

Лабораторная работа № 2-16

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Т.М. Ахметчина

Цель работы

Изучение явления электромагнитной индукции в неподвижном проводящем контуре, находящемся в переменном магнитном поле. Исследование зависимости ЭДС индукции от частоты и напряженности переменного магнитного поля. Установление зависимости ЭДС индукции от параметров индукционной катушки. Определение магнитной постоянной μ_0 .

Теоретическое введение

В 1831 году М. Фарадей высказал предположение, что если электрические токи создают магнитное поле, то и магнитное поле может вызывать появление в проводнике электрического тока. Фарадей опытным путем обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. *Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через него называют электромагнитной индукцией, а возникающий ток – индукционным.*

Согласно опытам Фарадея, явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменениях магнитного потока в контуре возникает *электродвижущая сила индукции* ε_i , величина которой не зависит от способа, которым осуществляется изменение магнитного потока и определяется лишь скоростью изменения магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt}$. При изменении знака $\frac{d\Phi}{dt}$ направление ε_i также меняется. Из опытов Фарадея

следует, что направление индукционного тока зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий контур, а также от направления вектора магнитной индукции. Таким образом, ЭДС электромагнитной индукции ε_i в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|. \quad (16.1)$$

Магнитный поток через поверхность S по определению равен:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (16.2)$$

Направление индукционного тока (а, значит, и ЭДС индукции) определяется **правилом Ленца**: *индукционный ток в замкнутом контуре имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток.*

Учитывая правило Ленца, запишем выражение (16.1) в виде:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (16.3)$$

Выражение (16.3) определяет **основной закон электромагнитной индукции**:

ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Знак «минус» в формуле (16.3) является математическим выражением правила Ленца.

Рассмотрим два контура (рис. 16.1).

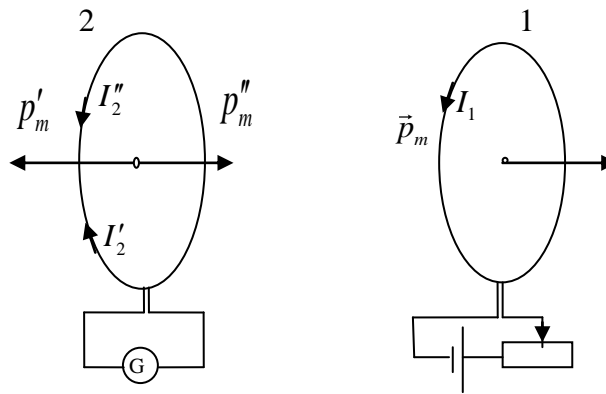


Рис. 16.1. Определение направления индукционного тока в замкнутом контуре, при помещении его в магнитное поле.

Магнитное поле создается контуром 1 , по которому пропускается ток I_1 . Силу тока в контуре 1 можно изменять с помощью реостата. Возникающий при этом в контуре 2 ток, измеряется гальванометром G . Текущий в контуре 1 ток I_1 создает магнитное поле \vec{B} , которое порождает магнитный поток Φ , пронизывающий контур 2 . Если увеличивать ток I_1 , магнитный поток Φ_1 через контур 2 будет расти. Это приведет к возникновению в контуре 2 индукционного тока I_2' .

Направление тока I_2' во втором контуре будет таково, что создаваемое им магнитное поле будет создавать поток Φ_2' , который будет препятствовать изменению магнитного потока Φ_1 через контур 2 .

Таким образом, поток Φ_2' будет стремиться уменьшить первоначальный магнитный поток Φ_1 через контур 2 . Поэтому вектор \vec{p}_m' магнитного момента второго контура с током I_2' и вектор \vec{p}_m магнитного момента первого контура с током I_1 будут направлены в противоположные стороны (см. рис. 16.1).

Уменьшение тока I_1 в первом контуре обусловит убывание магнитного потока Φ_1 через второй контур, что приведет к появлению во втором контуре индукционного тока I_2'' направленного противоположно току I_2' . Таким образом, магнитное поле, создаваемое

током I_2'' , будет создавать поток Φ_2'' , который будет препятствовать уменьшению первоначального потока Φ_1 через контур 2, т.е. будет стремиться увеличить слабеющий первоначальный магнитный поток Φ_1 через контур 2. Во втором случае вектор \vec{p}_m'' магнитного момента второго контура с током I_2'' и вектор \vec{p}_m магнитного момента первого контура с током I_1 будут параллельны (см. рис. 16.1).

Индукционный ток I_2 можно вызвать также, приближая контур 2 к контуру 1 или удаляя второй контур от первого. В обоих случаях направления возникающего тока противоположны.

Наконец, индукционный ток можно вызвать, не перемещая второй контур поступательно, а поворачивая его так, чтобы изменялся угол между нормалью к контуру и направлением поля.

Контур 1 можно заменить постоянным магнитом. При приближении или удалении магнита во втором контуре будет наблюдаться возникновение индукционного тока. Таким образом, *индукционный ток всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного поля сквозь витки катушки (ток I_2'), либо препятствует его уменьшению (ток I_2'').*

Опыт показывает, что изменяющееся во времени магнитное поле вызывает в неподвижном замкнутом контуре индукционный ток. Возникновение этого тока обусловлено наличием сторонних сил. Очевидно, что это не может быть сила Лоренца, т.к. проводник покоится. Максвелл предположил, что изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля. При этом проводники играют второстепенную роль, т.к. поле существует как в проводнике, так и вне его, однако в проводнике под действием этого электрического поля заряды приходят в движение. Это электрическое поле существенно отличается от электростатического: оно вихревое, а не потенциальное. Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты.

Работа сил вихревого электрического поля при перемещении заряда по замкнутому контуру не равна нулю:

$$\int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varepsilon_i. \quad (16.4)$$

В этом случае закон электромагнитной индукции (16.3) имеет вид:

$$\int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (16.5)$$

Правую часть в равенстве (16.5) преобразуем с учетом выражения (16.2) для магнитного потока:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}, \quad (16.6)$$

причем производная по времени внесена под знак интеграла на том основании, что площадь интегрирования не зависит от времени (неподвижный контур).

С учетом (16.1), (16.4) и (16.6) получаем, что циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру l , равна со знаком минус производной по времени от магнитного потока через поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}. \quad (16.7)$$

Уравнение (16.7) входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля и выражает тот факт, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

В данном эксперименте по катушке возбуждения пропускается переменный электрический ток, поэтому внутри катушки возникает переменное магнитное поле, частоту и напряженность которого можно изменять. Если внутри длинной катушки, служащей источником переменного магнитного поля (катушки возбуждения), поместить короткую индукционную катушку, то в индукционной катушке будет возникать ЭДС

индукции, которая будет зависеть от частоты и напряженности магнитного поля, а также от параметров индукционной катушки (диаметра и числа витков).

Поток линий индукции однородного магнитного поля (в центре катушки возбуждения) через поверхность S , перпендикулярную линиям индукции, равен:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}, \quad (16.8)$$

где S – площадь поперечного сечения индукционной катушки, B – индукция магнитного поля внутри катушки возбуждения.

Согласно закону электромагнитной индукции (16.3), в индукционной катушке с количеством витков N , возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}. \quad (16.9)$$

Если сила тока внутри катушки возбуждения меняется со временем, то индукция магнитного поля длинного соленоида равна:

$$B(t) = \mu_0 \cdot \frac{N_c}{l} \cdot I(t) = \mu_0 \cdot n \cdot I(t), \quad (16.10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; N_c – число витков соленоида; n – плотность намотки, т.е. число витков на единицу длины ($n = 485$ витков/м); l – длина соленоида; $I(t)$ – сила тока в соленоиде, зависящая от времени.

При изменении тока в катушке возбуждения по гармоническому закону

$$I(t) = I_0 \cdot \sin \omega t, \quad (16.11)$$

в индукционной катушке, согласно (16.9), (16.10) и (16.11), возникнет ЭДС индукции, также меняющаяся по гармоническому закону:

$$\varepsilon_i = \mu_0 \cdot n \cdot \omega \cdot N \cdot I_0 \cdot S \cdot \cos \omega t = \varepsilon_{i0} \cdot \cos \omega t, \quad (16.12)$$

где N – количество витков индукционной катушки; S – площадь сечения индукционной катушки; ω – циклическая частота ($\omega = 2\pi\nu$, где ν – частота поля в генерирующей катушке)

Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 16.2.

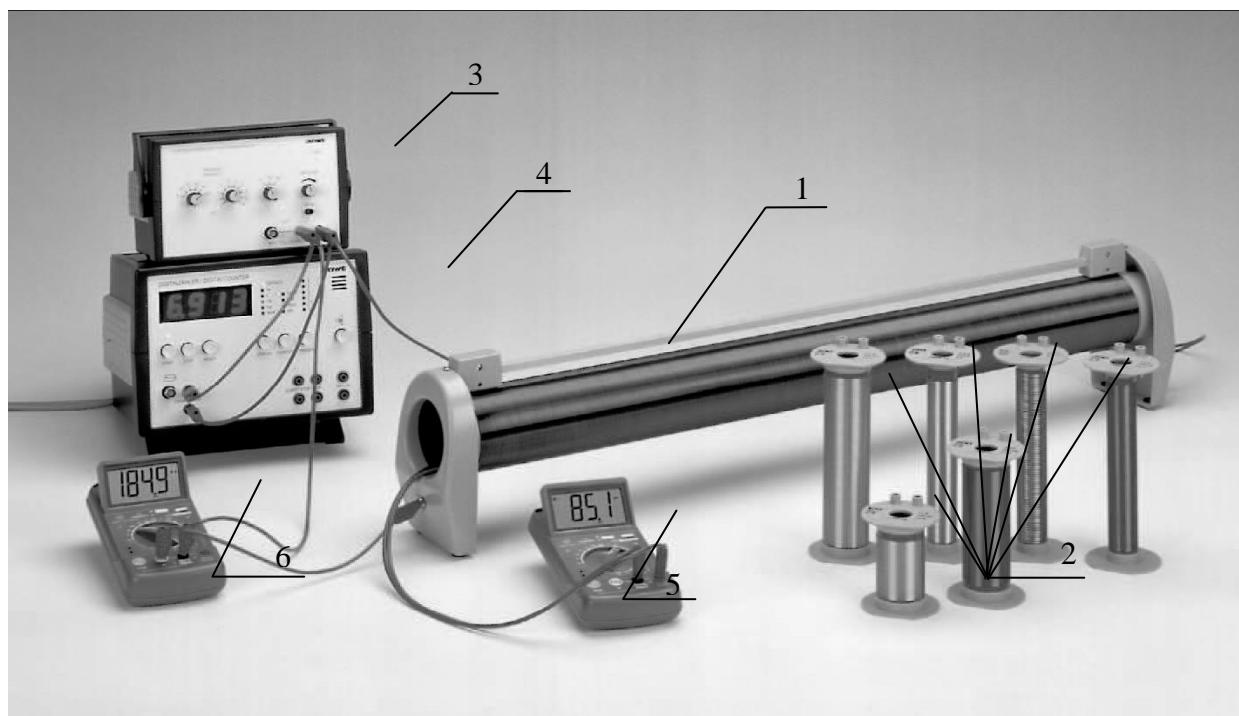


Рис. 16.2. Установка для определения магнитной индукции.

В состав установки входят: 1 – длинная катушка, служащая источником магнитного поля – катушка возбуждения; 2 – короткие индукционные катушки; 3 – источник питания 0...12В; 4 – усилитель сигнала; 5,6 – мультиметры (амперметр и вольтметр).

Внутри катушки возбуждения, располагают короткую индукционную катушку. По катушке возбуждения пропускают переменный электрический ток, вследствие чего внутри катушки возбуждения возникает переменное магнитное поле, частоту и напряженность которого можно изменять. ЭДС индукции, которая возникает в индукционной катушке, зависит от частоты и напряженности магнитного поля, а также от параметров индукционной катушки (диаметра и числа витков).

Перед началом измерений необходимо заполнить табл. 16.1.

Технические данные приборов

Катушка	Количество витков на единицу длины, витков/м	Диаметр катушки, мм
Катушка индуктивности	300	40
Катушка индуктивности	300	32
Катушка индуктивности	300	25
Катушка индуктивности	200	40
Катушка индуктивности	100	40
Катушка индуктивности	150	25
Катушка возбуждения	485 витков/м 485, длина катушки 750 мм	

Порядок выполнения работы

Лабораторную работу необходимо выполнять, строго соблюдая правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Исследование зависимости ЭДС индукции от напряженности переменного магнитного поля.

1. Подключите выданную лаборантом короткую индукционную катушку, по указанной схеме.
2. Поместите индукционную катушку внутрь катушки возбуждения на расстоянии 25 см от края катушки, предварительно записав ее параметры (см. табл. 16.1). Далее поочередно, для каждой индукционной катушки в зависимости от индивидуального задания, снимите зависимость ЭДС индукции от напряженности переменного магнитного поля.
3. Включите длинную индукционную катушку в сеть, которая служит источников внешнего магнитного поля на то напряжение, которое указано в индивидуальном задании.
4. После установления показаний на мультиметре, занесите в таблицу 16.2

Таблица 16.2

h, см	Параметры катушки	$\varepsilon, \cdot 10^{-4}$ В
1		
2		
...		

Обработка результатов эксперимента

1. При изменении тока в катушке возбуждения по гармоническому закону (16.11) в индукционной катушке, согласно (16.9) и (16.10), возникнет ЭДС индукции, также изменяющаяся по гармоническому закону (см. формулу (16.12)):

$$\varepsilon_i = \mu_0 \cdot n \cdot \omega \cdot N \cdot I_0 \cdot S \cdot \cos \omega t = \varepsilon_{i0} \cdot \cos \omega t .$$

На миллиметровке постройте графики зависимости ЭДС индукции ε_i в индукционных катушках от силы тока в катушке возбуждения при фиксированной частоте $\nu = 800$ Гц для катушек:

- а) с одинаковым диаметром, но с различным количеством витков;
- б) для индукционных катушек с одинаковым числом витков, но с разным диаметром.

2. Рассчитайте тангенс угла наклона прямых, построенных на основе данных, полученных в результате измерения отношения ЭДС индукции катушек к силе тока в катушке возбуждения. По тангенсу угла наклона графика определите значение магнитной постоянной μ_0 .

3. По тангенсу угла наклона графика определите значение магнитной постоянной μ_0 для катушек с одинаковым числом витков, но имеющих различное поперечное сечение S (например, для катушки, имеющей 300 витков):

а) при площади поперечного сечения $S = 1320 \text{ мм}^2 = 0,00132 \text{ м}^2$ и наклоне графика, соответствующего $\text{tg}\alpha = 4,142$, значение $\mu_0 = 1,29 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{м}}$.

б) при площади поперечного сечения $S = 531 \text{ мм}^2 = 0,000531 \text{ м}^2$ и наклоне графика, соответствующего $\text{tg}\alpha = 1,704$, значение $\mu_0 = 1,32 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{м}}$.

4. Проведите статистическую обработку полученных результатов и сделайте выводы.

Библиографический список

а) основной:

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. В 5 кн. М.: АСТ: Астрель, 2006. Кн.2. – 464 с.
2. *Батурин Б.Н.* Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ: Учеб. пособие. М.: МИСиС, 1995. – 38с.
3. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика: Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. М.: МИСиС, 2007. – 108 с.

б) дополнительный:

4. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. М.: Физматлит. 2004. Т. 3. – 687 с.
5. *Калашиников С.Г.* Электричество. М.: М.: Физматлит. 2006. – 655 с.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитный поток?
2. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
3. Как формулируется основной закон электромагнитной индукции?
4. Как определить направление индукционного тока в контуре?
5. Каковы условия возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре?