

## Лабораторная работа № 335

## ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

**Приборы и принадлежности:** электромагнит, весы Ампера, разновес, два стабилизированных источника постоянного тока.

**Введение.** Согласно *закону Ампера* на элемент тока  $i \cdot d\vec{l}$  в магнитном поле действует сила

$$d\vec{F} = i [d\vec{l}, \vec{B}], \quad (1)$$

где  $i$  – сила тока,  $\vec{B}$  – магнитная индукция поля в месте расположения элемента проводника  $d\vec{l}$ . Направление вектора  $d\vec{l}$  определяется направлением тока  $i$ , текущего в нем.

Раскроем векторное произведение (1), тем самым найдем модуль вектора  $dF$ :

$$dF = i dl B \sin(\vec{dl}, \vec{B}).$$

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно найти по правилу векторного произведения (1) или с помощью «правила левой руки», которое используется в физике средней школы.

На прямолинейный проводник длиной  $l$ , расположенный перпендикулярно линиям индукции, действует сила, величина которой определяется формулой

$$F = i \cdot l \cdot B. \quad (2)$$

Из выражения (2) вытекает физический смысл магнитной индукции как силовой характеристики магнитного поля

$$B = \frac{F}{i \cdot l}. \quad (3)$$

В данной работе  $B$  определяется, с одной стороны, по формуле (3), вытекающей из закона Ампера, путем непосредственного измерения  $i$ ,  $l$ ,  $F$ , с другой – рассчитывается по *формуле Гопкинса*. Формула Гопкинса получается из *теоремы о циркуляции вектора  $\vec{H}$* , которая формулируется следующим образом: «**Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охваченным этим контуром.**»

$$\oint_{(L)} \vec{H} \cdot d\vec{L} = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (4)$$

Магнитная цепь электромагнита, с помощью которого создается магнитное поле с индукцией  $B$ , состоит из прямоугольного железного

сердечника – *ярма* – с небольшим воздушным зазором. Мысленно проведем одну из силовых линий магнитного поля (на рис. она показана штриховыми линиями). Обозначим  $L_C$  длину той части силовой линии, которая находится внутри стального сердечника,  $L_B$  – ее длину в воздушном зазоре. Тогда полная длина магнитного контура

$$L = L_C + L_B.$$

Магнитное поле создается током  $I$ , протекающим в обмотке электромагнита, выполненной в виде двух катушек, содержащих  $w$  витков. Вычислим циркуляцию вектора напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура, *совпадающего с силовой линией* и охватывающего все токи (т.е. все витки  $w$  с током  $I$  в каждом).

$$\oint_{(L)} \vec{H} \cdot d\vec{L} = Iw,$$

где  $d\vec{L}$  – элемент длины контура, *направленный в сторону движения* при интегрировании (по направлению обхода контура).

Из условия непрерывности линий индукции магнитного поля и, пренебрегая некоторым рассеянием их в воздушном зазоре, получим, что индукция  $B$  в сердечнике и в зазоре одинакова. Напряженность же поля в сердечнике  $H_C$  и в зазоре  $H_B$  различна, и соответственно, равна

$$H_C = \frac{B}{\mu_0 \mu_C}, \quad H_B = \frac{B}{\mu_0 \mu_B}, \quad (5)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_C$  – магнитная проницаемость стали, из которой изготовлен сердечник,  $\mu_B$  – магнитная проницаемость воздуха в зазоре.

Раскроем скалярное произведение в равенстве (4).

$$\oint_{(L)} H \cdot dL \cdot \cos(\vec{H}, d\vec{L}) = H_C L_C + H_B L_B = B \left( \frac{L_C}{\mu_0 \mu_C} + \frac{L_B}{\mu_0 \mu_B} \right), \quad (6)$$

тогда

$$B = \frac{Iw}{\frac{L_C}{\mu_0 \mu_C} + \frac{L_B}{\mu_0 \mu_B}}. \quad (7)$$

Выражение (7) называется *формулой Гопкинса*. Умножив обе части равенства (7) на площадь поперечного сечения сердечника  $S$ , можно привести его к виду

$$BS = \frac{Iw}{\frac{1}{\mu_0 \mu_C} \cdot \frac{L_C}{S} + \frac{1}{\mu_0 \mu_B} \cdot \frac{L_B}{S}}, \quad (8)$$

где  $BS = \Phi$  – магнитный поток в сердечнике и воздушном зазоре.

Формула (8) «внешне» похожа на уравнение для тока, записанное на основании закона Ома при последовательно соединенных проводниках.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{E}{\frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{L_1}{S} + \frac{1}{\gamma_2} \cdot \frac{L_2}{S}}. \quad (9)$$

Здесь  $I$  – сила тока в цепи двух линейных проводников с длинами  $L_1$  и  $L_2$ , сечением  $S$ , удельным сопротивлением  $1/\gamma_1$  и  $1/\gamma_2$ , соответственно ( $\gamma$  – удельная электропроводность);  $E$  – ЭДС источника тока. По аналогии с выражением (9) соотношение (8) называется *законом Ома для магнитной цепи*. Величина  $Iw = E_M$ , создающая магнитный поток  $\Phi$ , называется *магнитодвижущей силой* (МДС). Величины

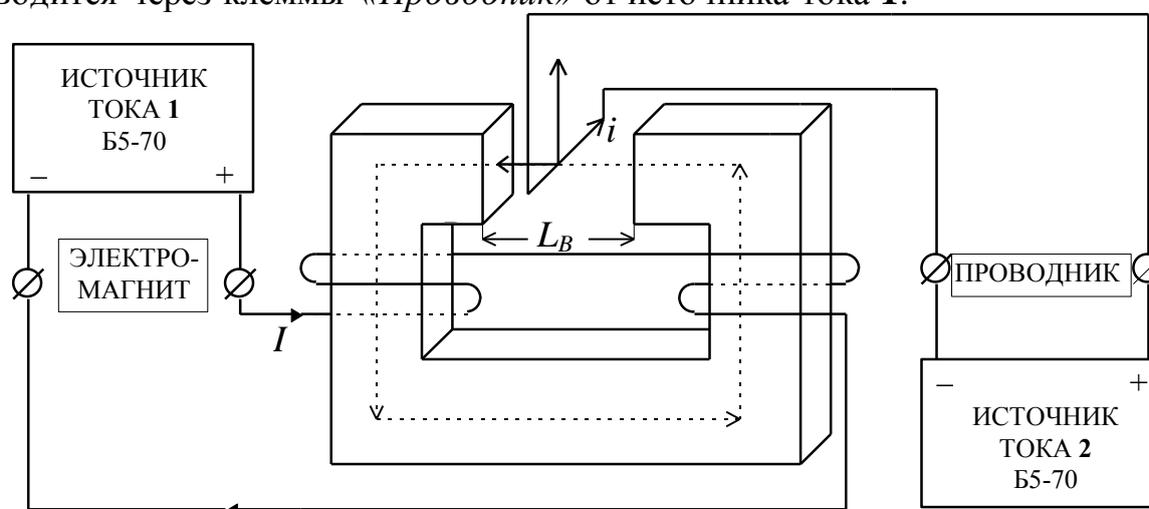
$$R_{MC} = \frac{1}{\mu_0 \mu_C} \cdot \frac{L_C}{S}, \quad R_{MB} = \frac{1}{\mu_0 \mu_B} \cdot \frac{L_B}{S}$$

называются *магнитным сопротивлением* железного сердечника и воздушного зазора, а их сумма  $R_M = R_{MC} + R_{MB}$  – *полным магнитным сопротивлением* магнитной цепи.

Вернемся к соотношению (7). Из него видно, что величина индукции  $B$  возрастает с уменьшением ширины воздушного зазора (уменьшается магнитное сопротивление).

**Задачей работы** является проверка формулы Ампера и определение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита двумя способами: 1) по формуле Ампера и 2) путем расчета по формуле Гопкинса.

**Описание установки.** Экспериментальная установка изготовлена на базе аналитических весов. Вместо правой чашки к их коромыслу подвешен измерительный проводник длиной  $l$ , расположенный в воздушном зазоре электромагнита перпендикулярно линиям магнитной индукции. Ток к нему подводится через клеммы «Проводник» от источника тока 1.



Электромагнит представляет собой две катушки, соединенные между собой последовательно, каждая содержит по 1000 витков медного провода. Концы обмотки выведены на клеммы с надписью «Электромагнит».

Сердечник электромагнита изготовлен из прямоугольных брусков *магнитомягкого* железа (стали). Крепление полюсных наконечников позволяет изменять величину воздушного зазора  $L_B$ .

Электрическая цепь установки состоит из двух частей: а) цепи питания электромагнита и б) цепи питания измерительного проводника (см. рисунок).

**Измерения.** 1. Приведите все приборы в исходное положение: весы арретируйте, регуляторы “ $U$ ” обоих источников питания выведите в крайнее левое положение (против часовой стрелки).

2. Соберите электрическую цепь по схеме (см. рисунок).

3. После проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки цепи включите источник питания электромагнита и установите ток  $I=1,00$  А.

4. Помещая на левую чашку весов гирьки разновеса, уравновесьте весы с точностью  $\pm 3$  мг, а показание светового индикатора весов (миллиграммы и их десятые доли) запишите как начальный отсчет.

**Примечание 1.** Все манипуляции на чашках весов (укладка разновеса или его снятие) производятся только при арретированных весах!

**Примечание 2.** Световой индикатор равновесия весов включается поворотом ручки арретира против часовой стрелки. При этом нет необходимости выводить арретир полностью, достаточно пронаблюдать, в какую сторону весы разбалансированы, так как при сильно неуравновешенных весах направление разбаланса видно уже при незначительном повороте арретира.

5. Включите источник питания измерительного проводника. Установите в нем небольшой ток, примерно 0,02 А.

6. Наблюдая за индикатором равновесия весов, установите такое направление тока  $i$  в проводнике, чтобы он *выталкивался* силой Ампера **вверх**.

7. Навесьте на правую серьгу весов перегрузок – кольцевую гирьку – массой 100 мг. Навешивание гирек производится при арретированных весах путем плавного вращения лимбов: большим лимбом навешиваются гирьки в сотни миллиграммов, малым – в десятки.

8. Медленно и плавно увеличивая ток в проводнике от источника **2**, приведите весы в равновесие. Запишите величину этого тока  $i$  в таблицу.

9. То же самое сделайте с перегрузками 200 мг, 300 и т.д. до 900 мг.

$L_B=$		$L_C=$			$l=$		$w=$
№ изм.	$I, A$	$m, мг$	$i, A$	$F, Н$	$B, Тл$	$\bar{B} - B_i, Тл$	$(\bar{B} - B_i)^2, Тл^2$

10. Установите другой ток электромагнита  $I$  (по указанию преподавателя).

11. Проверьте равновесие весов при отсутствии перегрузка, запишите начальный отсчет на весах.

12. Повторите измерения п. 7–9 для нового значения тока  $I$ .

13. Запишите параметры установки в отведенное в таблице место.

**Обработка результатов измерений.** 1. Постройте графики зависимости силы  $F$ , действующей на проводник с током в магнитном поле, от тока  $i$  в нем для обоих значений намагничивающего тока  $I$ .

2. Вычислите индукцию  $B$  в зазоре электромагнита по формуле (3).

3. Вычислите среднее значение индукции  $\bar{B}$  и доверительный интервал  $\Delta B$  при том и другом намагничивающем токе.

4. Рассчитайте  $B$  по формуле Гопкинса (7) при обоих значениях тока электромагнита. Магнитную проницаемость стального сердечника можно взять примерно  $5 \cdot 10^3$ , так как химический состав его неизвестен [1].

5. Сравните полученную величину с индукцией, определенной из закона Ампера. Результат сравнения оформите в виде таблички. Если между полученными значениями есть расхождения, превышающие ширину доверительного интервала, предложите возможные причины их возникновения.

#### Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля?

2. Сформулируйте закон Ампера. Запишите его в дифференциальной и интегральной форме. Как находят направление силы Ампера, зная направление поля и положение проводника в нем? Подтверждают ли Ваши результаты справедливость закона Ампера?

3. Сформулируйте теорему о циркуляции напряженности магнитного поля. Объясните, как ею пользоваться в конкретном случае.

4. Выведите формулу Гопкинса.

5. Что такое магнитодвижущая сила, магнитное сопротивление, магнитный поток и как они взаимосвязаны?

6. Какими способами определяется в данной работе индукция магнитного поля в зазоре электромагнита?

7. От чего зависит индукция магнитного поля в зазоре электромагнита?

8. Объясните устройство и принцип действия экспериментальной установки. Какова методика нахождения индукции с помощью весов Ампера?

9. Нарисуйте схему электрической цепи. Как должны быть направлены индукция магнитного поля  $\vec{B}$  в зазоре электромагнита и сила тока  $i$  в проводнике, чтобы сила Ампера была направлена вверх? Как достичь нужного направления силы Ампера?

10. Почему первоначальное уравновешивание весов следует производить при наличии в электромагните рабочего тока?

#### Список рекомендуемой литературы

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985. §76, 94, 120.

2. Савельев И.В. Курс физики. М.: Наука, 1989. Т.2, §37, 38, 52.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1983. Т.3, §49, 59, 61.