

# Лабораторная работа

## «Магнитоэлектрические преобразователи»

**Цель:** Исследовать магнитное поле постоянного магнита, используя датчик Холла.

### Общие понятия

**Магнетизм** — форма взаимодействия движущихся электрических зарядов, осуществляемая на расстоянии посредством магнитного поля.

**Магнитное поле** — составляющая электромагнитного поля, появляющаяся при наличии изменяющегося во времени электрического поля.

Основными источниками магнитного поля являются орбитальные и спиновые магнитные моменты элементарных частиц, атомов и молекул.

В макроскопическом масштабе источниками магнитного поля являются электрический ток (ток заряженных частиц) и постоянные магниты (магнитные моменты электронов в атомах). Основной (силовой) характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , совпадающий в вакууме с вектором напряженности магнитного поля. В международной системе единиц СИ магнитная индукция измеряется в Тесла (Тл).

**Магнит** — тело, обладающее собственным магнитным полем.

**Постоянный магнит** — изделие из жёсткого материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени.

Постоянные магниты применяются в качестве автономных (не потребляющих энергии) источников магнитного поля.

**Электромагнит** — устройство, магнитное поле которого создаётся только при протекании электрического тока. Как правило, это катушка-соленоид, со вставленным внутрь железным сердечником с большой магнитной проницаемостью  $\mu \sim 10^4$ .



Рис. 1. Постоянный магнит

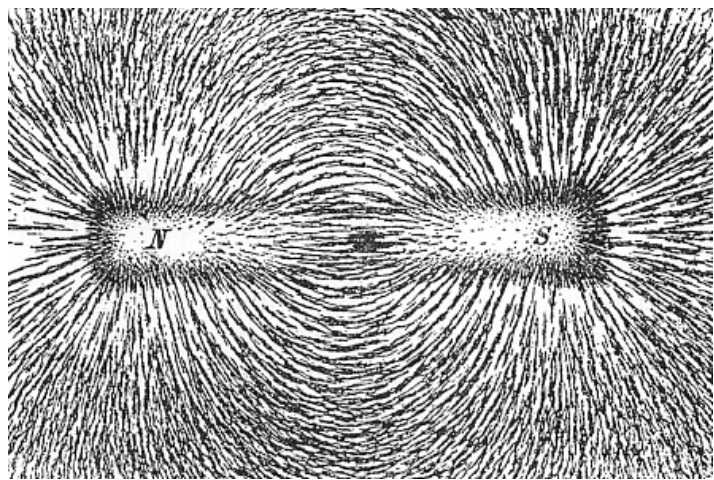


Рис. 2. Картина силовых линий магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом в форме стержня. Железные опилки на листе бумаги

## Классификация веществ по магнитным свойствам

- магнитно не упорядоченные вещества:
  - диамагнетики;
  - парамагнетики.
- вещества с дальним магнитным порядком (магнетики):
  - ферромагнетики;
  - антиферромагнетики;
  - ферримагнетики.
- вещества с ближним магнитным порядком:
  - спиновые стекла;
  - суперпарамагнитные ансамбли частиц.
- молекулярные магниты и кластеры.
- плазма.
- элементарные частицы.

По своим магнитным свойствам вещества делятся на три основных класса: ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики.

Имеется также два обособленных подкласса материалов, выделенных из общего класса ферромагнетиков — антиферромагнетики и ферримагнетики. В обоих случаях эти вещества относятся к классу ферромагнетиков, но обладают особыми свойствами при низких температурах: магнитные поля соседних атомов выстраиваются строго параллельно, но в противоположных направлениях. Антиферромагнетики состоят из атомов одного элемента и, как следствие, их магнитное поле становится равным нулю. Ферримагнетики представляют собой сплав двух и более веществ, и результатом суперпозиции противоположно направленных полей становится макроскопическое магнитное поле, присущее материалу в целом.

Электрон, вращающийся вокруг атома, можно рассматривать как циклический электрический ток очень малой силы и радиуса, индуцирующий магнитное поле. Фактически же, все электроны, вращаясь вокруг атомов, производят свое магнитное поле, и каждый атом, как следствие, обладает собственным магнитным полем, которое представляет собой суммарное поле, или суперпозицию магнитных полей отдельных электронов.

В атомах одних элементов равное число электронов вращается во всевозможных направлениях, и их магнитные поля взаимно гасятся. В атомах других элементов орбиты электронов могут быть ориентированы таким образом, что часть электронов производит магнитные поля, остающиеся некомпенсированными за счет полей электронов, обращающихся в противоположном направлении. И когда такие магнитные поля, связанные с вращением электронов по орбите оказываются одинаково направленными у всех атомов кристаллической структуры вещества, вокруг вещества создаётся стабильное и достаточно сильное магнитное поле.

Магнитные свойства вещества зависят от конфигурации электронных орбит атомов. Даже после разбиения на отдельные атомы железо, например, сохранит свои ферромагнитные свойства. А вот при дальнейшем дроблении можно получить лишь элементарные частицы, которые собственными магнитными свойствами не обладают, и описать природу магнетизма будет уже нельзя. Магнитные свойства вещества зависят исключительно от конфигурации элементарных частиц в составе атома и организации кристаллических доменов, но не от свойства заряженных частиц атомной структуры.

Любой фрагмент такого вещества представляет собой маленький магнит с четко выраженными северным и южным полюсами. Именно совокупное поведение таких мини-магнитов атомов кристаллической решетки и определяет магнитные свойства вещества.

## Диамagnetики

В веществах, атомы которых не обладают собственным магнитным моментом (то есть в таких, где магнитные поля гасятся еще в зародыше — на уровне электронов), может возникнуть магнетизм иной природы. Согласно второму закону электромагнитной индукции Фарадея, при увеличении потока магнитного поля, проходящего через токопроводящий контур, изменение электрического тока в контуре противодействует увеличению магнитного потока.

Вследствие этого, если вещество, не обладающее собственными магнитными свойствами, ввести в сильное магнитное поле, электроны на атомных орбитах, представляющие собой микроскопические контуры с током, изменят характер своего движения таким образом, чтобы воспрепятствовать увеличению магнитного потока, то есть, создадут собственное магнитное поле, направленное в противоположную по сравнению с внешним полем сторону. Такие материалы принято называть диамagnetиками.

## Парамагнетики

В большинстве веществ внутренние силы выравнивания магнитной ориентации атомов отсутствуют, домены не образуются, и магнитные поля отдельных атомов направлены случайным образом. Из-за этого поля отдельных атомов-магнитов взаимно гасятся, и внешнего магнитного поля у таких веществ нет. В то же время эти вещества обладают собственным ненулевым локальным магнитным моментом (например, нескомпенсированный атомный магнитный момент).

При помещении такого вещества в сильное внешнее поле (например, между полюсами мощного магнита) магнитные поля атомов ориентируются в направлении, совпадающем с направлением внешнего магнитного поля, и мы наблюдаем эффект усиления магнитного поля в присутствии такого вещества. Вещества, обладающие подобными свойствами, называются парамагнетиками. Стоит, однако убрать внешнее магнитное поле, как парамагнетик тут же размагничивается, поскольку атомы снова выстраиваются хаотично. То есть, парамагнетики характеризуются способностью к временному намагничиванию.

## Ферромагнетики

Ферромагнетиками — вещества (как правило, в твёрдом кристаллическом или аморфном состоянии), в которых ниже определённой критической температуры (температуры Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах).

(Температура Кюри — температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества. К примеру, при температуре ниже температуры Кюри ферромагнетики обладают спонтанной намагниченностью, вызванной упорядоченной ориентацией магнитных моментов атомов. При температуре выше температуры Кюри упорядоченность разрушается из-за сильных тепловых колебаний атомов. В результате этого ферромагнетик становится парамагнетиком. Аналогичные фазовые переходы могут наблюдаться не только в ферромагнетиках, но и в антиферромагнетиках, в сегнето- и антисегнетоэлектриках, в упорядоченных сплавах.)

Дальний ферромагнитный порядок заключается в следующем. Атомам (или ионам) при температуре ниже температуры Кюри оказывается энергетически выгодно выстроиться таким образом, что их магнитные поля оказываются однонаправленными и усиливают друг друга. Намагничивание ограничивается объемом, содержащим от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч атомов. Такой объем вещества принято называть доменом. В каждом домене магнитное поле ориентировано по-своему. Поэтому в обычном состоянии твердое железо не намагничено, хотя внутри него образованы домены, каждый из которых пред-

ставляет собой готовый мини-магнит. Однако под воздействием внешних условий (например, при застывании выплавленного железа в присутствии мощного магнитного поля) домены выстраиваются упорядоченно и их магнитные поля взаимно усиливаются. Благодаря этому возникает макроскопическое магнитное поле за пределами материала.

Среди химических элементов ферромагнитными свойствами обладают переходные элементы Fe, Co и Ni и редкоземельные металлы Gd, Tb, Dy, Ho, Er. Также обладают ферромагнитными свойствами многочисленные металлические бинарные и более сложные (многокомпонентные) сплавы и соединения упомянутых металлов между собой и с другими ферромагнитными элементами, сплавы и соединения Cr и Mn с ферромагнитными элементами, соединения ZrZn<sub>2</sub> и Zr<sub>x</sub>M<sub>1-x</sub>Zn<sub>2</sub> (где M – это Ti, Y, Nb или Hf, 0 ≤ x ≤ 1), Au<sub>4</sub>V, Sc<sub>3</sub>In и др., а также некоторые соединения металлов группы актиноидов (например, UH<sub>3</sub>).

Особую группу ферромагнетиков образуют сильно разбавленные растворы замещения парамагнитных атомов, например Fe или Co в диамагнитной матрице Pd. В этих веществах атомные магнитные моменты распределены неупорядоченно (при наличии ферромагнитного порядка отсутствует атомный порядок). Ферромагнитный порядок обнаружен также в аморфных (метастабильных) металлических сплавах и соединениях, аморфных полупроводниках, в обычных органических и неорганических стеклах, халькогенидах (сульфидах, селенидах, теллуридах) и т.п. К известным неметаллическим ферромагнетикам относятся, например, ионные соединения типа La<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>5</sub> (0,4 > x > 0,2), EuO, Eu<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, EuS, EuSe, EuI<sub>2</sub>, CrB<sub>3</sub> и т.п. У большинства из них температура Кюри лежит ниже 1 К. Только у соединений Eu, халькогенидов, CrB<sub>3</sub> значение температуры Кюри ~ 100 К.

## Антиферромагнетики

Антиферромагнетики — вещества, в кристалле которых формируются две или более двух антипараллельно ориентированных подрешёток, магнитные моменты которых дают в сумме нулевую намагниченность в отсутствии магнитного поля.

Обычно вещество становится антиферромагнетиком ниже определённой температуры T<sub>N</sub> (температуры Нееля) и остаётся антиферромагнетиком вплоть до T<sub>K</sub> (температуры Кюри).

Антиферромагнетиками являются твёрдый кислород (α-модификация при T < 24К), хром (T<sub>N</sub> = 310К), а также ряд редкоземельных металлов (Dy, Ho, Er, Tm, Tb). Число известных химических соединений, которые становятся антиферромагнетиками при определённых температурах, приближается к тысяче (MnSO<sub>4</sub>, FeSO<sub>4</sub>, CoSO<sub>4</sub>, NiSO<sub>4</sub>, MnCO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub>, CoCO<sub>3</sub>, NiCO<sub>3</sub>, MnO, FeO, CoO, NiO, MnF<sub>2</sub>, FeF<sub>2</sub>, CoF<sub>2</sub>, NiF<sub>2</sub>).

## Ферримагнетики

В ферримагнетиках, в отличие от антиферромагнетиков, полной компенсации магнитных моментов подрешёток не происходит, и материал в целом обладает ненулевой спонтанной намагниченностью.

Большинство ферримагнетиков — это ионные кристаллы, содержащие магнитные ионы различных элементов или одного элемента, но либо имеющие разную валентность, либо находящиеся в разных кристаллографических позициях. Наиболее обширный класс хорошо изученных ферримагнетиков образуют ферриты. Из других ферримагнитных кристаллов следует отметить группу гексагональных двойных фторидов (RbNiF<sub>3</sub>, CsNiF<sub>3</sub>, TlNiF<sub>3</sub>, CsFeF<sub>3</sub>), особенно интересных тем, что они являются прозрачными в оптической области. К ферримагнетикам принадлежит также ряд сплавов и интерметаллических соединений. В большинстве случаев это вещества, содержащие атомы редкоземельных элементов. В частности, особый интерес представляет соединение типа RMe<sub>5</sub>, где R – редкоземельный ион, Me – ион группы железа (например, GdCo<sub>5</sub>).

Ферромагнетики применяются в качестве сердечников высокочастотных контуров в радиотехнике, невзаимных элементов в СВЧ-технике, элементов памяти в ЭВМ и для создания постоянных магнитов.

## Эффект Холла

Эффект Холла — возникновение поперечного электрического поля и разности потенциалов в проводнике или полупроводнике (датчике Холла), по которым проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока.

Если в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  поместить проводник или электронный полупроводник, по которому течет электрический ток, то на электроны, движущиеся со скоростью в магнитном поле, действует сила Лоренца, отклоняющая их в определенную сторону. На противоположной стороне скапливаются положительные заряды.

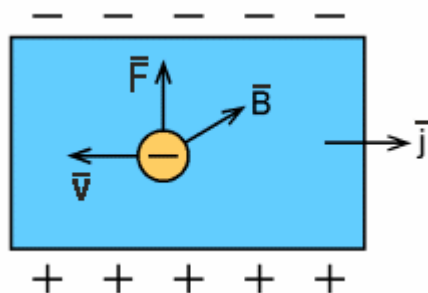


Рис. 3. Действие силы Лоренца на движущийся отрицательный заряд

В дырочном полупроводнике знаки зарядов на поверхностях меняются на противоположные.

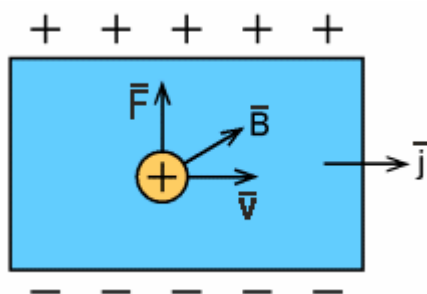


Рис. 4. Действие силы Лоренца на движущийся положительный заряд

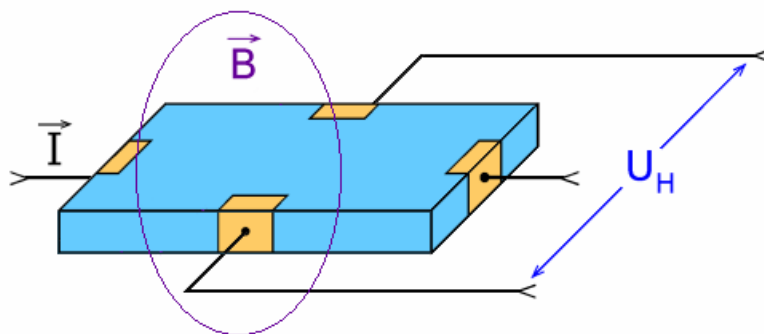


Рис. 5. Техническая реализация эффекта Холла в датчике Холла

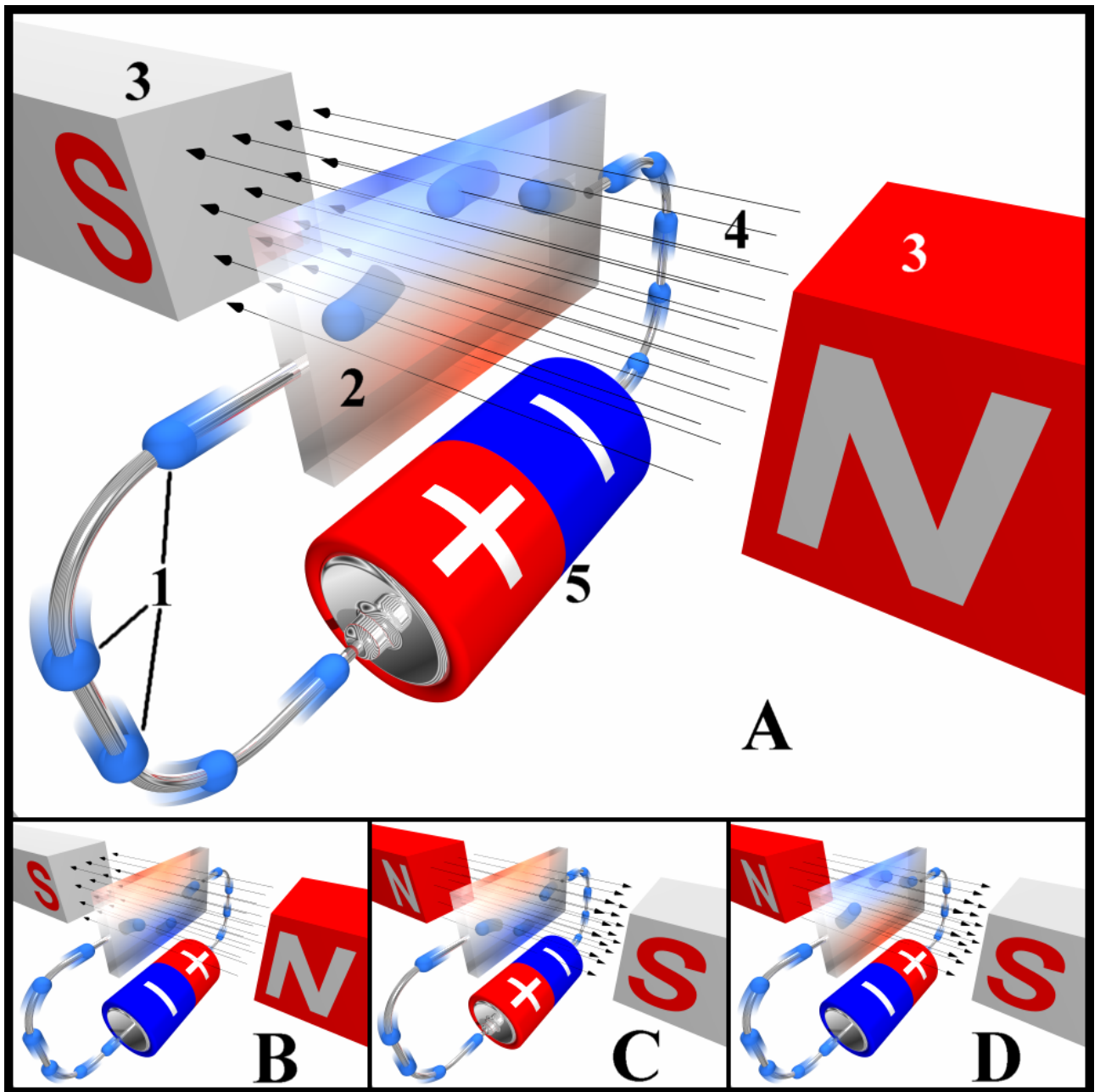


Рис. 6. Эффект Холла

1 — электроны; 2 — датчик Холла; 3 — магниты; 4 — магнитное поле; 5 — источник тока

Если магнитное поле напряжённости  $H$  перпендикулярно направлению течения тока силы  $I$ , то разность потенциалов, возникающая между боковыми сторонами проводника ширины  $d$ :

$$U_{\text{H}} = R_{\text{H}} \cdot \frac{I \cdot H}{d}.$$

Величина  $R_{\text{H}}$  называется постоянной Холла. Если ток в проводнике (или полупроводнике) представляет собой поток свободных носителей заряда, то холловская постоянная для металлов равна:

$$R_{\text{H}} = \frac{1}{n \cdot e}.$$

где  $n$  — концентрация носителей, а  $e$  — их заряд.

По знаку постоянной Холла определяют тип проводимости полупроводника. При электронной проводимости  $q = -e$  ( $e$  – заряд электрона) и  $R < 0$ . При дырочной проводимости  $q = e$  и  $R > 0$ . По величине  $R$  можно определить концентрацию носителей тока.

Разность потенциалов прямо пропорциональна силе тока, из-за чего можно ввести холловское сопротивление, которое для заданной системы постоянно и не зависит от силы протекающего тока.

Эффект Холла открыт американским физиком Эдвином Холлом (E.Hall; 1855–1938), который в 1879 году первым измерил поперечное электрическое напряжение, возникающее под воздействием внешнего магнитного поля по вышеописанной схеме.

Прошло более столетия после экспериментов Холла, и германский физик Клаус фон Клитцинг (Klaus von Klitzing) открыл квантово-механический аналог эффекта Холла, за что был в 1985 году удостоен Нобелевской премии по физике. В сильных магнитных полях в плоском проводнике (то есть в квази-двумерном электронном газе) начинают сказываться квантовые эффекты, что приводит к квантовому эффекту Холла: квантованию холловского сопротивления. В ещё более сильных магнитных полях проявляется дробный квантовый эффект Холла, который связан с кардинальной перестройкой внутренней структуры двумерной электронной жидкости.

Эффект Холла применяется в работе синхрофазотрона, который используется в исследованиях в области физики элементарных частиц: в нём заряженные частицы оказываются пойманными в тороидальную магнитную ловушку и летают по кругу внутри неё. В малых масштабах этот эффект используется в устройстве микроволновой печи — в ней электроны, циркулируя в магнитном поле, производят сверхвысокочастотное излучение, разогревающее пищу.

Эффект Холла также используется в генераторах Холла и датчиках тока.

Генератор Холла — измерительный прибор для определения индукции магнитного поля. Его принцип действия основан на измерении ЭДС Холла  $U_H$ , пропорциональной магнитной индукции поля, при постоянном управляющем токе  $I_{st}$ . При помощи добавочного сопротивления  $R_V$  устанавливается оптимальное значение управляющего тока, которое контролируется вольтметром через падение напряжения на резисторе  $R_N$ . Этот же вольтметр переключается для измерения ЭДС Холла. При наличии двух прямоугольных расположенных напротив друг друга датчиков Холла можно определить направление магнитного поля.

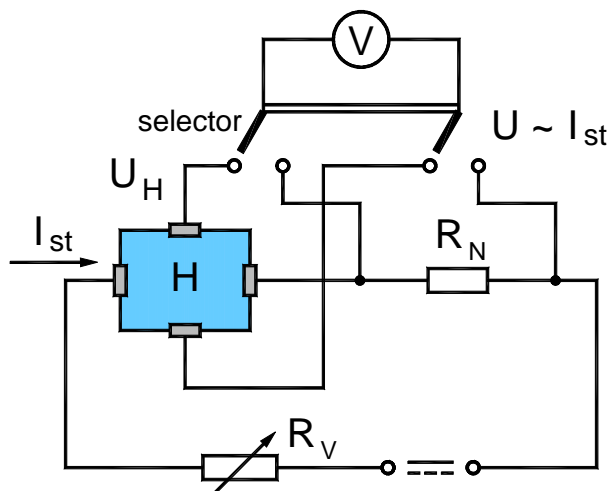


Рис. 7. Генератор Холла

H – датчик Холла; selector – переключатель вольтметра

## Описание установки

Общий вид лабораторной установки показан на рис.

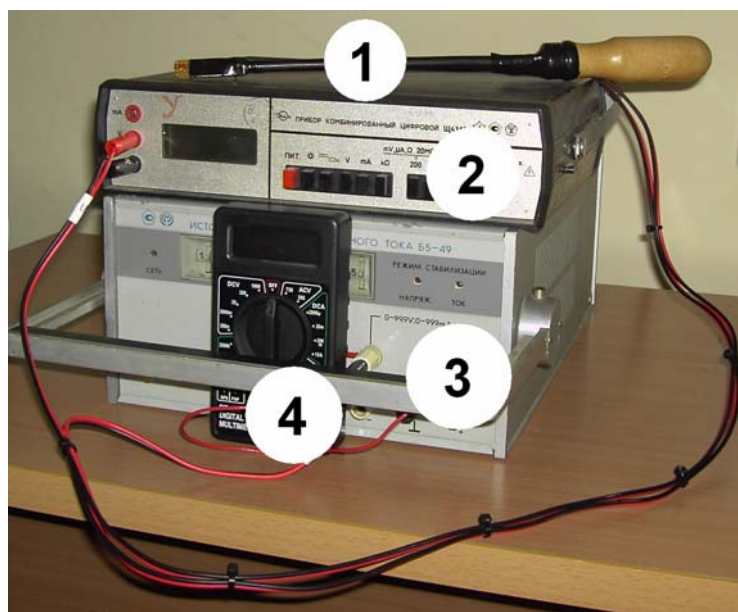


Рис. 8. Лабораторная установка

На рисунке:

- 1 – датчик Холла, закреплённый на держателе
- 2 – Вольтметр
- 3 – Источник постоянного тока
- 4 – Тестер



Рис. 9. Исследуемый магнит, помещённый в защитный кожух



## Порядок работы

1. Включите тестер в режиме измерения постоянного тока (DCA) на пределе измерений 200 мА (200m).
2. Включите источник постоянного тока Б5-49 и подайте с него на выводы датчика Холла постоянный ток величиной 3 мА, пользуясь показаниями тестера.
3. Включите прибор Щ4313 в режиме измерения постоянного напряжения на пределе 200 мВ. Данный прибор в ходе измерений служит для отображения величины ЭДС Холла  $U_H$ .
4. Пользуясь датчиком Холла, определите распределение силовых линий магнитного поля постоянного магнита. Для этого воспользуйтесь сеткой миллиметровки, самостоятельно выбрав начало отсчёта для измерений и шаг измерений.
5. Определите значение индукции магнитного поля. Значение чувствительности для используемого в работе датчика ДХК-05 можно взять в Приложении 1.
6. Занесите результаты измерений и расчётов в отчёт.

# Приложение 1. Характеристики датчика Холла ДХК-0.5А

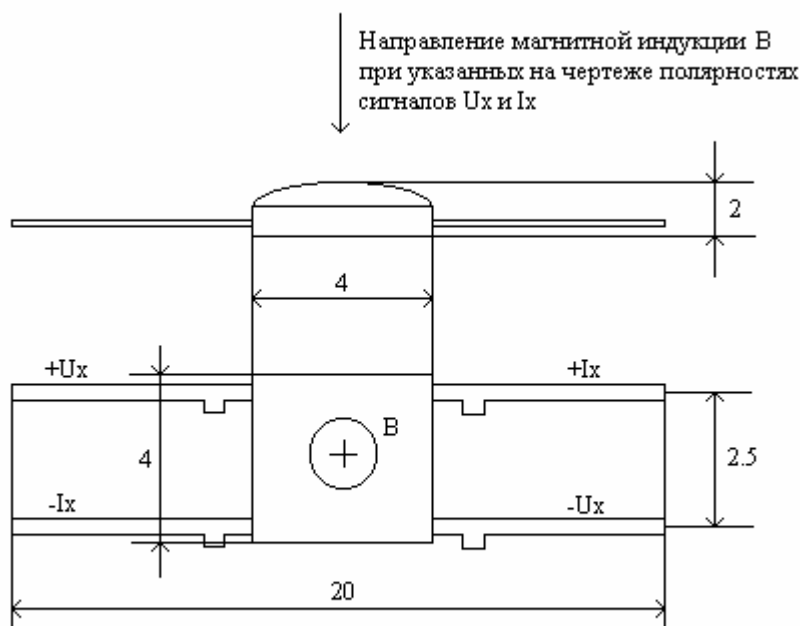
## Назначение

Датчик Холла ДХК-0.5А предназначен для преобразования магнитной индукции в выходное напряжение. Принципом работы служит эффект Холла. Выполнен на основе планарной топологической структуры, сформированной на поверхности кремниевого кристалла.

## Основные технические характеристики:

- Номинальный управляющий ток - 3 мА.
- Напряжение Холла при магнитной индукции 0.25 Тл и номинальном управляющем токе - 70 мВ (чувствительность  $K = 280$  мВ/Тл).
- Остаточное напряжение при номинальном управляющем токе - не более 7 мВ (значение этого параметра зависит от условий поставки).
- Входное сопротивление - 1.8 ... 3 кОм (сопротивление между выводами  $I_x$ ).
- Выходное сопротивление - не более 3 кОм (сопротивление между выводами  $U_x$ ).
- Масса - не более 2.5 г.

## Конструкция:



ДХК-0.5А

- $I_x$  и + $I_x$  - выводы для подключения источника управляющего тока (токовые выводы);  
- $U_x$  и + $U_x$  - выводы выходного сигнала (холловские выводы);  
сопротивление между токовыми выводами меньше, чем между холловскими.

Выходное напряжение в мВ:

$$+U_x - (-U_x) = K \cdot (I_x : 3) \cdot B,$$

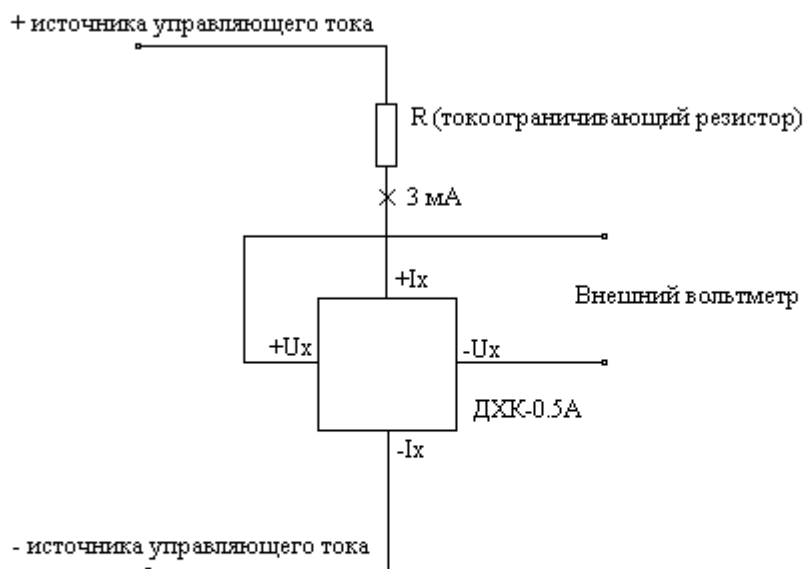
где  $I_x$  - значение управляющего тока в мА,

$K$  - чувствительность в мВ/Тл (около 280 мВ/Тл),

$B$  - величина магнитной индукции в Тл.

Датчик ДХК-0.5А является знакочувствительным как по отношению к направлению магнитной индукции, так и по отношению к полярности управляющего тока.

### Простая схема подключения датчика ДХК-0.5А:



Напряжение источника управляющего тока около 9 В.  
Сопротивление токоограничивающего резистора около 1 кОм  
(подбирается для установки величины управляющего тока 3 мА).