

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 μ_0 – магнитная постоянная, μ_C – магнитная проницаемость стали, из которой изготовлен сердечник, μ_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 (γ – 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 Φ , называется *магнитодвижущей силой* (МДС). Величины

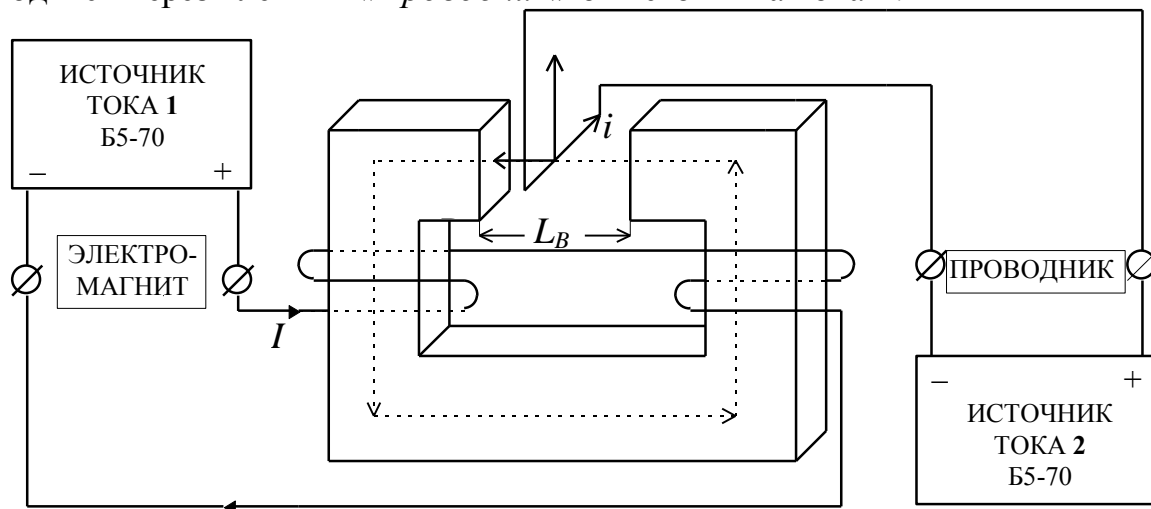
$$R_{MC} = \frac{1}{\mu_0 \mu_C} \cdot \frac{L_C}{S}, \quad R_{MB} = \frac{1}{\mu_0 \mu_B} \cdot \frac{L_B}{S}$$

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 ± 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 ΔB 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.