнитного поля регулируется изменением тока в катушках электромагнита ручкой 5 (см. рис. 2). Измеренные и вычисленные значения занести в табл. 1. По данным табл. 1 построить графики зависимости  $U_x = f(B)$ .

Таблица 1

$I, \text{ мА}$	$B, \text{ Тл}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	$U_x, \text{ мВ}$										
	$U_x, \text{ мВ}$										

2. Снять зависимость  $U_x = f(I)$  при двух значениях индукции магнитного поля  $B$  (значения задаются преподавателем, например  $B = 50$  и  $100$  мТл). Ток через образец устанавливается ручкой 4 модуля с пластиной Холла (рис. 2). Измеренные данные занести в табл. 2 и построить графики зависимости  $U_x = f(I)$ .

Таблица 2

$B, \text{ Тл}$	$I_x, \text{ мА}$	15	20	25	30	35	40	45	50
	$U_x, \text{ мВ}$								
	$U_x, \text{ мВ}$								

Проанализировать ход графиков и сравнить их с теоретической формулой (2).

**Задание 2.** Расчет постоянной Холла и концентрации основных носителей тока. (Для выполнения этого задания дополнительных изме-

## Физика

рений не требуется. Используются данные, полученные при выполнении задания 1).

1. Из выражения (2) получаем формулу для расчета постоянной Холла:

$$R = \frac{a \cdot U_x}{B \cdot I}. \quad (3)$$

Для повышения точности измерений вместо отношений  $\frac{U_x}{B}$  и  $\frac{U_x}{I}$  использовать величины  $\frac{\Delta U_x}{\Delta B}$  и  $\frac{\Delta U_x}{\Delta I}$ , найденные из графиков  $U_x = f(B)$  и  $U_x = f(I)$ . Получить два значения  $R$  из графиков  $U_x = f(B)$  и два значения из графиков  $U_x = f(I)$ . По полученным четырем значениям  $R$  найти среднее значение  $\langle R \rangle$ , абсолютную  $\Delta R$  и относительную  $\delta R$  погрешности. Результаты занести в табл. 3.

Таблица 3

-	$\Delta U_x$	$\Delta B$	$R$	$\Delta R$	$\delta R$	
[ ]	$B$	$Tл$	$м^3 / Кл$	$м^3 / Кл$	%	
1					X	
2						
-	$\Delta U_x$	$\Delta I$	$R$	$\Delta R$		
-	$B$	$A$	$м^3 / Кл$	$м^3 / Кл$		
3						
4						
Средние значения						

Из сопоставления формул (1) и (2) получаем выражение для концентрации  $n$  носителей тока.

$$n = \frac{I}{e R}. \quad (4)$$

По формуле (4), рассчитать концентрацию носителей тока  $n$ , используя среднее значение  $\langle R \rangle$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется силой Лоренца? Как определить ее направление? От каких величин она зависит?
2. Что такое индукция магнитного поля. Единицы измерения.
3. Дать определение эффекта Холла.
4. Пояснить механизм возникновения ЭДС Холла в металлах.
5. Указать, от каких причин зависит постоянная Холла в металлах.
6. Объяснить, чем отличается возникновение ЭДС Холла в металлах и полупроводниках?
7. От каких величин зависит постоянная Холла в полупроводниках?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2015. – 542 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 2010. – Т. 2.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. – М.: АСТ, 2008. – 368 с.