

Дата **23.03.2023** г. Группа ХКМ 1/1. Курс 1. Семестр 2

**Дисциплина:** Физика

**Специальность:** 15.02.06 «Монтаж и техническая эксплуатация холодильно-компрессорных машин и установок (по отраслям)»

**Тема занятия:** Явление электромагнитной индукции

**Цель занятия:**

-*методическая* - совершенствование методики проведения лекционного занятия;

- *учебная* – сформировать представление об электромагнитной индукции;

- *воспитательная* – формирование стремления к овладению знаний, активности, самостоятельности суждения.

**Вид занятия:** Лекция

**Интеграционные связи:** тема взаимосвязана с предыдущими темами дисциплины «Физика»

**Список литературы по теме:**

1.Мякишев Г.Я. Физика: учеб. для 10 кл. общеобразоват. организаций: базовый и углубл. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 9 изд.,стер. – М.: Просвещение, 2022. – 432 с.: ил. – (Классический курс)

2.Мякишев Г.Я. Физика: учеб. для 11 кл. общеобразоват. организаций: базовый и углубл. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М.Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 10 изд.,стер. – М.: Просвещение, 2022. – 432 с.: ил. – (Классический курс)

3.Рымкевич А.П. Задачник: сборник для учащихся общеобразовательных учреждений. – М., «Дрофа» 2008.

<https://yandex.ru/video/preview/9604226000127823360>

**Тема: Явление электромагнитной индукции**

1. Магнитный поток
2. Явление электромагнитной индукции
3. Правило Ленца
4. Самоиндукция. Индуктивность

## 1. Магнитный поток

*После опытов Эрстеда и Ампера стало понятно, что электрические и магнитные поля имеют одни и те же источники: движущиеся электрические заряды. Это позволило предположить, что они каким-то образом связаны друг с другом. Фарадей был абсолютно уверен в единстве электрических и магнитных явлений. Вскоре после открытия Эрстеда в своём дневнике в декабре 1821 г. Фарадей записал: «Превратить магнетизм в электричество».*

На решение этой фундаментальной задачи ему понадобилось десять лет. После многочисленных экспериментов Фарадей сделал эпохальное открытие — замыкая и размыкая электрическую цепь одной катушки, он в замкнутой цепи другой катушки получил электрический ток. Наблюдаемое явление Фарадей назвал **электромагнитной индукцией**.

Индукция магнитного поля характеризует магнитное поле в конкретной точке пространства. Чтобы охарактеризовать магнитное поле во всех точках поверхности, ограниченной замкнутым контуром, ввели физическую величину, которую назвали **магнитным потоком** (потоком индукции магнитного поля).

**Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле,** — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля (рис.1):

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1)$$

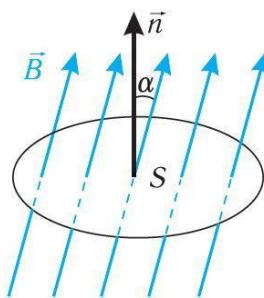


Рисунок 1 - Магнитный поток через плоскую поверхность

Единицей магнитного потока в СИ является **вебер (Вб)**. 1 Вб — магнитный поток однородного магнитного поля индукцией 1 Тл через плоскую поверхность, расположенную перпендикулярно индукции магнитного поля, площадь которой  $1 \text{ м}^2$ .

Формула (1) позволяет сделать вывод, что магнитный поток зависит от взаимной ориентации линий индукции магнитного поля и нормали к плоской поверхности. Магнитный поток максимальен, если  $\alpha = 0$ , т. е. если поверхность перпендикулярна линиям индукции магнитного поля:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Если плоская поверхность параллельна линиям индукции ( $\alpha = 90^\circ$ ), то магнитный поток через неё равен нулю.

На практике часто встречаются ситуации, когда линии индукции магнитного поля пересекают поверхности, ограниченные не одним контуром, а несколькими. Так, например, линии индукции могут пересекать поверхности, ограниченные витками соленоида, которые **«параллельны друг другу и имеют одинаковую площадь поверхности»**. В этом случае магнитный поток определяют по формуле

$$\Phi = NBS,$$

где  $N$  — число витков соленоида;  $S$  — площадь поверхности, ограниченной каждым витком.

Изменить магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, можно, изменяя:

- 1) индукцию магнитного поля, в котором находится контур;
- 2) размеры этого контура;
- 3) ориентацию контура в магнитном поле.

## 2. Явление электромагнитной индукции

В 1831 г. Фарадей провёл серию опытов, которые позволили установить следующие факты:

1) при движении постоянного магнита относительно катушки, подключённой к гальванометру, в катушке возникал электрический ток (стрелка гальванометра отклонялась). Причём направление тока изменялось на противоположное при изменении направления движения магнита. Это же явление происходило, если магнит был неподвижен, а двигали катушку (рис.2);

2) в катушке, подключённой к гальванометру, возникал электрический ток, если относительно неё двигали другую катушку, которая была подключена к источнику постоянного тока (рис.3);

3) если две катушки намотаны на общий каркас и одну подключали к гальванометру, а другую — к источнику тока, то ток в первой катушке возникал при изменении тока во второй (рис.4).

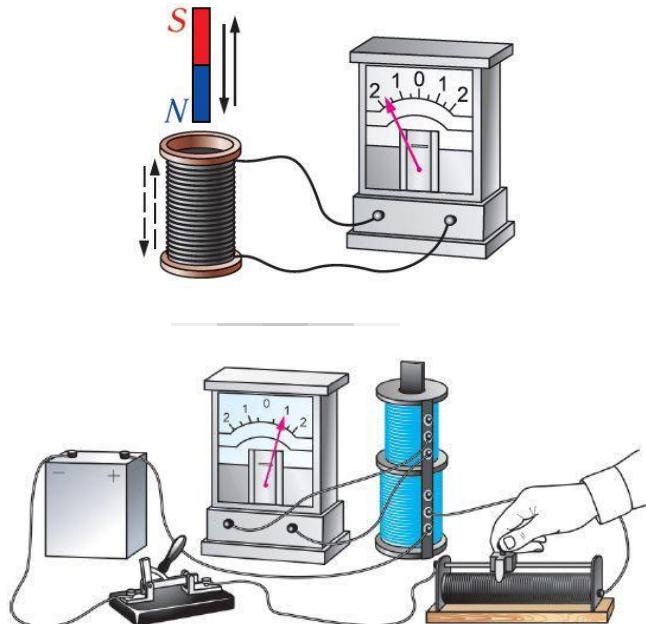


Рисунок 3

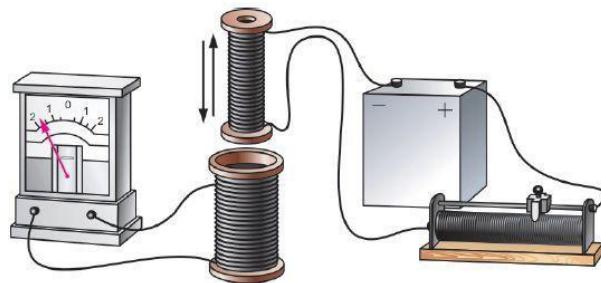


Рисунок 4

Во всех рассмотренных случаях электрический ток в цепи гальванометра возникал только при изменении магнитного потока через поверхности, ограниченные витками катушки, подключённой к гальванометру (рис.5). Причём значение силы тока, возникающего в контуре, не зависело от способа изменения магнитного потока, а определялось только скоростью его изменения. Назвали такой ток индукционным током.

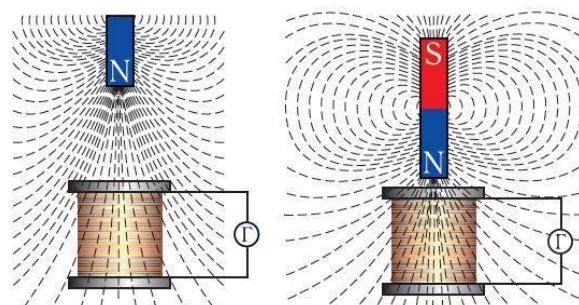


Рисунок 5

**Индукционный ток** — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Для существования тока в замкнутой электрической цепи необходимо, чтобы на свободные заряженные частицы действовали сторонние силы, т. е. в цепи должен быть источник ЭДС. Очевидно, что в опытах Фарадея источником этих сторонних сил являлся изменяющийся магнитный поток, который создавал в цепи ЭДС. Эту ЭДС назвали *электродвижущей силой индукции* или *ЭДС индукции*. Если цепь замкнута, ЭДС индукции создаёт индукционный ток, т. е. возникновение индукционного тока является вторичным эффектом.

**Электромагнитная индукция** — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоятся в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется.



### «Превратить магнетизм в электричество»

Возникновение электрического тока при относительном движении катушки и магнита (другой катушки)

Возникновение электрического тока в одной катушке при изменении тока в другой катушке

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля:

$$\Phi = BS \cos\alpha$$

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоятся в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется

### 3. Правило Ленца

Открыв явление электромагнитной индукции, Фарадей практически за полтора месяца установил все его существенные закономерности. Ему стала понятна сущность явления, которое сыграло такую важную роль для человечества: во всех экспериментах, проведённых им, индукционный ток в проводящем контуре возникал в результате изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Фарадей не только открыл явление электромагнитной индукции, но и первым продемонстрировал, «что можно создать постоянный ток электричества при помощи обыкновенных магнитов», сконструировав устройство, позволяющее преобразовывать механическую энергию в электрическую.

#### Направление индукционного тока

Опыты Фарадея показали, что направление индукционного тока, вызванного возрастанием магнитного потока, противоположно направлению индукционного тока, вызванного его уменьшением. Исследовав явление электромагнитной индукции, петербургский академик Эмилий Христианович Ленц (1804–1865) в 1833 г. сформулировал **правило для определения направления индукционного тока (правило Ленца)**: возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток. Это означает, что при возрастании магнитного потока магнитное поле индукционного тока направлено против внешнего поля, а при убывании — магнитное поле индукционного тока направлено так же, как и внешнее поле.

*В более сжатой форме правило Ленца можно сформулировать следующим образом: индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызвавшей этот ток.*

Правило Ленца можно проиллюстрировать, используя два алюминиевых кольца (одно из них с разрезом), закреплённых на стержне, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси (рис.6).



Рисунок 6 – Иллюстрация правила Ленца

Из опыта следует, что при приближении постоянного магнита к сплошному кольцу оно отталкивается от магнита; при удалении магнита — кольцо притягивается к нему. Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняют возникновением в нём индукционного тока при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную кольцом. Очевидно, что при приближении магнита к кольцу направление индукционного тока таково, что индукция магнитного поля тока противоположна индукции магнитного поля постоянного магнита (рис.7). При удалении магнита индукции магнитных полей тока и магнита совпадают по направлению. При движении магнита относительно кольца с разрезом взаимодействие не наблюдается, так как индукционный ток отсутствует.

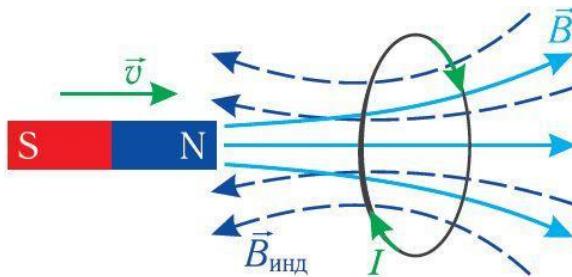


Рисунок 7 - Отталкивание и притяжение сплошного кольца

**Чтобы определить направление индукционного тока по правилу Ленца, необходимо выполнить следующие операции (рис.8):**

- 1) определить направление линий индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ ;
- 2) выяснить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через поверхность, ограниченную проводящим контуром;
- 3) определить направление линий индукции магнитного поля индукционного тока  $\vec{B}_{\text{инд}}$ : если приращение магнитного потока  $\Delta\Phi < 0$ , то направления индукций внешнего магнитного поля  $\vec{B}$  и магнитного поля индукционного тока  $\vec{B}_{\text{инд}}$  совпадают, если  $\Delta\Phi > 0$ , то — противоположны;
- 4) зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока  $\vec{B}_{\text{инд}}$ , по правилу буравчика (правилу часовой стрелки) определить направление индукционного тока.

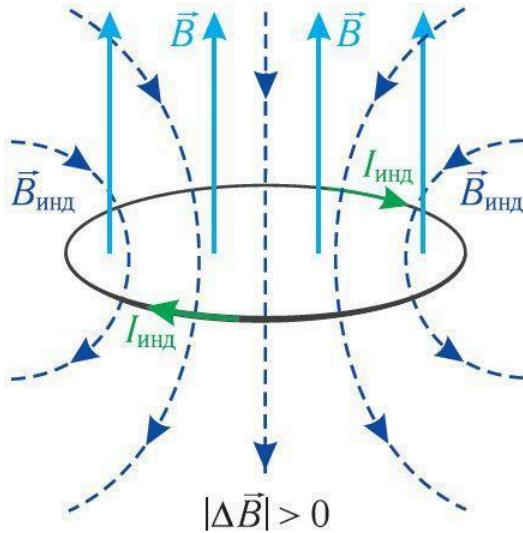


Рисунок 8 – Определение направления индукционного тока по правилу Ленца

Правило Ленца соответствует закону сохранения энергии применительно к явлению электромагнитной индукции. В самом деле, если бы индукционный ток имел другое направление, он мог бы существовать без затрат энергии, что противоречит закону сохранения энергии.

Открытие явления электромагнитной индукции имело большое значение. Была доказана взаимосвязь магнитных и электрических явлений, что послужило в дальнейшем отправным пунктом для разработки теории электромагнитного поля.

### Закон электромагнитной индукции.

Анализируя результаты опытов Фарадея, Максвелл в 1873 г. пришёл к выводу, что ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, т. е.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (2)$$

Чтобы обеспечить строгое равенство в выражении (2), необходимо учесть направление индукционного тока. Согласно правилу Ленца при увеличении магнитного потока  $\left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} > 0\right)$  ЭДС индукции отрицательная ( $\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$ ) и, наоборот, при уменьшении магнитного потока  $\left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} < 0\right)$  ЭДС индукции положительная ( $\mathcal{E}_{\text{инд}} > 0$ ).

Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{Инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (3)$$

Таким образом, ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.

Выражение (3) называют **законом электромагнитной индукции Фарадея**, подчёркивая этим заслуги учёного в изучении указанного явления. Следует отметить, что данный закон является универсальным, т. е. ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока.

Зная ЭДС индукции, можно определить силу индукционного тока. Согласно закону Ома для полной цепи:

$$I_{\text{Инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{Инд}}}{R},$$

где  $R$  — сопротивление проводника, из которого изготовлен замкнутый проводящий контур.



Возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток (правило Ленца)

ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком (закон электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_{\text{Инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

#### 4. Самоиндукция. Индуктивность

Явление электромагнитной индукции очень часто наблюдается в электротехнике. Взаимное влияние электрических и магнитных полей иногда приводит к интересным результатам. **Самоиндукция** — частный случай электромагнитной индукции.

Общеизвестно, что причиной порождения электрического тока является переменное магнитное поле. Именно этот принцип реализован в конструкциях современных генераторов. Природа самоиндукции также связана с электромагнетизмом, но это явление проявляется по-другому.

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что в замкнутом контуре при изменении магнитного потока в нем возникает электрический ток, который называют **индукционным**.

**Закон электромагнитной индукции** гласит: среднее значение ЭДС индукции в проводящем контуре пропорционально скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Электромагнитная индукция проявляется во всех случаях изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Современник Фарадея американский физик Джозеф Генри независимо от своего английского коллеги открыл некоторые из электромагнитных эффектов. В 1829 году Генри обнаружил, что **ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствии изменения внешнего магнитного поля**. Оказалось, что **изменяющийся электрический ток, проходящий в контуре, создает изменяющийся магнитный поток**. Это явление было названо явлением **самоиндукции**.

**Самоиндукция является важным частным случаем явления электромагнитной индукции.** Если электрический ток в замкнутом проводящем контуре по каким-либо причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока (т.е. индукция магнитного поля пропорциональна силе тока в контуре). Но при изменении индукции магнитного поля, создаваемого током, проходящим в контуре, изменяется и магнитный поток (т.е. магнитный поток будет пропорционален индукции магнитного поля). Следовательно, **магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, пропорционален силе тока в контуре**.

Коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и силой тока Томсон в 1853 году предложил назвать «коэффициентом самоиндукции».

Коэффициент самоиндукции, который часто называют просто **индуктивностью контура, обозначают  $L$** .

Индуктивность в СИ измеряют в **Гн (генри)**.  $[L] = [\text{Гн}]$

Эта единица определяется на основании формулы

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе постоянного тока в контуре 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, равен 1 Вб.

$$L = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}$$

Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств среды, в которой этот контур находится.



Согласно закону электромагнитной индукции изменяющийся магнитный поток создает в контуре ЭДС. Возникновение ЭДС индукции в контуре, которое вызвано изменением магнитного поля тока, проходящего в этом же контуре, называют **явлением самоиндукции**, а появляющуюся ЭДС — электродвижущей силой самоиндукции или **ЭДС самоиндукции**.

Обозначается ЭДС самоиндукции греческой буквой  $\xi_{Si}$ . Измеряется ЭДС самоиндукции в В (вольт).

$$[\xi_{Si}] = [\text{В}]$$

По закону электромагнитной индукции среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре прямо пропорциональна индуктивности контура и скорости изменения силы тока в контуре (при учете, что индуктивность контура остается постоянной).

$$\xi_{Si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Из этой формулы следует, что **индуктивность** — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с.

Используя это выражение, можно дать **второе определение единицы индуктивности**: элемент электрической цепи обладает индуктивностью в 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока в цепи на 1 А за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 В.

## **Контрольные вопросы**

1. Что называют магнитным потоком? Что является единицей магнитного потока в СИ?
2. Какими способами можно изменить магнитный поток через поверхность?
3. При каких условиях в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток?
4. В чём заключается явление электромагнитной индукции?
5. Как формулируют правило Ленца?

## **Задание для самостоятельной работы:**

1. Краткий конспект лекции (определения и формулы)
2. Письменно ответить на контрольные вопросы.
4. Фотографию работы прислать в личном сообщении ВК  
<https://vk.com/id139705283>

На фотографии вверху должна быть фамилия, дата выдачи задания, группа, дисциплина. Например: «Иванов И.И., 23.03.2023 г., группа ХКМ 1/1, Физика».