

№6. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с принципом работы баллистического гальванометра и изучение баллистического метода магнитных измерений.

2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Постоянный магнит, баллистический гальванометр, измерительная катушка.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Принцип работы баллистического гальванометра.

Баллистический гальванометр является разновидностью гальванометра магнитоэлектрической системы. Схема гальванометра магнитоэлектрической системы приведена на рис. 1. Подвижная рамка 1, состоящая из N прямоугольных витков, подвешена на растяжках 2 между полюсами магнита 3. На одной из растяжек закреплено зеркальце 4. Полусные наконечники 5 и цилиндр 6 (из мягкого железа) позволяют получить в зазоре между полюсами и цилиндром, где вращается рамка, практически радиальное магнитное поле. Измеряемый ток подводится к рамке через растяжки. Возникает вращающий момент:

$$\vec{M} = N [\vec{P}_m \times \vec{B}], (1)$$

где \vec{B} - индукция магнитного поля в воздушном зазоре;

$P_m = IS$ - магнитный момент рамки с током;

S - площадь витка.

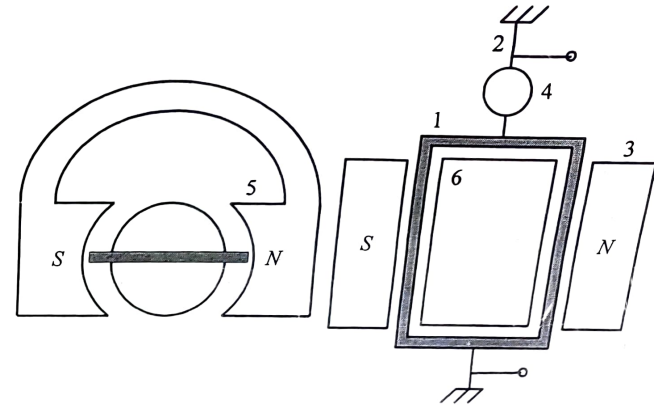


Рис. 1

По модулю $M = NISB \sin \alpha$ остается постоянным при повороте рамки, т.к. все величины, в том числе $\sin \alpha = 1$, постоянны. Рамка остановится в положении, когда вращающий момент будет уравновешен моментом упругих сил растяжек:

$$NISB = D\varphi, (2)$$

где D - момент сил кручения на единицу угла поворота;

φ - угловое отклонение рамки, определяемое по отклонению светового луча, падающего на зеркальце.

$$\text{Тогда } \varphi = \frac{NISB}{D} I = CI, (3)$$

т.е. угол поворота пропорционален величине измеряемого тока, где

$$C = \frac{NISB}{D} - \text{чувствительность прибора.}$$

При работе с гальванометром имеет значение не только его чувствительность, но и характер движения подвижной части. Рамка на растяжках - это механическая колебательная система. При разомкнутой рамке уравнение движения (2-ой закон Ньютона) имеет вид:

$$J\ddot{\varphi} = -D\varphi, (4)$$

где J - момент инерции рамки.

Тогда $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}$ (5) - период собственных колебаний.

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи, содержащей рамку, за промежуток времени τ , малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки T_0 . Момент инерции J баллистического гальванометра искусственно увеличивают, так чтобы период собственных колебаний T_0 был порядка 10-15 секунд. Тогда за время протекания импульса тока $t \leq \tau$ рамка не успевает выйти из положения равновесия, и уравнение движения имеет вид:

$$J\ddot{\phi} = NBSI \quad (6).$$

Откуда

$$NBS \int_0^{\tau} Idt = NBSq = J\dot{\phi} \quad (7)$$

При этом рамка приобретает кинетическую энергию:

$$W = \frac{1}{2} J\dot{\phi}^2 \quad (8)$$

Эта энергия тратится на закручивание подвеса на угол ϕ :

$$\frac{1}{2} J\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2} D\phi^2 \quad (9)$$

Из уравнения (9) с учетом (7) получаем:

$$\phi = \frac{NBS}{\sqrt{JD}} q = bq \quad (10)$$

где $b = \frac{NBS}{\sqrt{JD}}$ баллистическая постоянная прибора.

Т.е. первый баллистический отброс рамки ϕ пропорционален количеству электричества q , протекающего через нее. Название "баллистический отброс" произошло из электромеханической аналогии. Баллистика - наука о движении артиллерийских снарядов. Импульс тока, сообщая рамке угловую скорость $\dot{\phi}$ (уравнение 7), действует подобно взрыву пороха, сообщаящего снаряду скорость V . Далее снаряд движется по баллистической кривой, а рамка "баллистически" закручивается на угол ϕ .

Принцип баллистического метода измерений.

В данной работе используется предложенный А.Г.Столетовым и ставший классическим баллистический метод. Сущность метода заключается в следующем. Баллистический гальванометр включается в цепь катушки, помещенной в магнитное поле, индукция B которого подлежит измерению. Размеры измерительной катушки определяются степенью неоднородности поля. Чем неоднороднее поле, тем меньше должна быть катушка.

Магнитный поток через катушку:

$$\Phi = BSN \quad (11)$$

где S - площадь одного витка катушки;

N - число витков;

α - угол между вектором \vec{B} и нормалью к плоскости витка.

При изменении магнитного потока через измерительную катушку в ней возникает Э.Д.С. электромагнитной индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (12)$$

Кроме того, поскольку сила тока не остается постоянной, в цепи катушки и гальванометра возникает Э.Д.С. самоиндукции

$$\varepsilon_s = -\frac{LdI}{dt}, \quad (13)$$

где L - индуктивность цепи.

Запишем 2-ое правило Кирхгофа для цепи:

$$RI = -\frac{d\Phi}{dt} - L\frac{dI}{dt}, \quad (14)$$

где R - активное сопротивление измерительной катушки и рамки гальванометра.

Проинтегрируем выражение (14) за время τ прохождения импульса индукционного тока:

$$R \int_0^{\tau} Idt = \Delta\Phi - L(I_{\text{кон.}} - I_{\text{нач.}}), \quad (15)$$

$$\text{или } Rq = \Delta\Phi, \quad (16)$$

где учтено, что $I_{\text{кон.}} = I_{\text{нач.}} = 0$.

Отсюда следует, что при изменении магнитного потока через измерительную катушку на величину $\Delta\Phi$ в цепи гальванометра пройдет количество электричества:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R}, (17)$$

Отброс баллистического гальванометра пропорционален количеству протекающего через него электричества, если время протекания заряда мало по сравнению с периодом гальванометра (формула 10). По измеренной величине отброса можно определить величину изменения магнитного потока (формула 17), а затем - индукцию магнитного поля.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис.2.

Баллистический метод измерений применен для измерения индукции в зазоре между полюсами постоянного магнита 1. Плоскость измерительной катушки 2 параллельна плоскости полюсов магнита. Катушка соединена с баллистическим гальванометром 3.

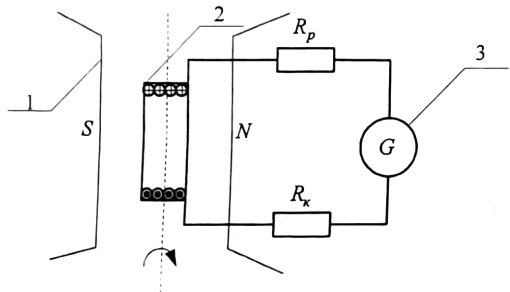


Рис.2

Проще всего контролируемое изменение магнитного потока можно получить поворотом катушки на 180° . Тогда:

$$\Delta\Phi = 2\Phi = 2BNS, (18)$$

В соответствии с (17):

$$2BNS = qR, (19)$$

$$\text{и } B = \frac{qR}{2NS}, (20)$$

Величина заряда q отсчитывается по баллистическому отбросу m в делениях шкалы

$$q = \frac{m}{b}, (21)$$

где b - баллистическая постоянная прибора.

Тогда

$$B = \frac{R}{2NSb} m, (22)$$

Следует заметить, что измеренная индукция в зазоре равна индукции в веществе магнита, поскольку поле, пересекая границу раздела, имеет только нормальные составляющие, а нормальные составляющие индукции не изменяются.

4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить измерительную катушку посередине между полюсами магнита так, чтобы ее плоскость была параллельна плоскости полюсов.

2. Быстро повернув катушку на 180° , визуально зафиксировать максимальный баллистический отброс "зайчика" гальванометра m (в делениях шкалы).

3. Повторить измерения 10 раз. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

i - № измер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_i - отброс в делениях шкалы										

4.3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить среднее значение баллистического отброса:

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} m_i}{10}.$$

2. Вычислить среднее значение магнитной индукции:

$$\bar{B} = -\frac{R}{2NS\bar{m}}.$$

$N = 300$
 $\bar{m} = 8,06 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$
 $S = 54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

3. Определить относительную погрешность измерения:

$$\epsilon = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta m}{\bar{m}}.$$

В данном случае

$\Delta N = 0$ - число витков катушки точно известно;

$\Delta b = 0$ - постоянная гальванометра также точно известна;

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta d}{d}; \Delta d = 0.1 \text{ мм} - \text{измерение диаметра катушки}$$

производится штангенциркулем;

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 0.01 - \text{определяется классом прибора для измерения}$$

сопротивления;

$\Delta m = 1$ - принимается равной цене деления шкалы прибора.

$$\text{Тогда } \epsilon = \frac{\Delta B}{B} \approx \frac{\Delta m}{\bar{m}}, \text{ т.к. } \frac{\Delta m}{\bar{m}} \text{ более чем вдвое превышает}$$

$$\text{суммарный вклад } \frac{\Delta S}{S} \text{ и } \frac{\Delta R}{R}.$$

4. Определить абсолютную погрешность

$$\Delta B = \epsilon \bar{B}$$

5. Записать окончательный результат:

$$B = \bar{B} \pm \Delta B; \epsilon = \%, \text{ соблюдая правила округлений.}$$

Приложение.

Параметры экспериментальной установки (на установке):

N - число витков измерительной катушки;

S - площадь витка;

$R = R_k + R_p$ - сопротивление измерительной катушки и рамки

гальванометра;

b - баллистическая постоянная гальванометра.

$$R_k \ll R_r \quad R_k - \text{пренебрегаем}$$

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать выражение для вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле. Как достигается радиальное магнитное поле в гальванометре магнитоэлектрической системы.

2. Условие равновесия рамки при протекании тока через гальванометр.

3. Главные особенности баллистического гальванометра.

4. Сущность баллистического метода измерения индукции.

5. Сформулировать закон электромагнитной индукции. Когда возникает взаимная индукция и когда самоиндукция в баллистическом методе.

6. Показать, что индукция B в средней части длинной и узкой щели, сделанной в твердом ферромагнетике, равна $\mu_0 H$, где H - напряженность поля в ферромагнетике, если эта щель параллельна полю, и что B равна индукции в ферромагнетике, если щель перпендикулярна \vec{B} . ($B = |\vec{B}|$; $H = |\vec{H}|$).

Список литературы

1. И.В. Савельев. "Курс общей физики", т.2, М., "Наука", 2002

2. Д.В. Сивухин "Курс общей физики", "Электричество", М., "Наука", 1983

3. В.И. Иверонова "Физический практикум. Электричество и оптика", М., "Наука", 1968.