

Московский Государственный технический Университет имени Н.Э.Баумана.

И.Н.Фетисов

## ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

Методические указания к лабораторной работе Э-23 по курсу общей физики

Москва, 2000

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле - силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом (независимо от состояния их движения). Термин «магнитное поле» ввел М. Фарадей, считавший, что электрические и магнитные взаимодействия осуществляются посредством единого материального поля.

Цель работы - ознакомление с магнитным полем и электромагнитной индукцией; измерение силы Ампера и магнитной индукции.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Источниками макроскопического магнитного поля (м.п.) являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные тела. Природа этих источников одинакова: м.п. возникает в результате движения заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию у микрочастиц собственного (спинового) магнитного момента. Переменное м.п. возникает также при изменении во времени электрического поля. В свою очередь, при изменении во времени м.п. возникает электрическое поле. Полное описание электрических и магнитных полей в их взаимосвязи дают уравнения Максвелла.

### СИЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

#### Сила, действующая на заряд.

Основной характеристикой электрического поля служит векторная величина  $\vec{E}$ , называемая напряженностью электрического поля и равная отношению силы, действующей на точечный положительный заряд  $q$ , помещенный в данную точку поля, к величине заряда:

$$\vec{E} = \vec{F}_{эл} / q \quad (1)$$

Характеристикой м.п. служит векторная величина  $\vec{B}$ , называемая магнитной индукцией. В отличие от электрического поля, в м.п. сила действует только на движущийся электрический заряд, она равна:

$$\vec{F}_M = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2)$$

где  $\vec{v}$  - скорость частицы. Модуль силы равен

$$F_M = qvB \sin \alpha$$

где  $\alpha$ - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Вектор силы перпендикулярен плоскости, образованной векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  (рис. 1). Направление  $\vec{F}_M$  задается правилом правого винта (или левой руки). В СИ единица магнитной индукции - тесла (Тл).

В электромагнитных полях движущаяся заряженная частица подвергается воздействию двух сил, одна из которых обусловлена электрическим, а вторая магнитным полем (формулы 1 и 2). Результирующая сила (сила Лоренца) равна

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]) .$$

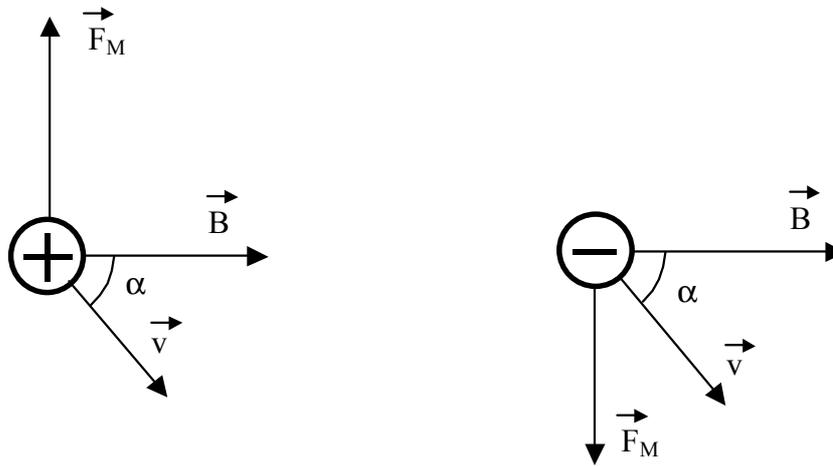


Рис.1

Сила, действующая на проводник с током.

Когда в проводнике протекает ток, в любой точке этого проводника существует суммарное движение зарядов в определенном направлении. На каждый из этих движущихся зарядов действует магнитная сила, выражаемая формулой (2). Сумма этих сил есть сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. На прямой отрезок проводника длиной  $l$ , по которому протекает ток силой  $I$ , в магнитном поле индукции  $\vec{B}$  в действует сила, называемая силой Ампера:

$$\vec{F}_A = I[\vec{l} \times \vec{B}] \quad (3)$$

Формула (3) выражает закон Ампера. Направление вектора  $\vec{l}$  совпадает с направлением тока в проводнике, т. е. с направлением движения положительных зарядов. Направление силы  $\vec{F}_A$  такое же, как силы  $\vec{F}_M$ , если заменить вектор  $\vec{v}$  на вектор  $\vec{l}$  (рис. 2). Модуль силы равен

$$F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Магнитный момент. Контур с током в магнитном поле.

Во многих случаях имеют дело с замкнутыми токами. Пример такого тока показан на рис.3: ток силой  $I$  протекает по плоскому контуру площади  $S$ . Для контура с током физический смысл

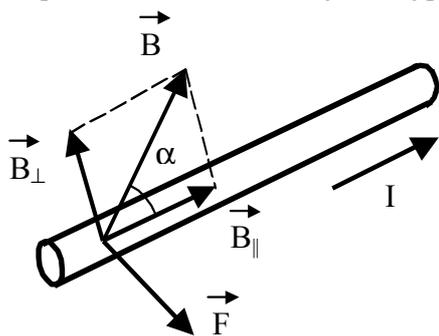


Рис.2

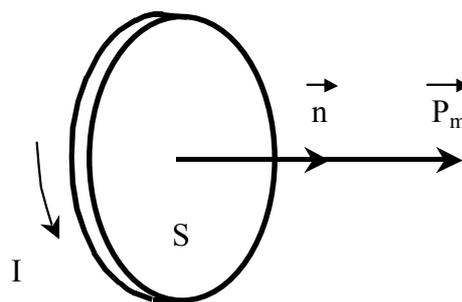


Рис.3

имеет векторная величина  $\vec{p}_m$ , называемая магнитным моментом

$$\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}$$

Направление магнитного момента совпадает с направлением единичного вектора  $\vec{n}$ , перпендикулярного плоскости контура; направление  $\vec{n}$  связано с направлением тока правилом правого винта. Единицей магнитного момента является ампер-квадратный метр ( $A \cdot m^2$ ). Орбитальное движение электронов в атомах представляет собой круговой ток и создает маг-

нитный орбитальный момент атома. Электрон (а также протон и другие элементарные частицы) имеет также собственный магнитный момент, обусловленный собственным механическим моментом импульса (спином) и не связанный с орбитальным движением электрона вокруг ядра. В однородном магнитном поле на контур с током действует момент сил, равный

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] \quad (5)$$

Отметим, что соотношения (2), (3) и (5) рассматривают как магнитной индукции  $\vec{B}$ .

#### Магнитные поля, создаваемые электрическими токами.

Электрический ток создает магнитное поле. Методика расчета магнитной индукции опирается на экспериментально установленные закон Био-Савара и принцип суперпозиции магнитных полей.

Рассмотрим случай тонкого произвольного проводника в вакууме, по которому протекает ток силой  $I$ . Магнитная индукция  $d\vec{B}$  в точке  $P$ , положение которой определяется радиусом-вектором  $\vec{r}$  (рис.4), от малого элемента провода длины  $d\vec{l}$  равна (закон Био-Савара):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}$$

Здесь  $\mu_0$  - магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (генри на метр). Модуль  $d\vec{B}$  определяется выражением

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Согласно принципу суперпозиции м.п., полная индукция поля  $\vec{B}$  равна векторной сумме полей  $d\vec{B}_i$  от всех элементов проводника:

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

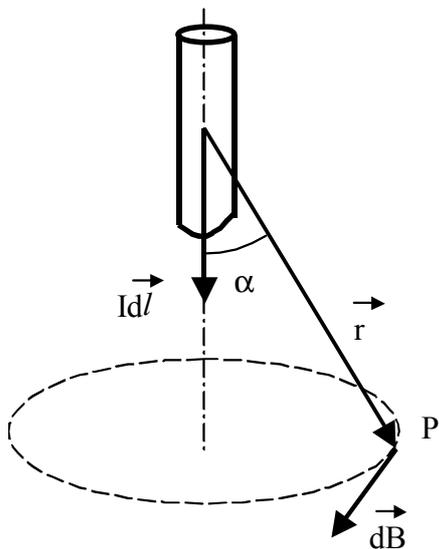


Рис.4

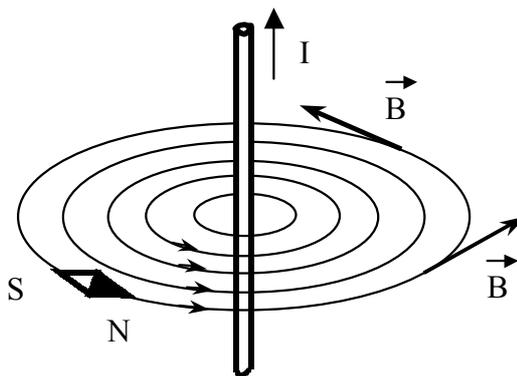


Рис.5

Выполняя расчеты по приведенной выше схеме, получены, в частности, следующие результаты для поля в вакууме, создаваемого током силой  $I$  в тонких проводниках. Поле на расстоянии  $r$  от бесконечно длинного прямого проводника

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi r}$$

Поле в центре кругового тока радиуса  $r$  равно

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2r}$$

Магнитная индукция внутри длинного соленоида, в котором на единицу длины приходится  $n$  витков, равна

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I} \cdot n$$

#### Линии индукции магнитного поля.

Магнитные поля, так же как и электрические, можно изображать графически при помощи линий индукции. Линиями индукции (или линиями вектора  $\vec{\mathbf{B}}$ ) называют линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор  $\vec{\mathbf{B}}$  в данной точке поля. Магнитная стрелка компаса ориентируется по касательной к линии магнитной индукции, ее северный конец указывает направление вектора  $\vec{\mathbf{B}}$ .

Рассмотрим линии индукции поля прямого тока, показанные на рис.5. Они лежат в плоскости, перпендикулярной проводнику. В данном случае линии индукции есть концентрические окружности, центр которых расположен на оси тока. Подобно линиям напряженности электрического поля, линии индукции м.п. прочерчивают с такой густотой, чтобы число линий, пересекающих единицу поверхности, перпендикулярной к ним, было равно (или пропорционально) индукции магнитного поля в данном месте. Поэтому, изображая линии индукции, можно наглядно представить, как меняется в пространстве м.п.

Представление о виде линий магнитной индукции можно получить с помощью магнитной стрелки. Можно воспользоваться также железными опилками, которые в магнитном поле намагничиваются и становятся подобными магнитным стрелкам.

Линии индукции м.п. непрерывны: они не имеют ни начала, ни конца. Это имеет место для любого м.п. Векторные поля, обладающие непрерывными линиями, называются вихревыми полями. М.п. есть вихревое поле. В этом заключается существенное отличие магнитного поля от электростатического.

#### Электромагнитная индукция.

Электрические токи создают вокруг себя м.п. Существует и обратное явление: м.п. вызывает появление электрических токов. Это явление, открытое М.Фарадеем в 1831 г., получило название электромагнитной индукции.

Рассмотрим некоторые опыты, иллюстрирующие электромагнитную индукцию; их можно проделать в данной работе.

Опыт 1. Проволочная катушка  $K$  подключена к микроамперметру  $A$  (рис.6а)

Если постоянный магнит  $M$  неподвижен относительно катушки, то тока в катушке нет, даже если магнит находится вблизи катушки. Если магнит перемещать относительно катушки, то прибор покажет появление тока. Этот ток существует только при движении магнита, и он тем сильнее, чем быстрее движется магнит. Ток возникает и при сближении магнита с катушкой, и при удалении их, однако токи в обоих случаях имеют противоположные направления. Если оставить магнит неподвижным, а двигать катушку, то прибор также покажет ток при движении катушки.

Опыт 2. В этом опыте вместо постоянного магнита используется соленоид  $C$  (катушка с большим числом витков), в котором возникает магнитное поле при пропускании через него тока от источника питания ИП (рис.6б).

Можно наблюдать возникновение тока в катушке в случаях (для усиления эффекта необходимо вставить железный сердечник в соленоид):

- а) изменения расстояния между катушкой и соленоидом;
- б) в моменты включения и выключения тока соленоида или изменения направления тока соленоида, которые можно производить переключателем П;
- в) можно наблюдать ток, когда соленоид и катушка неподвижны, но мы вдвигаем или выдвигаем

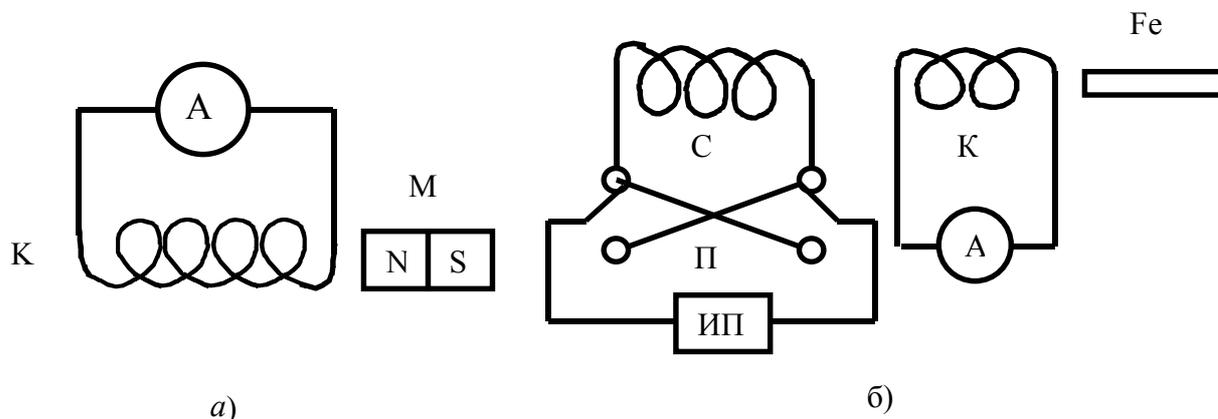


Рис.6

ем из них железный сердечник. При вдвигании сердечника в соленоид он намагничивается, и магнитное внутри катушки усиливается; при выдвигании сердечника поле уменьшается. Ток в цепи катушки течет только при движении сердечника.

Из этих опытов видно, что причиной появления индукционного является изменение магнитного поля.

Возникновение индукционного тока показывает, что при электромагнитной индукции в проводнике появляется определенная электродвижущая сила. Анализируя результаты опытов Фарадея, Максвелл установил, что во всех случаях э.д.с.  $\mathcal{E}$  электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\Phi$  через площадь, ограниченную контуром, т.е.

$$\mathcal{E} = -d\Phi / dt \tag{6}$$

Знак минус в (6) связан с правилом Ленца (см. ниже).

Магнитный поток.

Рассмотрим сначала плоскую площадку  $S$ , находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  (рис.7).

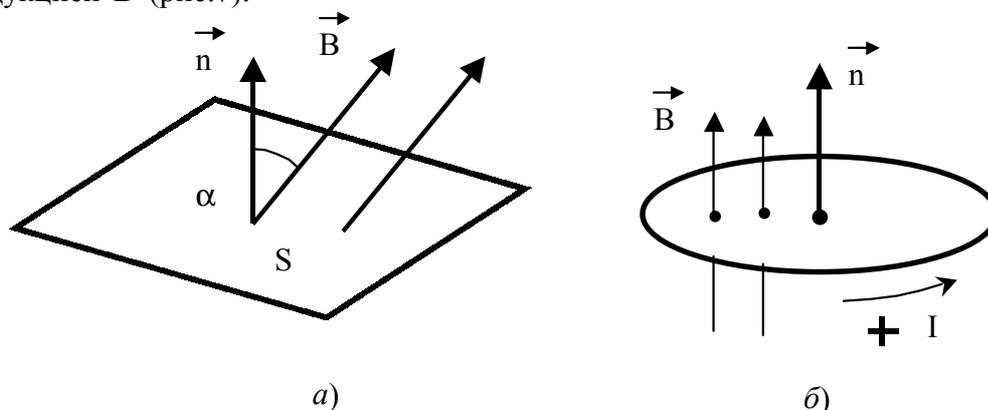


Рис. 7

Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции сквозь площадку  $S$  называют величину

$$\Phi = \mathbf{B}S \cos \alpha = \mathbf{B}_n S \quad (7)$$

Здесь  $\alpha$  - угол между направлением нормали  $\vec{n}$  к площадке и направлением индукции  $\vec{B}$ , и  $\mathbf{B}_n$  - проекция вектора  $\vec{B}$  на нормаль  $\vec{n}$ . Магнитный поток - скаляр, пропорциональный полному числу линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность.

Если магнитное поле неоднородно, а рассматриваемая поверхность не плоская, то ее можно разбить на бесконечно малые элементы  $dS$ . Магнитный поток через элемент поверхности есть  $d\Phi = \mathbf{B}_n dS$ , а полный магнитный поток через всю поверхность

$$\Phi = \int \mathbf{B}_n dS$$

В системе СИ магнитный поток выражается в веберах:  $1 \text{ Вб} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$ . Пусть контур, в котором индуцируется э.д.с., состоит не из одного витка, а из  $N$  витков, например, представляет собой соленоид. Поскольку витки соединяются последовательно, э.д.с. будет равна сумме э.д.с., индуцируемых в каждом из витков в отдельности:

$$\mathcal{E} = - \sum d\Phi / dt = - \frac{d}{dt} (\sum \Phi)$$

Величину  $\Psi = \sum \Phi$  называют полным магнитным потоком или потокосцеплением. Ее измеряют в тех же единицах, что и  $\Phi$ . Если поток, пронизывающий каждый из витков, одинаков,  $\Psi = N\Phi$ . Э.д.с., индуцируемая в сложном контуре, определяется формулой

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (8)$$

#### Самоиндукция

Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий контур. В частности, этот поток может создаваться током, текущим в самом рассматриваемом контуре. Поэтому при всяком изменении силы тока в контуре в нем возникает э.д.с. индукции, которая вызывает дополнительный ток в контуре. Это явление называется самоиндукцией, дополнительные токи, вызываемые э.д.с. самоиндукции, - экстратоками самоиндукции.

Рассмотрим, от чего зависит э.д.с. самоиндукции. Магнитная индукция в любой точке поля пропорциональна силе тока  $I$  в контуре (при отсутствии железа и других ферромагнетиков). Поэтому и полный магнитный поток пропорционален току:

$$\Psi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется индуктивностью контура. Единицей индуктивности служит генри (Гн). Это индуктивность такого контура, в котором при силе тока  $1 \text{ А}$  возникает полный магнитный поток  $1 \text{ Вб}$ .

Применяя к явлению самоиндукции закон электромагнитной индукции (8), мы получаем для э.д.с. самоиндукции выражение

$$\mathcal{E} = -LdI / dt. \quad (9)$$

Э.д.с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока.

#### Закон Ленца.

Э.Х.Ленц установил закон (правило), позволяющий определить направление индукционного тока: индуцированные токи всегда направлены таким образом, чтобы препятствовать причине, вызвавшей, вызвавшей индукцию.

Примеры.

- 1) Пусть в магнитном поле находится неподвижный жесткий контур. При изменении магнитного поля в порожденное индуцированным током поле противодействует этому изменению.
- 2) При движении контура на проводники, по которым течет индуцированный ток, действуют силы, препятствующие движению.

Закон Ленца является следствием закона сохранения энергии.

Знак минус в формулах (8) и (9) соответствует закону Ленца. Поясним это на конкретных при-

мерах.

Пусть положительное направление нормали  $\vec{n}$  к контуру совпадает: направлением магнитной индукции (рис.7б). Тогда поток сквозь контур будет положительным. Положительное направление тока определяется выбором направления нормали и правилом правого винта (см. рис.7б).

Если теперь магнитное поле увеличивается, т.е.  $d\Phi/dt > 0$ , то, согласно (8),  $\mathcal{E} < 0$ , и следовательно, и  $I < 0$ . Это означает, что направление индукционного тока противоположно выбранному нами положительному направлению.

Пусть мы имеем дело с явлением самоиндукции и по контуру на рис.7б течет ток в положительном направлении. Если ток уменьшается, то, согласно (9),  $\mathcal{E} > 0$ . Следовательно, экстраток самоиндукции будет протекать в положительном направлении.

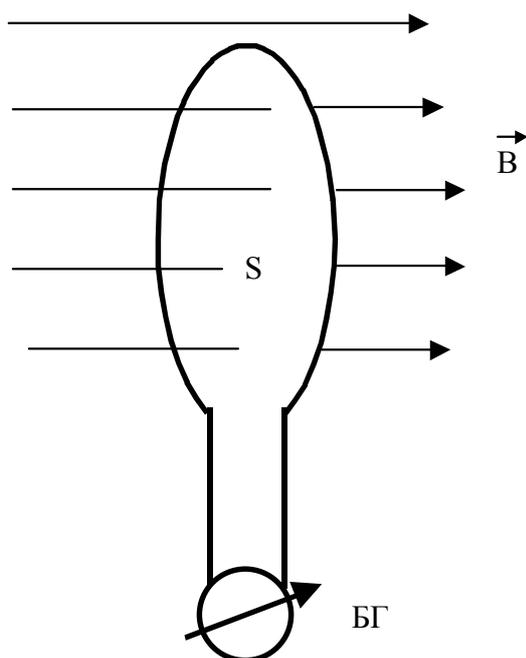


Рис.8

### Измерение магнитной индукции.

Известно много способов измерения магнитной индукции. Рассмотрим метод с использованием баллистического гальванометра, в основе которого лежит явление электромагнитной индукции.

В магнитном поле находится небольшая плоская проволочная катушка, соединенная с баллистическим гальванометром (БГ) - прибором для измерения прошедшего по цепи заряда (рис.8).

При измерениях катушку ориентируют перпендикулярно к направлению магнитной индукции. Тогда магнитный поток через один виток катушки равен  $BS$  ( $S$  - площадь витка), а полный поток через  $N$  витков  $\Psi = BSN$ . Затем магнитный поток через катушку быстро уменьшают до нуля. Это можно осуществить, например, быстро выдергивая катушку из области магнитного поля. При этом в катушке возникнет э.д.с. электромагнитной индукции, равная  $\mathcal{E} = -d\Psi/dt$ . Следовательно, согласно закону Ома, мгновенное значение силы тока есть  $I = -(d\Psi/dt)/R$ , где  $R$  - полное сопротивление цепи. Прошедший заряд равен

$$q = \int Idt = -\frac{1}{R} \int_{\Psi}^0 d\Psi = \frac{\Psi}{R} = \frac{BSN}{R}$$

Отсюда получаем

$$B = \frac{qR}{SN} \quad (10)$$

где  $R = R_K + R_G + R_{доб}$  - полное сопротивление (катушки, гальванометра и добавочного сопротивления для уменьшения чувствительности). Измерив заряд и зная значения  $S$ ,  $N$ ,  $R$ , можно определить по формуле 10 магнитную индукцию.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПОРЯДКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

#### 1. Состав лабораторной установки.

(Порядковые номера нанесены на приборы)

1. Катушка. для измерения магнитного поля.

3. Катушка для демонстрации электромагнитной индукции.
  4. Электромагнит с железным сердечником.
  5. Источник питания электромагнита (27 В, ток до 1 А).
  6. Амперметр для измерения силы тока электромагнита (до 1 А).
  7. Прибор для измерения силы Ампера (рамка, весы, гирьки).
  8. Источник питания рамки (6 В, ток до 1 А).
  9. Устройство для регулирования и измерения силы тока рамки.
  10. Баллистический гальванометр.
  11. Устройство для градуировки баллистического гальванометра.
  12. Демонстрационный прибор магнитоэлектрической системы.
  13. Микроамперметр со шкалой от  $-200$  до  $+200$  мкА.
  14. Соленоид.
  15. Коробка с ферромагнитным порошком.
  16. Большой постоянный магнит.
  17. Вкладыш для зазора электромагнита.
- Постоянные магниты: подковообразный (2шт.), кольцевой. Компас. Калькулятор типа МК-56.  
Соединительные провода и другие принадлежности.

## 2. Последовательность выполнения работы.

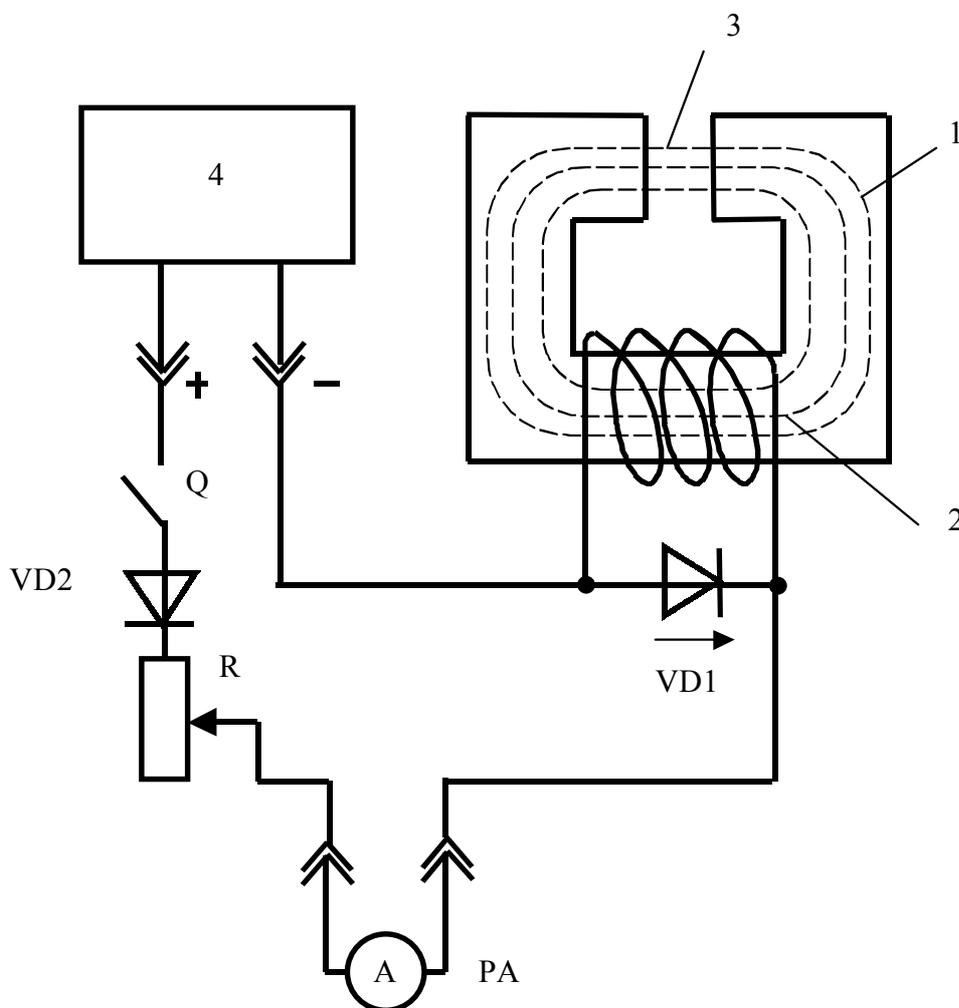


Рис.9

Работу выполняют одновременно и независимо две бригады, каждая из двух человек. Последовательность выполнения заданий следующая. Первая бригада (раньше по списку) выполняет

задания в естественном порядке. Вторая бригада в следующей последовательности:

3,4,5,1,2,6,7.

**ВНИМАНИЕ! Уберите подальше от магнитов механические часы. Собирать и разбирать электрические схемы можно только при выключенном от сети источнике питания.**

Задание 1. Ознакомление с электромагнитом и изучение линий магнитной индукции.

Электромагнит (прибор номер 4) состоит из железного сердечника 1 и катушки 2 (рис.9). При пропускании через катушку электрического тока в воздушном зазоре 3 образуется м.п., близкое к однородному.

Магнит питают от источника 5 постоянного напряжения 27 В. Реостатом R ток можно изменять примерно от 0,4 А до 1 А. Ток измеряют амперметром РА.

При размыкании выключателя Q вследствие явления самоиндукции в катушке возникает большая э.д.с. самоиндукции (формула 9), опасная для жизни и прибора (возникает электрическая дуга в выключателе). От этих последствий защищает диод VD1, включенный таким образом, что через него проходит экстраток самоиндукции (согласно закону Ленца, он протекает в направлении тока от источника питания). Диод имеет малое сопротивление для тока, направление которого показано на схеме стрелкой, т.е. для экстратока самоиндукции; тем самым диод закорачивает источник э.д.с. самоиндукции. В обратном направлении сопротивление диода велико и он не нарушает нормальную работу электромагнита. Диод VD2 защищает источник питания от тока короткого замыкания при неправильной (т.е. противоположной) полярности подключения источника питания.

1. Проверить, правильно ли собрана схема питания электромагнита (рис.9). Источник питания (прибор 5) должен быть подключен с соблюдением нужной полярности к клеммам электромагнита, последовательно с которым включен амперметр на ток до 1 А (прибор 6).
2. Включить сетевой тумблер источника питания. Включить тумблер питания магнита, при этом должна загореться индикаторная лампа (тумблер и лампа расположены слева от магнита).
3. С помощью ручки «Регулировка тока» и амперметра определить диапазон изменения тока магнита (он должен быть примерно от 0,4 А до, минимум, 1 А).
4. Пользуясь магнитным компасом, исследовать линии индукции в области зазора электромагнита (располагая компас непосредственно над зазором, а также сбоку, в плоскости зазора).
5. Прodelать тот же опыт с порошком из ферромагнитного материала (в коробке номер15). По коробке надо постукивать, для этого удобно использовать ластик.
6. Выключить ток магнита.
7. Выполнить задания п.п.4 и 5 для поля постоянных магнитов. Зарисовать линии индукции кольцевого магнита. Обратить внимание на то, что линии замкнуты.

Задание 2. Изучение закона Ампера.

Схема установки для измерения силы Ампера показана на рис.10.

Рамка 1, содержащая 40 витков медного провода, подвешена на рычажных весах 2 для измерения силы. Весы закреплены на штативе 3. Рамку подключают к источнику питания ИП с напряжением 6 В и током до 1 А (прибор 8) через устройство для регулирования и измерения силы тока рамки (прибор 9), которое содержит тумблер Т, реостат П и амперметр А. Перед измерением штатив устанавливают так, чтобы нижняя сторона рамки располагалась в центре зазора электромагнита, а плоскость рамки была параллельна полюсам. При этом линии магнитной индукции будут перпендикулярны плоскости рамки. Перед измерением весы должны быть уравновешены в отсутствии тока в рамке; для этого в чашке 4 весов помещен груз. При пропускании тока через рамку, расположенную в поле магнита, на нее действует вертикальная сила Ампера (4), равная

$$F_A = N \cdot I \cdot l \cdot B \quad (11)$$

где N - число витков рамки, I - сила тока в ней, l - длина нижней стороны рамки, B - магнитная индукция в зазоре магнита. В (11) не учитывается небольшая сила, действующая на верхнюю сторону рамки в слабом магнитном поле.

1. Вставить в зазор магнита деталь номер 17 из оргстекла, которая ограничивает вращение рамки.

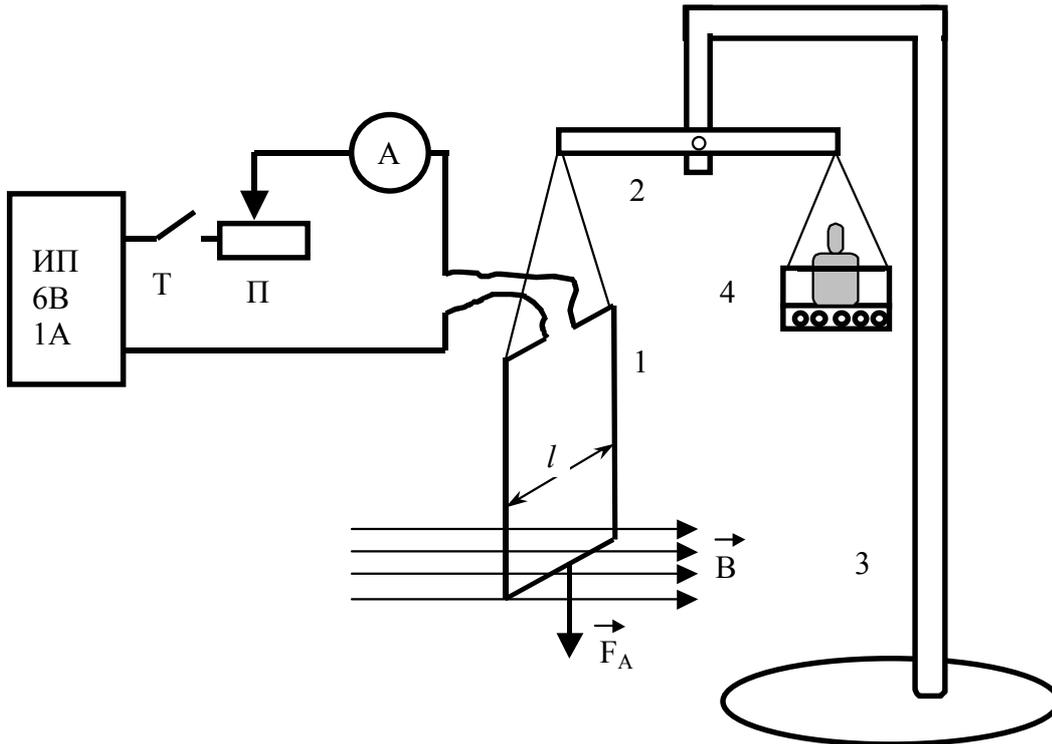


Рис.10

2. Установить штатив в рабочее положение, опустить рамку в щель детали 17. Найти такое положение штатива, при котором рамка свободно, без трения может двигаться по вертикали.  
3. Собрать электрическую схему питания рамки (рис.10).

4. Включить электромагнит.

Включить ток рамки, при этом стрелка амперметра должна отклониться вправо; в противном случае изменить полярность включения амперметра. Сила Ампера должна быть направлена вниз; если сила вверх, поменять местами вилки, соединяющие рамку со схемой.

6. Изучить зависимость силы Ампера от силы тока рамки (для двух значений тока магнита). для этого установить ток магнита  $I_M$ , равный 1,0 А для бригады 1 и 0,9 для бригады 2. В чашку 4 весов положить гирьку массой  $m=3-5$  г. Удерживая рукой рамку так, чтобы нижняя сторона находилась в середине зазора, и, изменяя ток рамки ручкой «Регулировка напряжения», добиться равновесия весов. Записать в таблицу 1 значения  $I_M$ ,  $I$  и  $m$ .

Таблица 1

$N = 40$  витков, длина стороны рамки  $l = \dots$

Ток магнита $I_M$	Ток рамки $I$	Масса гирьки $m$	Сила Ампера $F_A = mg$

**\*ПРИМЕЧАНИЕ:** в таблице примерно 10 строк.

7. Повторить измерения п.6 при большей массе груза, увеличивая ее с шагом 3-5 г до максимального значения, которое ограничивается максимальным током рамки 1 А. (Примечание: при нехватке разновесов можно использовать медные монеты СССР достоинством 1, 2, 3 и 5 копеек, массы которых 1, 2, 3 и 5 г соответственно.)

8. Уменьшить ток магнита ровно в два раза и повторить опыт.

9. Выключить источники питания рамки и магнита.

10. Измерить линейкой длину  $l$  нижней стороны рамки, результат записать в таблицу 1.

### Задание 3. Ознакомление с гальванометром.

Гальванометр - электроизмерительный прибор для измерения малых токов, напряжений и количества электричества. Наибольшее распространение получил гальванометр магнитоэлектрической системы, схематически показанный на рис.11.

Подвижная рамка 1 с большим числом витков провода находится в магнитном поле 2, образованном постоянным магнитом 3 и цилиндром 4 из магнитомягкого железа. При протекании постоянного тока через рамку возникают силы Ампера, которые создают момент сил относительно оси рамки. Рамка поворачивается, закручивая спираль 5, пока момент упругой силы не уравновесит момент сил Ампера. Линии магнитной индукции 2 направлены вдоль радиуса, поэтому угол поворота рамки (и связанной с ней стрелки) пропорционален силе тока.

1. Ознакомиться с устройством гальванометра (прибор 12).

### Задание 4. Градуировка баллистического гальванометра.

Баллистический гальванометр (БГ) предназначен для измерения заряда, прошедшего по цепи в течение короткого импульса тока. Прибор включают последовательно в цепь. БГ в принципе не отличается от других приборов магнитоэлектрической системы, но должен иметь повышенную инерционность: период  $T_0$  собственных колебаний рамки должен составлять несколько секунд. Если через БГ пропустить короткий импульс тока, то стрелка отклоняется, достигая наибольшего значения  $\alpha$  (в делениях), и возвращается назад. При этом  $\alpha$  пропорциональна  $q$ :

$$q = b \cdot \alpha \quad (12)$$

где  $b$  - коэффициент пропорциональности, называемый баллистической постоянной прибора. Для нахождения значения  $b$  выполняют градуировку гальванометра. Она заключается в том, что конденсатор емкости  $C$ , заряженный до напряжения  $U$  и, следовательно, имеющий известный заряд  $q = CU$ , быстро разряжают через БГ и считывают максимальное отклонение  $\alpha$  стрелки прибора. Измерения выполняют для различных значений  $q$ , изменяемых путем изменения как напряжения, так и емкости. По результатам измерений строят графическую зависимость значения  $\alpha$  от  $q$ , из которой видно, что  $\alpha$  пропорционально заряду. Из полученного графика опреде-

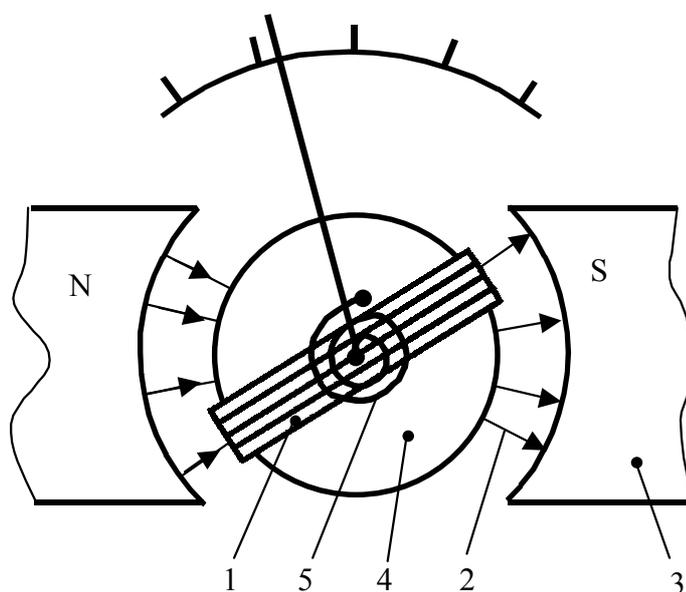


Рис.11

ляют численное значение баллистической постоянной  $b$ .

Опыт выполняют с помощью прибора (номера 1, 10, 11), электрическая схема и расположение элементов которого показаны на рис. 12. Прибор имеет два режима работы, устанавливаемых переключателем SA3: в положении 1 - градуировка, в положении 2 - измерение магнитной ин-

дукции с помощью катушки К. Баллистический гальванометр БГ постоянно замкнут накоротко с помощью кнопочного переключателя SB для защиты прибора от повреждения при толчках и быстрого успокоения колебаний рамки (объяснить механизм защиты). Перед каждым измерением кнопку SB необходимо нажать для разрыва цепи. С помощью резистора  $R_{\text{доб}}$  установлена требуемая чувствительность прибора для измерения магнитного поля. С помощью винта 1 устанавливают нулевое показание баллистического гальванометра.

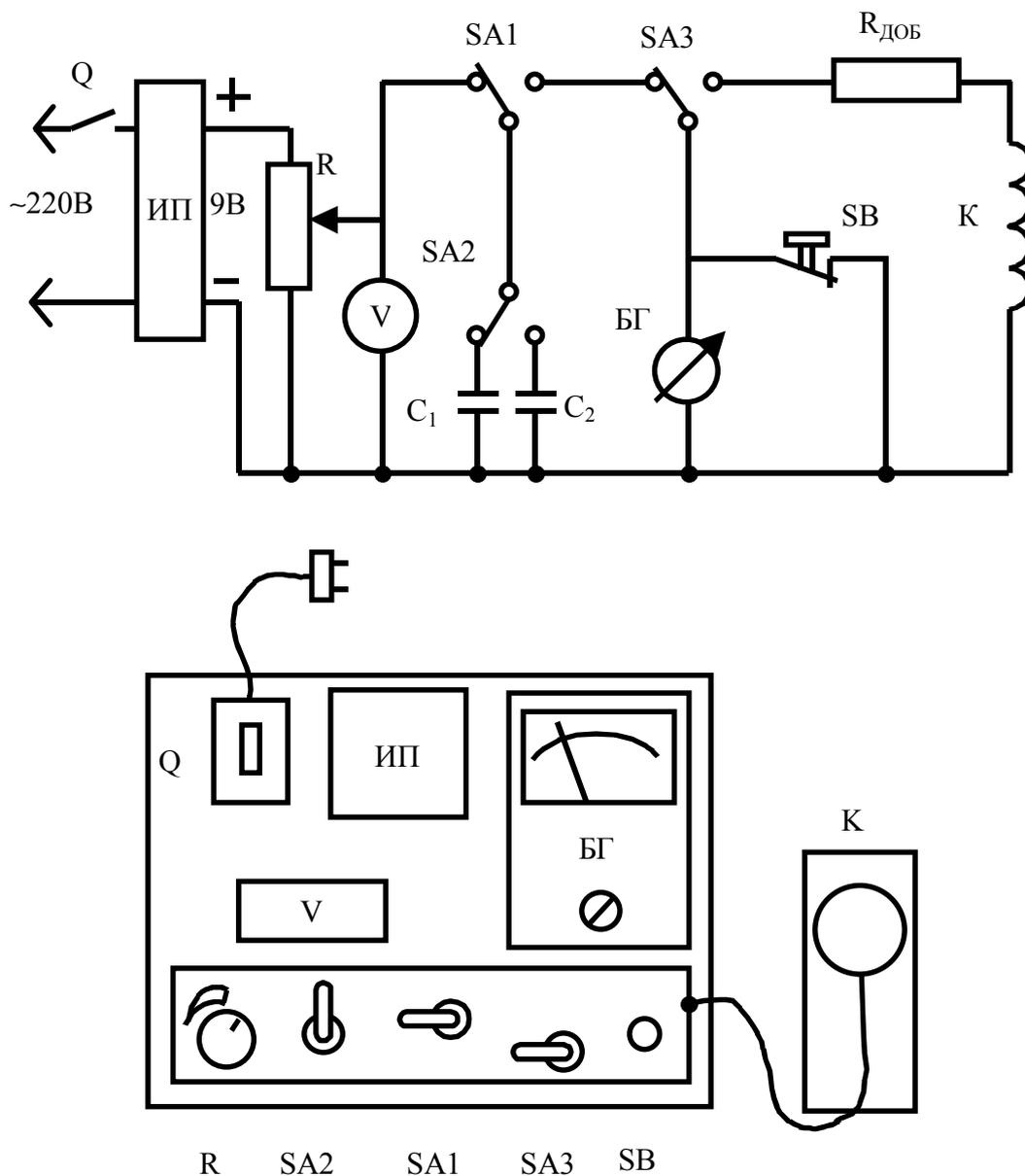


Рис.12

При градуировке прибора конденсатор заряжают (практически мгновенно) от источника тока ИП до напряжения  $U$ , измеряемого вольтметром. Напряжение можно изменять от нуля до 9 В с помощью делителя напряжения  $R$ , поворачивая ручку «Изменение напряжения». Затем переключатель SA1 устанавливают в положение 2 («Разрядка»). При этом заряд  $q$  быстро проходит через БГ; измеряют максимальное отклонение  $\alpha$  стрелки прибора. Результаты измерения  $U$  и  $\alpha$  записывают в таблицу 2. Для того чтобы снять градуировочную зависимость в пределах всей шкалы прибора, опыт повторяют при различных напряжениях. Затем изменяют емкость конденсатора и повторяют градуировку. Значения емкости приведены на схеме установки.

Таблица 2

C	U	$q=CU$	$\alpha$

**\*ПРИМЕЧАНИЕ:** в таблице примерно 10 строк.

Задание 5. Демонстрация электромагнитной индукции.

Проделать опыты, описанные в разделе «Электромагнитная индукция» с помощью прибора, показанного на рис.14 (номера 3, 13, 14). Явление электромагнитной индукции наблюдают с помощью микроамперметра 2, подключенного к катушке 1. Источниками магнитного поля служат постоянные магниты или соленоид (электромагнит) 3, питаемый от источника 4. Блок

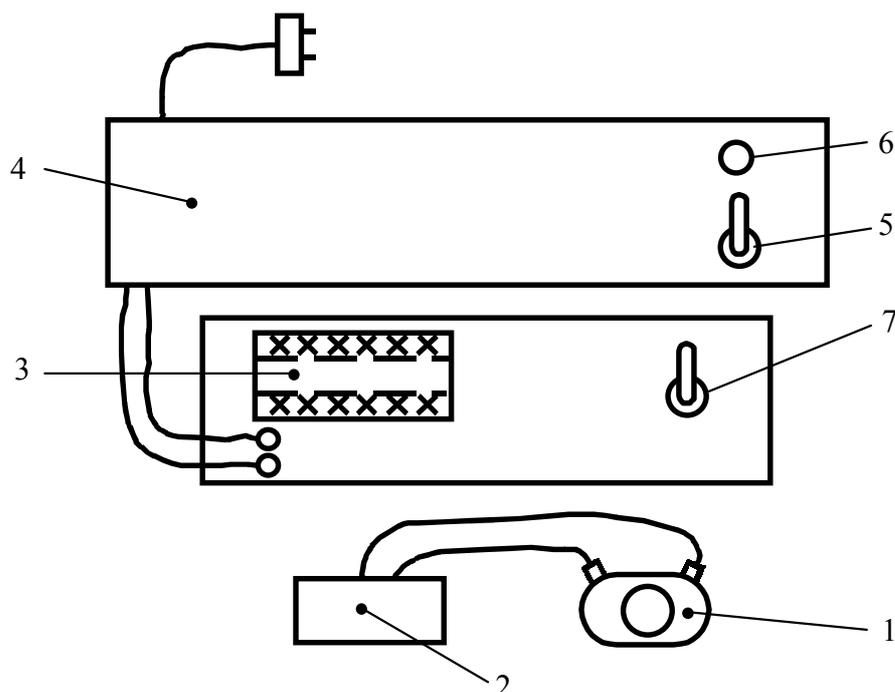


Рис.14

питания включают тумблером 5, при этом должна загореться лампа 6. С помощью переключателя 7 на три положения можно пропустить через соленоид ток двух разных направлений или выключить его.

Задание 6. Измерение магнитной индукции баллистическим гальванометром.

Включить магнит и установить ток  $I_M=1,0$  А - для первой бригады и 0,9 А - для второй. (Измерения выполняют при тех же двух значениях тока магнита, при которых измерялась сила Ампера.) Катушку вставляют в середину зазора электромагнита, из которого надо убрать вкладыш (деталь 17). Быстро выдергивая катушку, замечают максимальное отклонение  $\alpha$  стрелки гальванометра. Результаты пяти измерений записывают в таблицу 3. Затем уменьшить ток магнита в два раза и повторить измерения.

Таблица 3

$I_M$	$\alpha$

**\*Примечание:** в таблице 10 строк.

Для каждого значения тока магнита находят среднее  $\langle \alpha \rangle$  и записывают его в таблицу 4. В нее же записывают параметры установки, приведенные на схеме прибора.

По результатам измерений определить магнитную индукцию по формуле (10).

Задание 7. Демонстрация силы Лоренца и определение знака заряда электрона.

С помощью осциллографа и постоянного магнита можно продемонстрировать силу  $F_M$ , действующую на электрический заряд в магнитном поле (формула (2)). Электронно-лучевая трубка осциллографа схематически показана на рис.13. Электронная пушка 1 испускает пучок 2 быстрых электронов, которые вызывают свечение люминесцентного экрана 3. Поднеся к экрану подковообразный магнит 4, можно наблюдать отклонение электронов. Прodelать данный опыт с осциллографом, имеющимся в лаборатории. С помощью правила левой руки определить знак заряда электрона. Результаты представить в отчете.

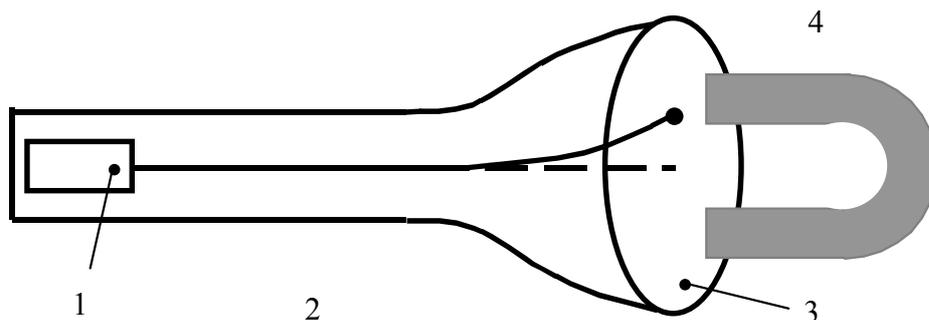


Рис.13

**ВНИМАНИЕ! Подобный опыт нельзя проводить с цветным кинескопом монитора или телевизора, так как в результате намагничивания маски перед экраном кинескоп будет испорчен.**

Обработка и анализ результатов измерений

1. По результатам измерений построить графическую зависимость силы Ампера в ньютонах от силы тока в рамке (для двух значений тока магнита). Через начало координат и экспериментальные точки провести прямую. Сделать вывод, согласуются ли результаты измерений с линейной зависимостью (3) силы Ампера от тока рамки.
2. Используя полученный график и формулу (11), вычислить магнитную индукцию для двух значений тока магнита. Результаты расчета привести в таблице 4.

Таблица 4

Баллистическая постоянная  $b = \dots$  (получено в задании 4).

Сопротивление БГ  $R_{\Gamma} = \dots$  Ом,

Характеристики катушки:  $N = \dots$  витков,  $S = \dots$  м<sup>2</sup>,  $R_K = \dots$  Ом

Добавочное сопротивление  $R_{\text{ДОБ}} = \dots$  Ом. Полное сопротивление  $R = R_K + R_{\Gamma} + R_{\text{ДОБ}} = \dots$  Ом.

$I_M$	$\langle \alpha \rangle$	$q = b \langle \alpha \rangle$	Измерения магнитной индукции		Отношение $B_1/B_2$
			Методом БГ ( $B_1$ )	Из силы Ампера ( $B_2$ )	

**\*Примечание: в таблице 2 строки.**

3. По результатам градуировки БГ построить графическую зависимость  $\alpha$  от заряда  $q$ . Результаты измерений для различной емкости представить на графике различными значками. Через экс-

периментальные точки и начало координат провести прямую. Сделать вывод, пропорционален ли баллистический отброс прошедшему заряду. Используя полученный график и формулу (12), определить значение баллистической постоянной  $b$  (записать его в таблицу 4).

4. По результатам измерений с БГ вычислить по формуле (10) магнитную индукцию, результат записать в таблицу 4.

5. Сравнить результаты измерений магнитного поля двумя методами - из силы Ампера и баллистическим гальванометром. Для этого вычислить их отношение и представить в таблице 4.

6. Используя результаты измерения магнитного поля с помощью БГ, сделать вывод, растет ли сила Ампера пропорционально магнитной индукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество: Учебное пособие. - М.: Наука 1985. – 576 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. - М.: Наука. 1978. – 480 с.
3. Эрик Роджерс. Физика для любознательных. Т.3. - М. Мир. 1971. - 664 с.