

Лабораторная работа №337

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Приборы и принадлежности: датчик Холла, электромагнит, два источника питания постоянного тока, милливеберметр, миллиамперметр, цифровой вольтметр.

Введение. Одним из наиболее интересных *гальваномагнитных* явлений как в смысле доступности наблюдения, так и тех выводов, которые с помощью его могут быть сделаны, является так называемый *эффект Холла*. Он заключается в возникновении в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, электродвижущей силы. Это явление впервые наблюдал в 1879 г. американский физик Холл (E.G.Hall, 1855-1938). Открытое им явление получило следующее объяснение в рамках электронной теории электропроводности.

Рассмотрим металлическую (или полупроводниковую) пластинку в форме прямоугольного параллелепипеда, по которой течет ток i , находящуюся в поперечном магнитном поле с индукцией \vec{B} (рис.1). Согласно электронной теории электропроводности твердых тел ток представляет собой направленно движущийся поток заряженных частиц – носителей тока (электронов или дырок). Среднюю скорость их движения можно вычислить следующим образом:

$$\vec{v} = \frac{\vec{j}}{ne}, \quad v = \frac{i}{neab}, \quad (1)$$

где $j = \frac{i}{ab}$ – плотность тока,

n – концентрация носителей тока,

e – заряд одной частицы (алгебраическая величина),

a и b – размеры поперечного сечения образца.

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует *сила Лоренца* (голландский физик H.A.Lorentz, 1853-1928)

$$\vec{F}_m = e\vec{v} \times \vec{B}.$$

Пусть образец ориентирован в *магнитном* поле так, как это показано на рис.1. Раскрывая написанное выше векторное произведение, можно убедиться, что только z -компонента силы Лоренца отлична от нуля

$$F_{mz} = -ev_y B_x. \quad (2)$$

Если носителями тока являются положительные частицы ($e > 0$), то направление их скорости \vec{v} совпадает с направлением тока (рис.1)¹. Если же носители тока имеют отрицательный заряд ($e < 0$), то их скорость противоположна току (рис.2). Но в том и другом случае сила Лоренца \vec{F}_m направлена в одну сторону – в данном случае вверх. В результате действия этой силы концентрация заряженных частиц на верхней грани параллелепипеда возрастает, только в первом случае – положительных, а во втором – отрицательных. Это приводит к появлению разности потенциалов между верхней и нижней гранями. За счет такой разности потенциалов возникает электрическое поле напряженностью \vec{E}_H , которое будет действовать на заряженные частицы с силой

$$\vec{F}_e = e\vec{E}_H. \quad (3)$$

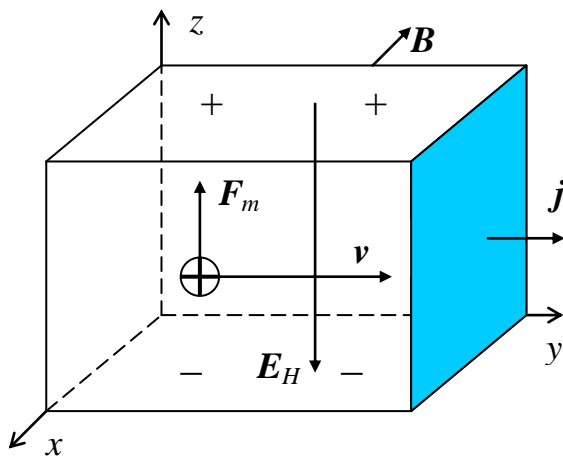


Рис.1

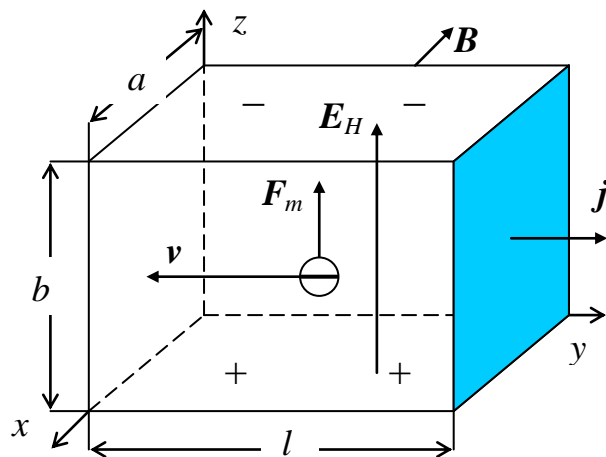


Рис.2

Сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля F_e , направлена противоположно магнитной силе F_m . (Не учтена сила, действующая со стороны источника тока и вынуждающая носители тока участвовать в процессе токообразования).

Таким образом, на каждую частицу (носитель тока) действует сумма сил

$$\vec{F} = \vec{F}_m + \vec{F}_e.$$

В проекции на ось z в первом случае (рис.1) уравнение таково:

$$F_z = F_{mz} - F_{ez}.$$

Процесс увеличения концентрации носителей тока на верхней грани образца прекратится, когда F_z обратится в нуль, т.е.

$$evB - eE_H = 0.$$

¹ На рисунках 1 и 2 векторные величины обозначены жирным шрифтом, скалярные – светлым.

Соответствующая этому условию разность потенциалов между верхней и нижней гранями, если они не замкнуты внешней цепью, составляет ЭДС Холла.

$$\varepsilon_H = bE_H = bvB.$$

Подставляя выражение (1) для скорости, получим

$$\varepsilon_H = \frac{iB}{ena} = R_H \frac{iB}{a}. \quad (4)$$

Величина $R_H = 1/en$ называется *постоянной Холла*. Она зависит от свойств вещества. По ее знаку можно определить знак носителей тока в образце, а по величине – их концентрацию.

Более строгий подход, учитывающий распределение носителей тока по скоростям, дает следующее выражение для постоянной Холла:

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en}. \quad (5)$$

Наряду с концентрацией носителей можно определить их подвижность. *Подвижностью* v_0 называется средняя скорость, которую приобретают носители тока под действием электрического поля напряженностью 1 В/м, созданного источником рабочего тока,

$$v_0 = \bar{v}/E_0. \quad (6)$$

Так как $i = \sigma E_0 ab$, а из формулы (5) $1/en = (8/3\pi)R_H$, то подвижность носителей тока получится следующей:

$$v_0 = \frac{8}{3\pi} \sigma R_H, \quad (7)$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная электропроводность вещества.

Целью данной лабораторной работы является определение постоянной Холла, определение концентрации носителей тока и их подвижности.

Описание установки. В качестве объекта исследования взят датчик Холла, выпускаемый промышленностью. Он состоит из полупроводникового кристалла кремния, оборудованного двумя парами электрических контактов, расположенными в двух ортогональных плоскостях. Через одну пару контактов пропускают рабочий ток i , а с другой пары снимают холловское напряжение U_H , практически равное ЭДС Холла (4). Предпочтение полупроводниковому материалу перед металлом отдано потому, что напряжение Холла в полупроводниках значительно больше, чем в металлах в силу меньшей концентрации носителей тока n и, следовательно, измерить его технически легче.

Электрическая цепь экспериментальной установки состоит из двух гальванически не связанных частей (рис.3):

- 1) цепи электромагнита,
- 2) цепи датчика Холла.

Обмотка электромагнита состоит из двух катушек, соединенных параллельно, начало и конец каждой из которых обозначены соответствующими индексами (см. рис.3). Обмотка электромагнита питается от источника постоянного тока *ИП1* со встроенным амперметром.

Датчик Холла (*ДХ*) помещается между полюсами электромагнита. В электрическую цепь датчика входит источник рабочего тока *ИП2* и миллиамперметр на 3 мА. Холловское напряжение измеряется цифровым универсальным вольтметром В7-40. Поскольку входное сопротивление вольтметра очень большое по сравнению с датчиком (порядка десятка МОм), показываемая им величина напряжения практически не отличается от ЭДС Холла.

Упражнение 1

Измерение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита

1. Приведите источники питания в исходное состояние.

- На источнике *питания электромагнита* Б5-70 регулятор напряжения «*U*» выведите против часовой стрелки до упора.
- Ручку регулировки тока «*I*» поверните до упора по часовой стрелке.
- Переключатель «*Внеш.-Внутр.*» поставьте в положение «*Внутр.*», при этом цифровое табло на источнике будет высвечивать потребляемую от него силу тока.
- Переключатель «*V/A*» поставьте в положение «*A*», т.е. измерение тока в амперах.

На *источнике питания датчика Холла* *ИП2* Б5-47 кодовые переключатели установите в положение **1,0 В** и **0,20 А**.

2. Соберите электрические цепи согласно схеме (см. рис.3) и предложите преподавателю или лаборанту проверить их.

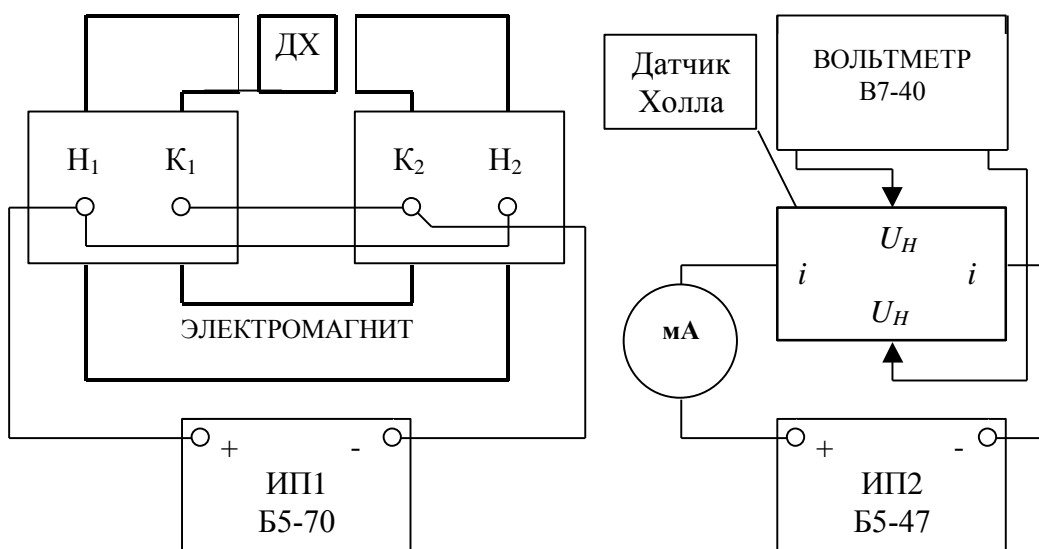


Рис.3

3. Включите *только* источник питания электромагнита ИП1. Ручкой регулировки « U » установите ток **0,20 А**.

4. Теперь приступайте к градуировке электромагнита, т.е. снятию зависимости индукции магнитного поля в зазоре электромагнита от тока в его обмотке. Для этой цели предлагается воспользоваться прибором магнитоэлектрической системы – милливексметр М119. Приборы этого типа (их еще называют *флюксметрами*) предназначены для измерения полного *магнитного потока* через *измерительную катушку*. Зная площадь контура, охваченного витками катушки, и их число, можно найти индукцию магнитного поля, пронизывающего контур. Принцип действия флюксметра описан в *Приложении* к данной работе.

Измерение индукции магнитного поля электромагнита производится следующим образом.

- ◆ Поместите измерительную катушку милливексметра в зазор электромагнита. Закрепите полюсные наконечники и в дальнейшем ширину зазора не изменяйте.
- ◆ Переключатель на милливексметре поставьте в положение «*Корректор*» и ручкой «*Корректор*» выведите стрелку прибора поближе к нулю. Стремиться поставить ее непременно на нулевое деление нет необходимости, да и сделать это затруднительно из-за дрейфа стрелки.
- ◆ Поставьте переключатель в положение «*Измерение*». Заметьте показание стрелки прибора ϕ_1 . Быстро выдерните измерительную катушку из зазора и удалите ее от магнита на 20...30 см. Заметьте при этом деление шкалы ϕ_2 , до которого отброшена стрелка. Запишите отсчеты по шкале прибора в табл.1. (Если при выдергивании катушки стрелка отбрасывается влево, то поверните катушку в зазоре на 180°). Таких измерений следует сделать *не менее трех* при каждом значении тока электромагнита.

Таблица 1

Ток электромагнита, I	ϕ_1 , мВб	ϕ_2 , мВб	$\phi_2 - \phi_1$, мВб	$\Delta\phi_{\text{сред}}$, мВб	B , Тл

5. Произведите аналогичные измерения при токе электромагнита 0,40; 0,60 и т.д. до 2,00 А.

6. Закончив измерения, уменьшите ток магнита до нуля, выключите источник питания и приступайте к обработке результатов *немедленно*, так как без них нельзя выполнить следующее упражнение.

Обработка результатов измерения. 1. Определите среднее $\Delta\phi_{\text{сред}}$ при каждом значении тока электромагнита.

2. По формуле (20) *Приложения* определите индукцию магнитного поля в зазоре электромагнита

$$B = A \cdot \Delta\phi_{\text{сред}},$$

где A – постоянная измерительной катушки, ее значение указано на лабораторной установке. Она определяется заранее для всякой измерительной катушки.

3. Постройте график №1 зависимости индукции магнитного поля в зазоре электромагнита от тока в нем. Это так называемый *градуировочный* график электромагнита. На графике следует указать величину воздушного зазора электромагнита. Если величину зазора изменить, то полученным графиком пользоваться нельзя, разумеется.

Упражнение 2

Измерение напряжения Холла

1. Включите источник питания электромагнита *ИПП1*.

2. Включите универсальный вольтметр в сеть 220 В. Нажмите на нем клавишу $U=$, т.е. измерение постоянного напряжения, и клавишу *АВП* – автоматический выбор предела измерения.

3. Включите источник питания датчика *ИПП2* и установите с помощью кодового переключателя *напряжения* ток через миллиамперметр 0,5 мА.

4. Выберите на градуировочном графике электромагнита не **менее пяти** значений индукции магнитного поля и соответствующие им токи, при которых Вы будете снимать холловское напряжение. Эти значения следует выбрать во всем диапазоне изменения индукции B (а не тока!) через равные интервалы.

5. Установите в цепи электромагнита такой ток, который обеспечит одно из намеченных Вами значений индукции магнитного поля B_n .

6. Снимите зависимость холловского напряжения U_H от величины рабочего тока датчика i , изменяя его от 0,5 до 3,0 мА через 0,5 мА. Результаты представьте в виде табл. 2.

7. Повторите измерения п.6 при всех намеченных Вами значениях индукции.

Таблица 2

$r=$		$a=$		$b=$		$l=$	
$B_1=$		$B_2=$					
$I_1=$		$I_2=$					
$i, \text{мА}$	$U_H, \text{мВ}$	$i, \text{мА}$	$U_H, \text{мВ}$	$i, \text{мА}$	$U_H, \text{мВ}$		

8. Выполнив измерения напряжения Холла, выключите оба источника питания.

9.С помощью универсального вольтметра измерьте электрическое сопротивление датчика r между его токовыми выводами $i - i$. Для этого нажмите клавишу «R» и клавишу «АВП» – автоматический выбор предела измерения. Указанные выше выводы датчика присоедините к гнездам «R-0». Запишите измеренное сопротивление в табл.2.

10.Занесите в табл.2 сведения о геометрических размерах датчика. Они указаны на панели лабораторной установки.

Дополнительное задание. Измерьте напряжение Холла

- а) при противоположном направлении индукции магнитного поля,
- б) при противоположном направлении рабочего тока датчика,
- в) при отсутствии магнитного поля,
- г) определите направление вектора индукции в зазоре электромагнита.

Проанализируйте и дайте объяснение полученным результатам.

Обработка результатов измерений. 1.Постройте семейство характеристик датчика Холла, т.е. графики зависимости холловского напряжения U_H от силы рабочего тока i при всех значениях индукции (график №2).

2.Определите угловой коэффициент K полученных прямых и результаты сведите в табл.3.

Таблица 3

$B, Tл$	$\Delta U_H, мВ$	$\Delta i, мА$	$K, В/А$

3.По данным табл.3 постройте график №3 зависимости углового коэффициента K от индукции B .

4.Из полученного графика №3 определите угловой коэффициент построенной прямой K_1 . Согласно формуле (4)

$$K_1 = R_H / a .$$

5.Определите постоянную Холла R_H . Установите ее размерность и единицу измерения.

6.По формуле (5) определите концентрацию носителей тока n в данном образце полупроводникового материала.

7.По электрическому сопротивлению датчика r (упр.2, п.9) и его геометрическим размерам найдите удельную электропроводность σ из формулы

$$r = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{ab} .$$

8.По формуле (7) определите подвижность носителей тока.

Контрольные вопросы

1. Что такое эффект Холла? Опишите это явление с точки зрения классической электронной теории электропроводности.
2. Какие физические величины можно определить из измерений холловского напряжения?
3. Сравните концентрацию носителей тока, полученную Вами для полупроводника, с концентрацией их в типичных металлических проводниках. Как она зависит от температуры образца?
4. Как устанавливается знак заряда носителей тока из измерений эффекта Холла? Можете ли Вы на основании проведенных измерений определить знак носителей в данном полупроводнике?
5. Что такое подвижность носителей тока? Как она определяется?
6. Объясните, как устроен веберметр. Как им правильно пользоваться? Чем объясняется дрейф стрелки прибора и как это влияет на результаты измерений? Как влияет сопротивление измерительной катушки на результат измерения индукции магнитного поля?

Приложение к лабораторной работе №337

ВЕБЕРМЕТР

Веберметр (или флюксметр, от англ. flux – поток вектора) предназначен для измерения магнитных потоков. Милливеберметр М119 представляет собой прибор магнитоэлектрической системы (рис.4), который отличается от обычных приборов этой системы тем, что на его рамку не действуют упругие силы, поэтому подвижная система прибора находится в безразличном равновесии [3].

В цепь рамки прибора включается наружная измерительная катушка с известным числом витков и известной площадью каждого витка. При изменении магнитного потока, пронизывающего измерительную катушку, в ней возникает ЭДС индукции и в цепи рамки флюксметра течет ток, вызывающий ее поворот и, следовательно, отклонение стрелки прибора. Изменение магнитного потока в катушке можно вызвать различными способами (о них будет сказано ниже).

Отклонение стрелки прибора,

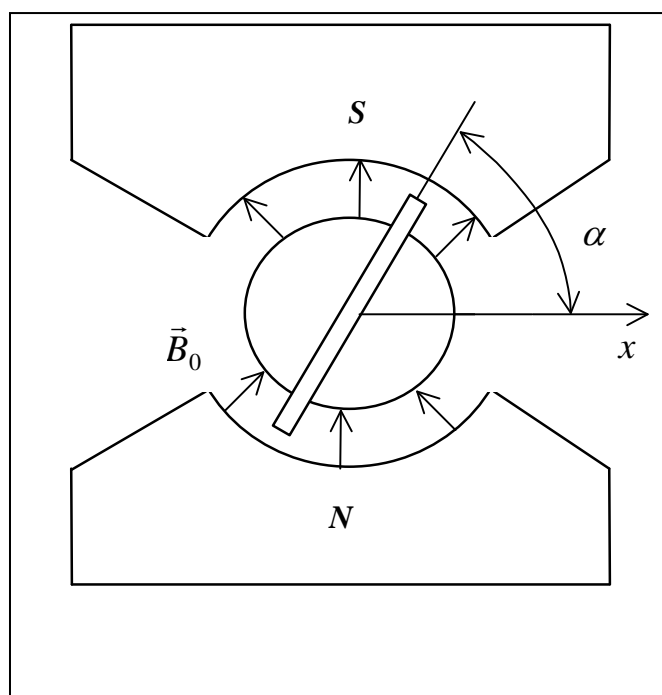


Рис.4

независимо от ее начального положения, оказывается пропорциональным изменению магнитного потока и может служить для его измерения. Рассмотрим работу веберметра.

Запишем уравнение основного закона вращательного движения в проекции на ось вращения

$$J\ddot{\alpha} = \vec{M}, \quad (8)$$

где J – момент инерции подвижной части флюксметра,

$\ddot{\alpha}$ – угловое ускорение,

M – момент сил, действующих на рамку

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}_0, \quad (9)$$

где \vec{B}_0 – индукция магнитного поля флюксметра,

\vec{p}_m – магнитный момент рамки.

$$\vec{p}_m = I\vec{S}N, \quad (10)$$

где I – ток в рамке флюксметра,

S – площадь рамки, охваченная по контуру током.

Тогда момент силы, вращающей рамку, можно записать так:

$$M = B_0 I S N. \quad (11)$$

Обозначим коэффициент пропорциональности между током и вращающим моментом $B_0 S N = \beta$, тогда уравнение (8) можно записать в следующем виде:

$$J\ddot{\alpha} = \beta I. \quad (12)$$

Запишем уравнение по второму правилу Кирхгофа с целью определить ток в рамке флюксметра

$$IR = E_K - E_P, \quad (13)$$

где E_K – ЭДС, индуцируемая в измерительной катушке флюксметра при манипуляциях с ней,

E_P – ЭДС, индуцируемая в рамке при повороте ее в магнитном поле флюксметра,

R – полное сопротивление цепи прибора (рамки и измерительной катушки).

В любом случае ЭДС индукции – это $d\phi/dt$. Для рамки прибора

$$E_P = B_0 S N \dot{\alpha},$$

где N – число витков в рамке,

$\dot{\alpha}$ – угловая скорость поворота рамки (и стрелки) флюксметра

$$IR = E_K - \beta \dot{\alpha},$$

$$I = \frac{E_K}{R} - \frac{\beta}{R} \dot{\alpha}.$$

Подставляя полученное значение I в уравнение (12), получим

$$J\ddot{\alpha} = \beta \left(\frac{E_K}{R} - \frac{\beta}{R} \dot{\alpha} \right), \quad (14)$$

$$J\ddot{\alpha} + \frac{\beta^2}{R} \dot{\alpha} = \beta \frac{E_K}{R}.$$

ЭДС индукции в измерительной катушке

$$E_K = -\frac{d\phi}{dt}.$$

Тогда уравнение (14) будет иметь вид

$$\frac{JR}{\beta^2} \ddot{\alpha} + \dot{\alpha} = -\frac{1}{\beta} \frac{d\phi}{dt}. \quad (15)$$

Перепишем его так:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{JR}{\beta^2} \dot{\alpha} + \alpha \right) dt = -\frac{1}{\beta} d\phi$$

и проинтегрируем

$$\frac{JR}{\beta^2} (\dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_1) + (\alpha_2 - \alpha_1) = -\frac{1}{\beta} (\phi_2 - \phi_1). \quad (16)$$

При измерении магнитного поля с помощью флюксметра используется один из трех способов изменения магнитного потока:

- 1) измерительная катушка поворачивается в измеряемом поле на 90 или 180°;
- 2) измеряемое магнитное поле выключается или его направление изменяется на противоположное;
- 3) измерительная катушка переносится из измеряемого поля в область нулевого магнитного поля (полюс Земли в этом методе пренебрегают).

Во всех трех способах исходное и конечное значение магнитного потока являются константами, скорость изменения потока $\dot{\phi}$ в начале и в конце опыта равна нулю. Кроме того, в начале опыта рамка флюксметра не движется, так что $\dot{\alpha}_1 = 0$. Покажем, что и $\dot{\alpha}_2 = 0$. В самом деле в конце опыта $\dot{\phi} = 0$, и в уравнении (15) правая часть обращается в нуль. В отсутствие внешних сил рамка рано или поздно должна остановиться вследствие электромагнитного торможения.

Интегрируя уравнение (15) при $\dot{\phi} = 0$, найдем

$$\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_0 \exp\left(-\frac{\beta^2}{JR} t\right). \quad (17)$$

При больших t угловая скорость $\dot{\alpha}$ стремится к нулю.

Подставляя $\dot{\alpha}_1 = 0$ и $\dot{\alpha}_2 = 0$ в уравнение (16), получим

$$\alpha_2 - \alpha_1 = -\frac{1}{\beta} (\phi_2 - \phi_1). \quad (18)$$

Угол поворота рамки флюксметра $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ пропорционален изменению магнитного потока, пронизывающего измерительную катушку. Коэффициент пропорциональности $1/\beta$ выбран так, что шкала прибора градуируется в милливольтерах (в нашем случае).

Обратим, наконец, внимание на то, что согласно формуле (17) время t , в течение которого затухает движение рамки, должно быть коротким, чтобы приход ее к равновесию был непродолжительным, так как рамка склонна к медленному дрейфу. Самопроизвольное движение стрелки прибора искажает результаты измерений. Из формулы (17) видно, что время установления показаний прибора уменьшается с уменьшением R , поэтому сопротивление измерительной катушки должно быть по возможности малым.

Мы хотим с помощью флюксметра измерить индукцию магнитного поля. Такая возможность имеется. Принимая во внимание, что магнитный поток через измерительную катушку в исходном и конечном ее положении принимает следующие значения:

$$\phi_1 = B_1 S_K N_K,$$

$$\phi_2 = B_2 S_K N_K,$$

можно написать

$$\Delta B = \frac{1}{S_K N_K} (\phi_2 - \phi_1) = A(\phi_2 - \phi_1), \quad (19)$$

где S_K и N_K – площадь и число витков измерительной катушки, соответственно,

ϕ_1 и ϕ_2 – отсчеты по шкале милливольтметра в исходном и конечном положениях измерительной катушки.

$\Delta B = B_1$ – если выключается ток электромагнита или измерительная катушка удаляется из зазора на значительное расстояние;

$\Delta B = 2B_1$ – если переключается направление тока в электромагните или катушка поворачивается внутри зазора на 180° .

Согласно рекомендации, данной в упр.1, индукцию магнитного поля определим по формуле

$$B = A(\phi_2 - \phi_1), \quad (20)$$

где A – постоянная измерительной катушки, ее значение указано на установке.

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм. М.: Наука. 1998. Кн.2. §6.5; 8.3.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1983. Т.3. §98; 67.
3. Лабораторные занятия по физике /Под ред. Л.Л.Гольдина. М.: Наука, 1983. С.332-342; 281-283.