

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

# ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторным работам  
№ 2--15, 2--25

Составители: Л. П. Муркин, Л. А. Полякова

УДК 530(075.8)

*Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях: Метод. указания / Сост. Л. П. Муркин, Л. А. Полякова; Кузб. акад. ин-т, Кузбассов, 1988. 18 с.*

Лабораторные работы содержат: сведения о физических законах движения заряженных частиц в полях и о практическом применении этих законов для определения удельного заряда электрона (работа 2—15), для изучения эффекта Холла (работа 2—25); схемы экспериментальных установок; методические указания о порядке выполнения работ в обработке экспериментальных данных.

Лабораторные работы предназначены для выполнения студентами всех факультетов КуАИ.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: определение удельного заряда электрона, т. е. отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона. Этот метод получил свое название вследствие того, что конфигурация применяемых здесь электрического и магнитного полей похожа на конфигурацию полей в магнетроне — электронной лампе, используемой в технике СВЧ.

Приборы и принадлежности: панель с соленоидом, внутри которого установлен триод, амперметр, миллиамперметр.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА МАГНЕТРОНА

Основным элементом используемой в работе экспериментальной установки является электровакуумная лампа (рис. 1), в которой катод 3 выполнен в виде двух близко расположенных параллельных нитей, а анод 2 представляет собой цилиндрическую обечайку, ось которой совпадает с катодом. Электровакуумная лампа с описанной осесимметричной системой электродов помещена в соленоид 1.

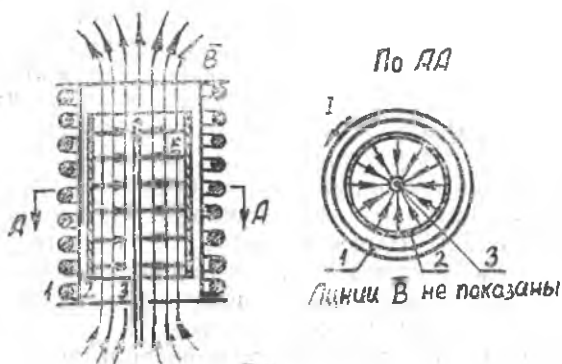


Рис. 1

Если к аноду приложить положительный потенциал относительно катода, то в пространстве между катодом и анодом появится электрическое поле, силовые линии которого будут направлены от анода к катоду (толстые линии на рис. 1).

При пропускании тока по обмотке соленоида возникает магнитное поле, силовые линии которого направлены по оси симметрии электродов (тонкие линии на рис. 1). Таким образом, электроны, испускаемые катодом, окажутся в области электрического и магнитного полей, причем  $\vec{E} \perp \vec{B}$  во всех точках этой области.

Известно, что движение электронов определяется силой Лоренца:

$$F = eE + e[\vec{v}, B], \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\vec{v}$  — скорость электрона;  $\vec{E}$  — напряженность электрического поля;  $B$  — индукция магнитного поля. В формуле (1) первое слагаемое определяет электрическую силу  $F_e$ , обусловленную действием электрического поля на заряженную частицу, второе слагаемое определяет магнитную силу  $F_m$ , обусловленную действием магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

В зависимости от соотношения между  $F_e$  и  $F_m$  изменяются траектории движения электронов от катода к аноду, а следовательно, изменяется и анодный ток. При  $F_e \gg F_m$  траектории электронов слегка искривляются, однако на анод электроны все же попадают и анодный ток практически не изменяется (рис. 2,а).

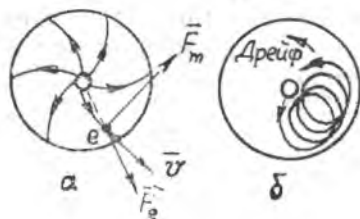


Рис. 2

Если увеличивать  $B$ , то кривизна траектории электронов возрастает. При некотором значении магнитной индукции  $B_{кр}$ , называемом «критическим значением», электроны перестают попадать на анод (рис. 2,б) и анодный ток резко уменьшается. Этот эффект наблюдается, когда  $F_e \ll F_m$ , т. е. определяющей в движении электронов будет являться магнитная сила  $F_m = e[\vec{v}, B]$ . Эта сила перпендикулярна к скорости и, следовательно, играет роль центробежной силы.

В результате электроны будут двигаться по траекториям, близким к окружности с радиусом  $r = R_a/2$  ( $R_a$  — радиус анода, который для примененной лампы намного больше радиуса катода). Электрическая сила в рассмотренном случае (т. е. при  $F_e \ll F_m$ ) вызывает относительно медленное смещение траектории в направлении, перпендикулярном радиусу. Это движение называется электрическим дрейфом.

Для получения расчетной формулы воспользуемся уравнением

$$eU_a = mv^2/2, \quad (2)$$

где  $U_a$  — анодное напряжение;  $v$  — скорость электрона вблизи анода.

Следует отметить, что магнитная составляющая силы Лоренца

работы не совершает, поэтому она и не входит в формулу (2). С другой стороны, для вращающегося электрона можно записать уравнение динамики в виде  $F_{цс} = mv^2/r$ , где  $F_{цс}$  — центробежная сила.

В изучаемой задаче  $F_{цс} = evB_{кр}$  (так как  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ). Поэтому  $evB_{кр} = mv^2/r$ .

Воспользовавшись условием  $r = R_a/2$ , последнее уравнение можно переписать следующим образом:

$$eB_{кр} = 2mv/R_a. \quad (3)$$

Исключив  $v$  из выражений (2) и (3) и преобразовав их, получим окончательную расчетную формулу

$$e/m = 8U_a/B_{кр}^2 R_a^2. \quad (4)$$

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Соленоид, внутри которого находится электровакуумная лампа, укреплен на горизонтальной панели (рис. 3).

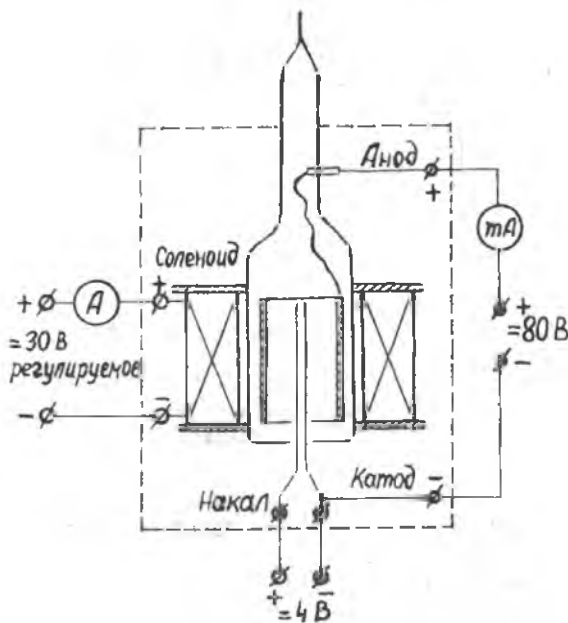


Рис. 3

Анод, катод, накал, а также выводы обмотки соленоида присоединены к соответствующим клеммам панели.

Питание лампы и соленоида производится от клемм распределительного щитка. Регулировка тока в соленоиде осуществляется с помощью автотрансформатора, ручка управления которым выведена на лабораторный стол. Анодное напряжение постоянно:

$$U_a = 80 \text{ В.}$$

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 3.
2. Установить ручку регулировки тока в соленоиде в крайнее левое положение, соответствующее минимуму этого тока.
3. Включить накал лампы и после прогрева лампы (~1 мин) включить анодное напряжение.
4. Увеличивая постепенно ток соленоида  $I_c$  через 0,1 А, записывать соответствующие значения анодного тока  $I_a$ , что необходимо для построения так называемой «сбросовой характеристики», т. е. зависимости  $I_a = f(I_c)$ .
5. Повторить все изменения при уменьшении тока в соленоиде. Полученные результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

При увеличении $I_c$		При уменьшении $I_c$	
$I_c, \text{А}$	$I_a, \text{мА}$	$I_c, \text{А}$	$I_a, \text{мА}$

#### ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 нанести на лист миллиметровой бумаги экспериментальные точки и построить сбросовую характеристику так, чтобы отклонения экспериментальных точек от нее были минимальны (рис. 4).

2. Определить ток соленоида  $I_{кр}$ , соответствующий наиболее резкому уменьшению тока лампы и, следовательно, наибольшему значению модуля производной  $dI_a/dI_c$  сбросовой характеристики. Для этого следует произвести графическое дифференцирование, т. е. для каждого интервала  $\Delta I_c = 0,1 \text{ А}$  определить приращение анодного тока  $\Delta I_a$ , а затем вычислить  $f' \approx |\Delta I_a / \Delta I_c|$ . Рассчитанные значения производных  $f'$  следует отнести к центральной точке соответствующего интервала изменения  $I_c$ .

Пример: Пусть в результате эксперимента получились ре-

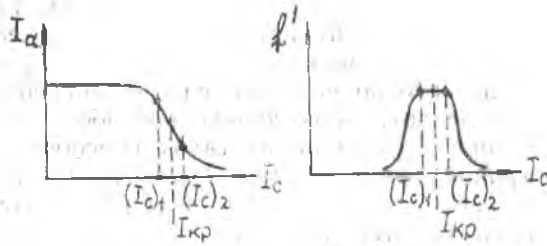


Рис. 4

зультаты (взяты только две точки): при  $I_c = 0,8 \text{ A}$   $I_a = 32 \text{ mA}$ ;  
при  $I_c = 0,9 \text{ A}$   $I_a = 20 \text{ mA}$ .

Тогда  $f' \approx \left| \frac{20-32}{0,9-0,8} \right| = 120 \text{ mA/A}$ , и это значение производной соответствует центральной точке выбранного интервала, т. е.

$$I_c = \frac{0,8+0,9}{2} = 0,85 \text{ A}.$$

Данные вычислений  $f'$  и  $I_c$  (в примере  $f' = 120 \text{ mA/A}$  и  $I_c = 0,85 \text{ A}$ ) для всех интервалов  $I_c$ , как для цикла измерений при увеличении  $I_c$ , так и для цикла измерений при уменьшении  $I_c$ , записать в табл. 2.

3. Построить на одном листе со сбросовой характеристикой график  $f' = F(I_c)$ . По максимуму построенной кривой определить значение  $I_{кр}$ .

Таблица 2

При увеличении $I_c$		При уменьшении $I_c$	
$I_c, \text{ A}$	$f', \text{ mA/A}$	$I_c, \text{ A}$	$f', \text{ mA/A}$

4. Рассчитать значение  $B_{кр}$ . Расчет  $B_{кр}$  следует провести по формуле

$$B_{кр} = \mu_0 n I_{кр} L / \sqrt{L^2 + d^2}$$

где  $n$  — число витков на единицу длины соленоида,  
 $\mu_0$  — магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл/м}$ ),  
 $L$  — длина соленоида,  
 $d$  — диаметр соленоида.

5. Рассчитать  $e/m$  по формуле (4).

6. Оценить абсолютную и относительную погрешности определения  $e/m$ .

Анализ работы показывает, что наибольший вклад в погрешность определения  $e/m$  вносит погрешность нахождения  $I_{кр}$  и, следовательно,  $B_{кр}$ , поскольку критический ток  $I_{кр}$  определяется по графику с достаточно плавным спадом сбросовой характеристики. Можно предложить несколько способов оценки неопределенности в выборе  $I_{кр}$ . Один из таких способов заключается в нахождении границ прямолинейного участка на графике  $I_a = f(I_c)$ . Этому участку на графике  $f' = F(I_c)$  соответствует плоская вершина максимума (см. рис. 4).

После нахождения границ прямолинейного участка  $(I_c)_1$  и  $(I_c)_2$  можно дать оценку  $\Delta I_{кр}$  в виде

$$\Delta I_{кр} = \frac{(I_c)_2 - (I_c)_1}{2} \quad (5)$$

Из формулы (4) можно получить выражение для относительной погрешности  $e/m$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta(e/m)}{e/m} = 2 \frac{\Delta B_{кр}}{B_{кр}},$$

но так как  $B_{кр} \sim I_{кр}$ , то последняя формула преобразуется к виду

$$\varepsilon = \frac{\Delta(e/m)}{e/m} = 2 \frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}} \quad (6)$$

или в процентах  $\varepsilon = 2 \frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}} \cdot 100\%$ .

Абсолютная погрешность  $e/m$  определяется по формуле, следующей из (6):

$$\Delta(e/m) = \varepsilon \cdot (e/m). \quad (7)$$

7. Записать окончательный результат в виде

$$(e/m)_{экспер} = e/m \pm \Delta(e/m), \quad \varepsilon = \dots \%$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

1. Запишите выражение для силы Лоренца и укажите направление этой силы относительно остальных множителей определяющего выражения.

2. Дайте описание метода магнетрона для определения удельного заряда электрона.

3. Выведите основную расчетную формулу, используемую в работе.

4. Почему магнитная составляющая сила Лоренца не совершает работы?

5. Как изменяются траектории электронов при увеличении тока в соленоиде?



6. Начертите принципиальную схему экспериментальной установки и дайте описание порядка выполнения работы.

#### *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. — М.: Наука, 1978, гл. X, § 72, 73, 74.
2. Методы физических измерений. — Новосибирск: Наука, 1975, работа № 17. С. 98—103.

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: построение градуировочного графика для датчика Холла; определение постоянной Холла для материала, из которого изготовлен датчик, и расчет концентрации носителей тока в этом материале; экспериментальное определение зависимости  $B = f(B_0)$  материала тороидального магнита с помощью датчика Холла и сравнение результатов теории и эксперимента.

Приборы и принадлежности: устройство, содержащее пластинку с датчиком Холла, соленоид и тороидальный электромагнит; блок питания УНИП-5; потенциометр ПП-63; два миллиамперметра.

### ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Сущность эффекта Холла, который относится к так называемым гальваномагнитным явлениям, заключается в следующем: если поместить проводник, выполненный, например, в виде прямоугольной пластинки (рис. 1), в магнитное поле, перпендикулярное линиям тока  $I$ , то между гранями, параллельными плоскости  $B - I$ , возникает ЭДС. В частности, если при отсутствии магнитного поля разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, то при наложении поперечного магнитного поля  $\Phi_1 - \Phi_2 \neq 0$ .

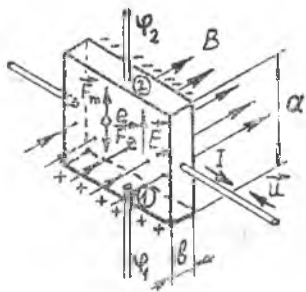


Рис. 1

Эффект Холла объясняется следующим образом: носители тока в проводнике имеют скорость упорядоченного движения  $\vec{u}$ , поэтому в магнитном поле на них будет действовать сила Лоренца

$$F_m = e [\vec{u}, B],$$

в результате чего у верхней грани (см. рис. 1, где принято, что носители тока — электроны) образуется избыток отрицательных зарядов, а у нижней грани — избыток положительных зарядов. Таким образом, в проводнике появляется поперечное электриче-

ское поле  $F_d$ , препятствующее действию силы Лоренца.

Установившееся распределение зарядов достигается при равновесии сил, действующих на носители тока:

$$\bar{F}_m = \bar{F}_e \quad \text{или} \quad euB = eE_d. \quad (1)$$

Выражение (1) получено с использованием условий  $\bar{y} \perp B$ ,  $\bar{F}_m \parallel F_e$ , справедливых для выбранных направлений магнитного поля и тока.

Скорость упорядоченного движения  $\bar{y}$  можно найти, используя формулу

$$I = enuS, \quad (2)$$

где  $S = ab$  — площадь поперечного сечения проводника.

$n$  — концентрация носителей тока.

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  определяется выражением  $\varphi_1 - \varphi_2 = E_d a$ .

Подставив сюда  $E_d$  из формулы (1), получим

$$\varphi_1 - \varphi_2 = uBa, \quad (3)$$

после чего, исключая  $u$  из (2) и (3), найдем окончательную формулу, определяющую количественно эффект Холла:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{en} \frac{IB}{b} = R \frac{IB}{b}. \quad (4)$$

Величина  $R = 1/en$  называется постоянной Холла для данного вещества. Определив экспериментально значение и знак постоянной Холла, можно рассчитать концентрацию носителей и установить знак их заряда.

#### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исследуемый датчик Холла находится на пластине из оргстекла, которая закреплена на оси переключателя. Переключатель может быть установлен в трех положениях:

положение 1 — датчик Холла введен в магнитное поле соленоида,

положение 2 — датчик Холла выведен из магнитного поля,

положение 3 — датчик Холла введен в прорезь сердечника тороидального электромагнита.

Переключатель, соленоид и электромагнит закреплены на вертикальной панели, выполненной из алюминия. Вся конструкция закрыта крышкой с прозрачными стенками. На верхнюю панель крышки выведены: две клеммы питания обмотки соленоида и электромагнита, которые обозначены « $\pm 15$  В» с указанием полярности; две клеммы, предназначенные для подвода тока к датчику Холла, обозначены « $-I$ » и « $+I$ »; две клеммы, на которых появляется разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  обусловленная эффек-

том Холла. Эти клеммы обозначены « $-U$ » и « $+U$ ». Электрическая схема устройства перемещения датчика Холла вместе с соленоидом и электромагнитом приведена на рис. 2.

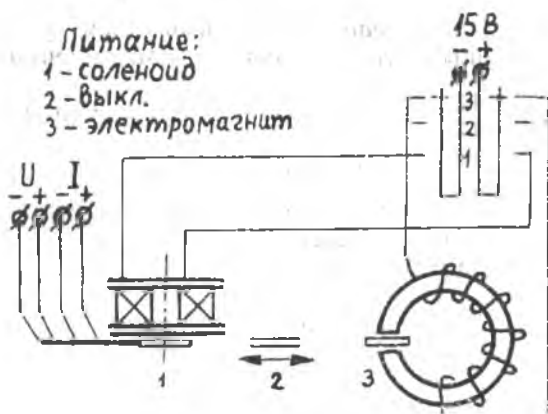


Рис. 2

Измерительная система включает в себя: устройство, содержащее пластинку с датчиком Холла, соленоид и электромагнит; блок питания УНИП-5; потенциометр ПП-63; миллиамперметр с пределом измерения 0...250 мА для определения значений силы тока в обмотках соленоида или электромагнита, миллиамперметр с пределом измерения 0...10 мА для установки рабочего тока датчика Холла.

Схема соединений в измерительной схеме показана на рис. 3. Рабочий ток датчика Холла устанавливается с помощью переменного резистора 12, ручка которого выведена на переднюю панель УНИП-5. Ток в обмотках соленоида и магнита регулируется с помощью переменного резистора 13. Каждый резистор расположен над соответствующей парой выходных клемм блока УНИП-5.

#### ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОТЕНЦИОМЕТРА ПП-63

Потенциометр ПП-63 позволяет измерять напряжения в интервале 0...100 мВ. Верхняя панель потенциометра показана на рис. 3. Перед началом измерений необходимо подготовить потенциометр к работе в следующем порядке:

1. Установить переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «ПОТЕНЦ.», тумблер 2 в положение «+».

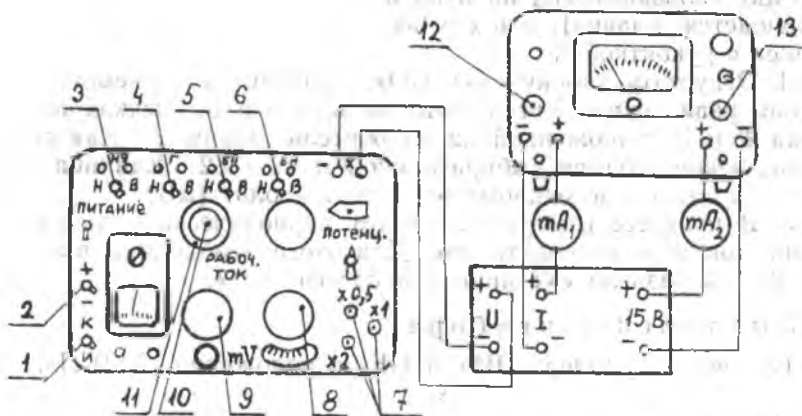


Рис. 3

2. Установить штекер множителя шкалы 7 в положение « $\times 2$ ». Это означает, что показания по шкалам потенциометра необходимо умножать на 2.
3. Установить тумблеры 3, 4, 5, 6 в положение «В».
4. С помощью ручек 8 и 9 установить нули в соответствующих окошечках под ручками.
5. Подключить измеряемое напряжение к клеммам «X», с соблюдением полярности: левая клемма «X» имеет полярность «—».

### РАБОТА С ПОТЕНЦИОМЕТРОМ

#### Установка рабочего тока

1. Перевести тумблер «ПИТАНИЕ» в положение «ВКЛ».
2. Установить тумблер 1 в положение «К» (контроль).
3. Нажав на кнопку «ГРУБО» и удерживая ее в нажатом положении, установить стрелку гальванометра на нуль путем вращения рукоятки 10 «РАБОЧИЙ ТОК».
4. Отпустить кнопку «ГРУБО» и, нажав кнопку «ТОЧНО», окончательно установить стрелку гальванометра на нуль путем вращения рукоятки 11 «РАБОЧИЙ ТОК» (плавная регулировка рабочего тока). Отпустить кнопку «ТОЧНО».

#### Измерение

1. Переключить тумблер 1 в положение «И» (измерение).
2. Нажав на кнопку «ГРУБО», установить стрелку гальванометра на нуль путем вращения рукоятки 9 (перемещается ступенчато). Отпустить кнопку «ГРУБО».
3. Нажав на кнопку «ТОЧНО», окончательно установить

стрелку гальванометра на нуль путем вращения рукоятки 8 (перемещается плавно), а в случае необходимости можно пользоваться и рукояткой 9.

4. Отпустить кнопку «ТОЧНО». Значение измеряемого напряжения равно сумме чисел, которые видны в окошечках под ручками 8 и 9, умноженной на множитель шкалы 7. Как сказано выше, рекомендуется выбирать множитель « $\times 2$ ». Единица напряжения в данном потенциометре — милливольт (мВ).

5. В процессе измерений следует периодически проверять рабочий ток и регулировать его. Для этого необходимо выполнить пп. 2, 3, 4 раздела «Установка рабочего тока».

Выключение прибора

Перевести тумблер «ПИТАНИЕ» в положение «ВЫКЛ».

### Упражнение 1. Построение градуировочного графика. Определение постоянной Холла

1. Собрать схему согласно рис. 3, соблюдая полярность при подключении источника питания и потенциометра.

2. Установить переменные резисторы блока питания в положения, соответствующие минимуму выходного напряжения, т.е. повернуть ручки 12 и 13 резисторов против часовой стрелки до упора. Ручкой переключателя установить датчик Холла в положение «ВЫКЛ».

3. Включить блок питания УНИП-5. Установить рекомендуемое значение рабочего тока через датчик Холла. При всех дальнейших измерениях рабочий ток должен оставаться постоянным.

4. Определить с помощью потенциометра начальную разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ . (Примечание: в дальнейшем холловская разность потенциалов будет обозначаться буквой  $U$ ). Наличие этой величины объясняется технологией изготовления датчика: трудно приварить к материалу датчика потенциальные выводы так, чтобы они находились на одной эквипотенциальной поверхности. Поэтому отсчет холловской разности потенциалов ведется от начального значения  $U_0$ .

5. Перевести датчик Холла в положение «СОЛЕНОИД». Установить ток через соленоид, равный 50 мА. С помощью потенциометра определить разность потенциалов  $U$  при установленном токе  $I_c$ .

6. Увеличить ток  $I_c$  и измерить новое значение  $U$ . Измерения проводить до максимально возможного на данной установке значения  $I_c$ , но не более 200 мА.

7. Результаты измерений, а также параметры датчика и установки записать в табл. 1.

8. После завершения измерений уменьшить значение  $I_c$  до минимально возможного.

Таблица 1

Параметры датчика и установки			Результаты эксперимента			Результаты расчета				
$b$ , мм	$I_{\text{раб}}$ , мА	$n_c$ , м <sup>-1</sup>	$U_0$ , мВ	$I_c$ , мА	$U$ , мВ	$\Delta U$ , мВ	$B$ , Тесла	$S_B$ , мВ/Тл	$R$ , м <sup>3</sup> /Кл	$n$ , м <sup>-3</sup>
			Одно значение					Одно значение	Одно значение	Одно значение

### Обработка результатов измерений упражнения 1

1. Вычислить холловскую разность потенциалов  $\Delta U = U - U_0$  для каждого значения  $I_c$  и записать ее в табл. 1.

2. Магнитная индукция в сечении, где находится плоский датчик Холла, рассчитывается по формуле для соленоида конечной длины:

$$B = \mu_0 n_c I_c \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{2},$$

где  $n_c$  — число витков на единицу длины соленоида,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная,

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы, под которыми видны сечения соленоида из точки, где находится датчик Холла.

Для бесконечно длинного соленоида  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 180^\circ$  и угловой множитель  $(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)/2$  равен 1. В данной установке, с учетом конечной толщины намотки, угловой множитель равен 0,3. Таким образом, расчет магнитной индукции, действующей на датчик Холла, должен производиться по формуле

$$B = 0,3 \mu_0 n_c I_c. \quad (5)$$

Результаты расчета  $B$  для каждого значения тока соленоида записать в табл. 1.

3. Построить градуировочный график, т. е. зависимость  $\Delta U = f(B)$ , который должен представлять собой прямую, проходящую через начало координат.

4. Используя градуировочный график, определить чувствительность датчика Холла  $S_B$  в мВ/Тесла, т. е. величину

$$S_B = \Delta U / B. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что чувствительностью датчика называется величина, численно равная холловской разности по-

тенциалов при действии поперечного магнитного поля с магнитной индукцией 1 Тесла.

Следует иметь в виду, что  $S_B$  зависит от рабочего тока датчика, чем больше рабочий ток, тем выше  $S_B$ .

Однако при больших токах датчик будет нагреваться, что может привести к появлению паразитных термоЭДС. Поэтому следует устанавливать и поддерживать указанный на панели рабочий ток.

5. Рассчитать постоянную Холла в м<sup>3</sup>/Кулон по формуле

$$R = \frac{\Delta U}{B} \frac{b}{I_{\text{раб}}} = S_B \cdot \frac{b}{I_{\text{раб}}}, \quad (7)$$

которая может быть получена из выражения (4). При расчете обратить внимание на правильный переход к основным единицам величин, которые входят в формулу (7).

6. Вычислить концентрацию носителей тока  $n$ :

$$n = 1/eR,$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кулон — элементарный заряд.

### Упражнение 2.

#### Определение характеристики электромагнита

1. Переставить пластину с датчиком Холла в зазор тороидального магнита.

2. Провести измерения ряда значений силы тока  $I_T$  в обмотке магнита и соответствующих значений  $U$  аналогично измерениям, описанным в упражнении 1.

3. Результаты измерений, а также параметры датчика и электромагнита записать в табл. 2.

Таблица 2

Параметры датчика и электромагнита				Результаты эксперимента			Результаты расчета			
$S_B$ , мВ/Тл	$n_T$ , м <sup>-1</sup>	$L_{HJ}$ , мм	$h$ , мм	$U_0$ , мВ	$I_T$ , мА	$U$ , мВ	$\Delta U$ , мВ	$B$ , Тесла	$B_0$ , Тесла	$B_{\text{теор}}$ , Тесла
				Одно значение						

#### Обработка результатов измерений упражнения 2

1. Вычислить холловскую разность потенциалов  $\Delta U = U - U_0$  для каждого значения  $I_T$ .



2. Рассчитать магнитную индукцию в зазоре электромагнита по формуле

$$B = \Delta U / S_B, .$$

которая следует из формулы (6).

3. Рассчитать магнитную индукцию  $B_0$ , создаваемую обмоткой электромагнита

$$B_0 = \mu_0 n_T I_T . \quad (8)$$

Результаты расчетов занести в табл. 2.

4. По данным расчетов построить график искомой характеристики электромагнита, т. е. график зависимости магнитной индукции в зазоре от магнитной индукции намагничивающего поля  $B = f(B_0)$ . Особенностью экспериментально полученной функции  $B = f(B_0)$  является наличие остаточной магнитной индукции  $B_r$ , которая определяется как магнитная индукция при  $I_T = 0$  (т. е.  $B_0 = 0$ ). Графически  $B_r$  равна отрезку, отсекаемому на оси  $B$  построенным графиком с учетом масштаба при его экстраполяции на  $I_T = 0$ . В этом же координатном поле следует построить график теоретической характеристики электромагнита с учетом остаточной намагниченности:

$$B = B_0 \frac{L_{II}}{L} + B_r . \quad (9)$$

Вывод формулы (9) приведен ниже.

5. Определить степень расхождения результатов теории и эксперимента.

#### *Расчет теоретической характеристики электромагнита*

Расчетная схема тороидального электромагнита показана на рис. 4.

Приняты следующие обозначения:  $h$  — ширина зазора в сердечнике магнита;  $L_{II}$  — длина участка сердечника, покрытого обмоткой;  $N$  — число витков в обмотке;  $H$  и  $B$  соответственно напряженность поля и магнитная индукция в зазоре магнита;  $H_M$  и  $B_M$  соответственно напряженность поля и магнитная индукция в сердечнике;  $L$  — полная длина сердечника магнита по средней линии;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

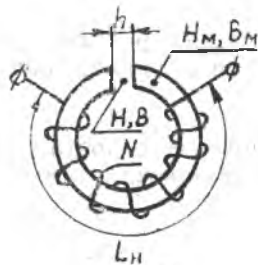


Рис. 4

Применение теоремы о циркуляции напряженности магнитного поля к рассматриваемому электромагниту дает следующее выражение:

$$Hh + H_m(L - h) = NI_T. \quad (10)$$

Перейдем к магнитной индукции, используя материальные уравнения:

$$H = B/\mu_0, \quad H_m = B_m/\mu\mu_0, \quad (11)$$

где принято, что  $\mu$  для воздуха равно 1. Если размеры зазора малы по сравнению с размерами сердечника, то магнитный поток через поперечное сечение  $S$  зазора равен магнитному потоку через поперечное сечение  $S_m$  тороидального магнита, т. е.

$$BS = B_m S_m.$$

С достаточной степенью точности можно считать, что  $S = S_m$  и тогда  $B = B_m$ . Воспользовавшись полученным результатом и учитывая уравнения (11), можно преобразовать формулу (10) следующим образом:

$$\frac{Bh}{\mu_0} + \frac{B_m(L-h)}{\mu\mu_0} = NI_T,$$

откуда находится  $B$ :

$$\frac{B}{\mu_0} \left[ h + \frac{L-h}{\mu} \right] = NI_T; \quad B = \frac{\mu_0 NI_T}{h + (L-h)/\mu}. \quad (12)$$

Число витков может быть найдено по формуле

$$N = n_T L_n. \quad (13)$$

После подстановки (13) в формулу (12) получим

$$B = \frac{\mu_0 n_T I_T L_n}{h + (L-h)/\mu}.$$

С учетом выражения (8) окончательная формула для теоретической характеристики электромагнита примет вид

$$B = B_0 \frac{L_n}{h + (L-h)/\mu}. \quad (14)$$

Так как  $\mu \sim 10^3$ , то при установленных параметрах установки  $L_n$ ,  $L_n$  и  $h$  справедливо соотношение

$$h \gg (L-h)/\mu.$$

Поэтому с достаточной точностью можно записать уравнение характеристики электромагнита в следующем виде:

$$B = B_0 \frac{L_n}{h}. \quad (15)$$

Если же магнит обладает остаточной намагниченностью  $B_r$ , то формула (15) переходит в выражение

$$B = B_0 \frac{L_n}{h} + B_r.$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте описание и физическое объяснение эффекта Холла.
2. Укажите направление силы Лоренца по отношению к скорости частицы и магнитной индукции поля.
3. По какому закону будет изменяться холловская разность потенциалов, если рабочий ток через датчик изменять по синусоидальному закону?
4. Что называется постоянной Холла? От чего зависит знак этой величины?
5. Что называется чувствительностью датчика?
6. Дайте описание порядка выполнения упражнений.
7. Вывести формулу для теоретической характеристики электромагнита.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. — М.: Наука. 1973, гл. XI, § 79.

*Муркин Леонид Павлович,  
Полякова Людмила Александровна*

## ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Редактор Т. К. Кр е т и н и н а  
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к  
Корректор Н. С. К у п р я н о в а

Подписано в печать 10.03.89 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. п. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,93. Т. 2000 экз.  
Заказ 141. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева.  
443001, Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,  
443001, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.