

# Тема 19

**Электромагнитная индукция. Закон индукции Фарадея и правило Ленца. Самоиндукция и взаимоиנדукция. Энергия и плотность энергии магнитного поля**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

19.1. Электромагнитная индукция. Закон индукции  
Фарадея и правило Ленца.

19.2. Самоиндукция и взаимоиנדукция

19.3. Энергия и плотность энергии магнитного поля

## 19.1. Электромагнитная индукция

Изменяющееся магнитное поле вызывает появление ЭДС индукции  $E_{\text{инд}}$ . Это явление Фарадей назвал электромагнитной индукцией. Под влиянием ЭДС индукции в замкнутом проводнике возникает электрический ток.

### Опыт 19.1. Явление электромагнитной индукции

#### Оборудование:

1. Гальванометр от демонстрационного вольтметра.
2. Амперметр демонстрационный.
3. Магнит дугообразный.
4. Магнит прямой.
5. Трансформатор универсальный.
6. Реостат на 50 Ом.
7. Выключатель демонстрационный.
8. Штатив универсальный.
9. Батарея аккумуляторов.
10. Провода соединительные.
11. Ящик - подставка.

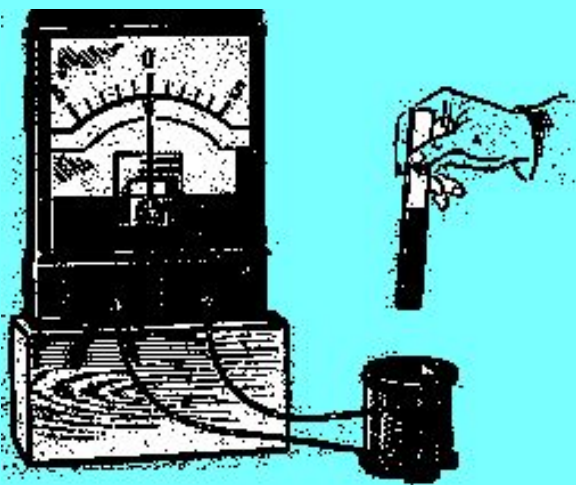


Рис.19.1.

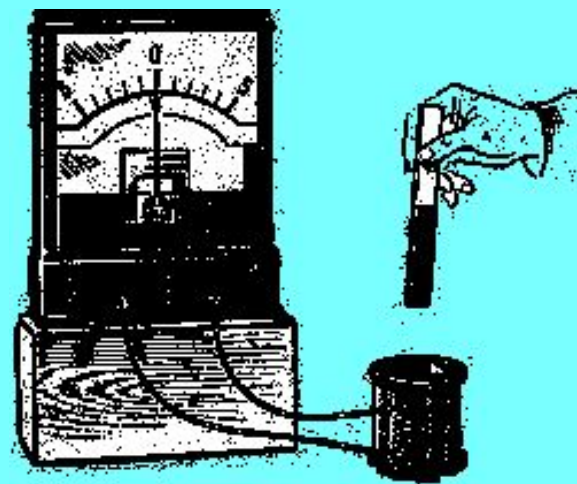


Рис.19.2.

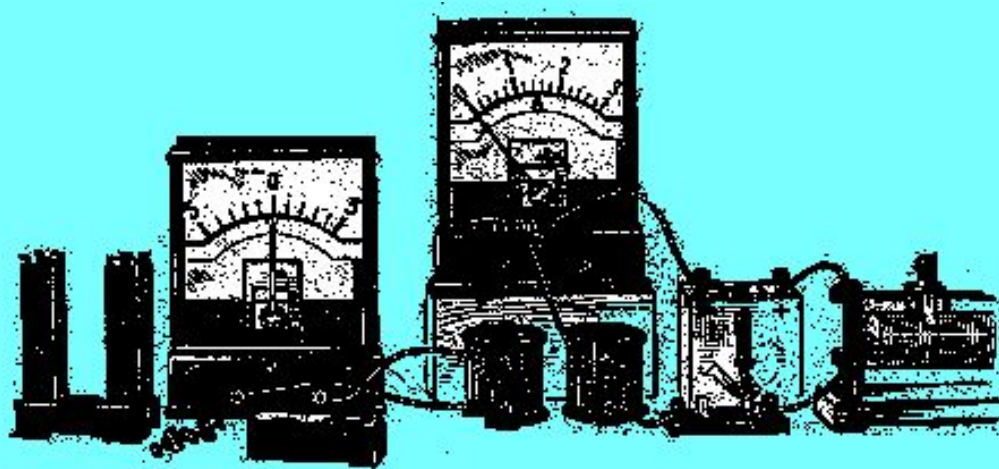


Рис.19.3.

## Ход работы:

1. Возьмем соленоид, соединенный с гальванометром, и будем вдвигать в него постоянный магнит. Оказывается, что при движении магнита стрелка гальванометра отклоняется. Если же магнит останавливается, то стрелка гальванометра возвращается в нулевое положение. То же самое получается при выдвигании магнита из соленоида или при надевании соленоида на неподвижный магнит. Такие опыты показывают, что индукционный ток возникает в соленоиде только при относительном перемещении соленоида и магнита.

2. Будем опускать в соленоид катушку с током. Оказывается, что и в этом случае в соленоиде возникает индукционный ток только при относительном перемещении соленоида и катушки.

3. Вставим катушку в соленоид и закрепим их неподвижно. При этом тока в соленоиде нет. Но в моменты замыкания или размыкания цепи катушки  $A$  в соленоиде появляется индукционный ток. То же самое получается в моменты усиления или ослабления тока в катушке с помощью изменения сопротивления  $R$ .

В дальнейшем цепь катушки, соединенную с источником электрической энергии, будем называть *первичной*, а цепь соленоида, в которой возникает индукционный ток, – *вторичной*. Эти же названия будем применять и к самим катушкам.

4. Включим первичную катушку в сеть переменного тока, а вторичную катушку соединим с лампой накаливания. Оказывается, лампа непрерывно горит, пока в первичной катушке течет переменный ток. Нетрудно заметить, что общим для всех описанных опытов является изменение магнитного поля в соленоиде, которое и создает в нем индукционный ток.

5. Выясним теперь, всякое ли изменение магнитного поля вокруг замкнутого контура наводит в нем индукционный ток. Возьмем плоский контур в виде рамки, соединенной с гальванометром. Поместим рядом с рамкой магнит так, чтобы его линии индукции не проходили внутри рамки, а находились в ее плоскости. Оказывается, что при перемещении рамки или магнита вдоль плоскости рисунка стрелка гальванометра не отклоняется. Если же рамку поворачивать вокруг оси, то в ней возникает индукционный ток.

*Вывод:* индукционный ток (и э. д. с. индукции) в замкнутом контуре появляется только в том случае, когда изменяется магнитный поток, который проводит через площадь, охваченную контуром.

ЭДС электромагнитной индукции в контуре пропорциональна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.

$$E_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (19.1)$$

Где  $\Phi = eS \cos \varphi$  - магнитный поток (19.2)

В свою очередь, магнитный поток имеет две компоненты: потокосцепление  $\Psi$  и поток рассеяния  $\Phi_{\text{рас}}$ , т. е.

$$\Phi = \Psi + \Phi_{\text{рас}} \quad (19.3)$$

$\Psi$  - потокосцепление,  
 $\Phi_{\text{рас}}$  – поток рассеивания.

Потокосцепление  $\Psi$  - это часть магнитного потока, пронизывающего объем проводника. Поток рассеяния  $\Phi_{\text{рас}}$  – это часть магнитного потока, не связанного с проводником, а пронизывающего окружающее пространство.

Направление индукционного тока можно определить по правилу Ленца, которое гласит, что индукционный ток всегда препятствует причине, его порождающей.

## Опыт 19.2. Правило Ленца

### Оборудование:

1. Прибор для демонстрации правила Ленца.
2. Магнит прямой.

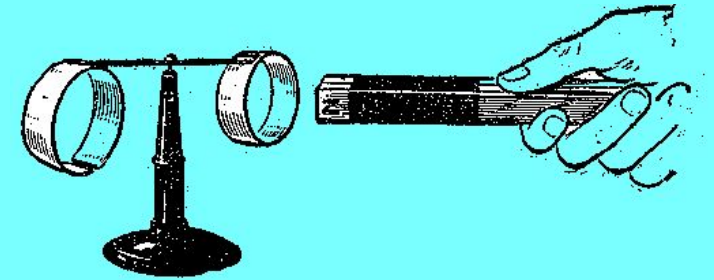


Рис.19.4.

### Ход работы:

1. Будем вдвигать магнит в сплошное кольцо коромысла. Кольцо отталкивается от магнита, что приводит к вращению коромысла.
2. Введем магнит внутрь сплошного кольца и будем магнит выводить. Кольцо будет притягиваться к магниту, что приведет к вращению коромысла.
3. Будем вводить (или выводить) магнит внутрь разрезанного кольца. Коромысло остается в покое.

**Вывод:** Магнитное поле индукционного тока всегда противодействует изменению внешнего магнитного потока. В случае с разрезанным кольцом индукционный ток отсутствовал. Следовательно, отсутствовало и взаимодействие кольца с магнитом.



Поясним правило Ленца на следующей модели.

Пусть имеется два контура, по одному из которых течет ток  $i_1$ .

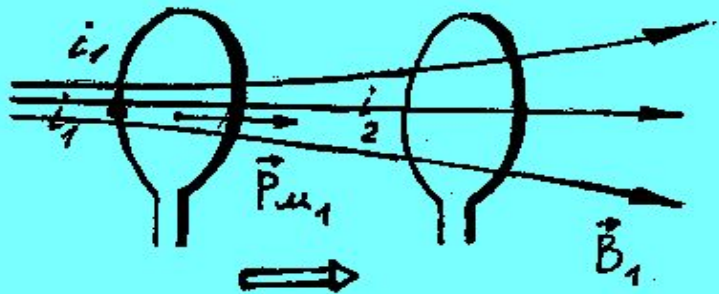


Рис.19.5.

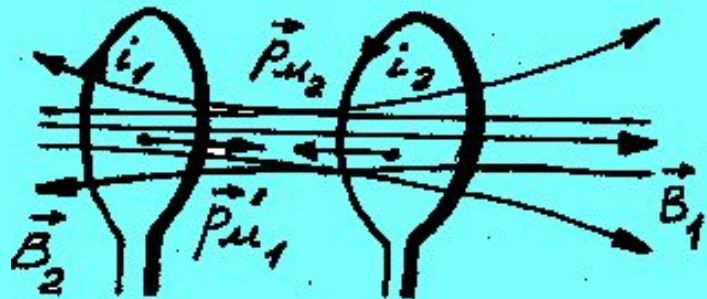


Рис.19.6.а.

При приближении первого контура ко второму, индукция поля в области второго контура увеличивается, поэтому магнитного поля  $B_2$ , связанного с индукционным током  $i_2$ , должно быть таково, чтобы препятствовать этому увеличению, т. е.  $B_2 \uparrow \downarrow B_1$ , отсюда определим направление  $i_2$  (рис. 19.6,а,б).

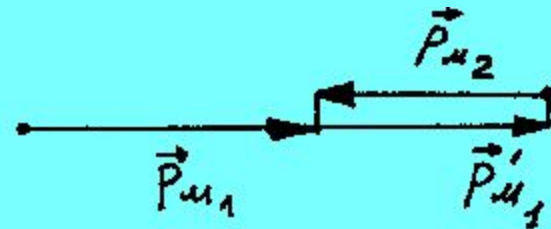


Рис.19.6.б.

В электромагнетизме для характеристики свойств проводника возбуждать вокруг себя то или иное магнитное поле вводится понятие индуктивности проводника (в некотором смысле это аналогично введению понятия емкости в электростатике).

$$\Psi = Li \Rightarrow L = \frac{\Psi}{i} \quad \text{– индуктивность проводника.} \quad (19.4)$$

Индуктивностью называется физическая величина, которая численно равна потоку сцепления при силе тока в проводнике в 1 Ампер.

$$\begin{aligned} [L] &= \frac{[\Psi]}{[i]} = \frac{Вб}{А} = \frac{В \cdot S}{I} = \frac{Tл \cdot м^2}{А} = \\ &= \frac{Н \cdot м \cdot м^2}{А \cdot м^2 \cdot А} = \frac{Дж}{А^2} = \frac{А \cdot В}{А^2} = \frac{А \cdot В}{А / с} \end{aligned}$$

Итак,  $1Гн = \frac{1В}{1А / с}$

Вычислим индуктивность соленоида. Возьмем соленоид такой длины, чтобы его можно было практически считать бесконечным. При протекании по нему тока  $I$  внутри соленоида возбуждается однородное поле, индукция которого равна

$$B = \mu_0 \mu n I$$

Поток через каждый из витков равен  $\Phi = BS$ , а полный магнитный поток, сцепленный с соленоидом

$$\Psi = N\Phi = n l B S = \mu_0 \mu n^2 I S l,$$

где  $l$  – длина соленоида (которая предполагается очень большой),  $S$  – площадь поперечного сечения,  $n$  – число витков на единицу длины (произведение  $n l$  дает полное число витков  $N$ ).

Итак, для индуктивности очень длинного соленоида имеем

$$L = \mu_0 \mu n^2 I S l = \mu_0 \mu n^2 V \quad (19.5)$$

где  $V = I S l$  – объем соленоида.

## 19.2. Самоиндукция и взаимоиндукция

Рассмотрим явление самоиндукции. Так как поток рассеяния не влияет на изменение магнитного поля в самом проводнике, то можно эту величину не учитывать.

$$\varepsilon_S = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -\frac{\partial L}{\partial t}i - \frac{\partial i}{\partial t}L$$

Рассмотрим первое полученное слагаемое. Если в проводнике  $i = \text{const}$ , то меняется индуктивность. Для второго слагаемого  $L = \text{const}$ , а меняется сила тока в проводнике.

Самоиндукция — изменение тока в самом проводнике под действием собственного магнитного поля.

$$E = -L \frac{di}{dt} \quad ) \quad (19.6)$$

Явление взаимоиндукции состоит в возникновении ЭДС в одной цепи под действием изменения тока в другой.

Возьмем два контура 1 и 2, расположенные близко друг к другу (рис.19.8). Если в контуре 1 течет ток силы  $I_1$ , он создает через контур 2 пропорциональный  $I_1$  полный магнитный поток

$$\Psi_2 = L_{21}I_1 \quad (19.7)$$

(поле, создающее этот поток, изображено на рисунке сплошными линиями). При изменениях тока  $I_1$  в контуре 2 индуцируется ЭДС

$$E_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (19.8)$$

(мы предполагаем, что ферромагнетиков вблизи контуров нет).

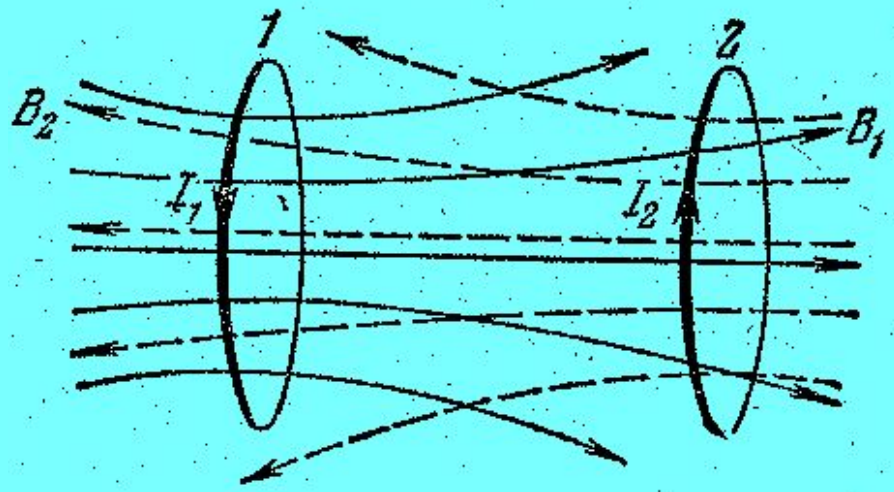


Рис.19.7.

Аналогично, при протекании в контуре 2 тока силы  $I_2$  возникает сцепленный с контуром 1 поток

$$\Psi_2 = L_{12}I_2 \quad (19.9)$$

(поле, создающее этот ток, изображено пунктирными линиями).

При изменениях тока  $I_2$  в контуре 1 индуцируется ЭДС

$$E_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (19.10)$$

Контуры 1 и 2 называются *связанными*, а явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменениях силы тока в другом называется *взаимной индукцией*.

Коэффициенты пропорциональности  $L_{12}$  и  $L_{21}$  называются *взаимной индуктивностью* контуров. Соответствующий расчет дает, что в отсутствие ферромагнетиков эти коэффициенты всегда равны друг другу:

$$L_{12} = L_{21} \quad (19.11)$$

Их величина зависит от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также магнитной проницаемости окружающей контуры среды. Измеряется  $L_{12}$  в тех же единицах, что и индуктивность  $L$ .

### 19.3. Энергия и плотность энергии магнитного поля

Для вывода формулы энергии магнитного поля рассмотрим соленоид, по виткам которого идет ток. Тогда в объеме соленоида и вокруг него возникает магнитное поле.

При изменении магнитного потока  $d\Phi$ , вызванного изменением силы тока в соленоиде на  $di$ , совершается работа

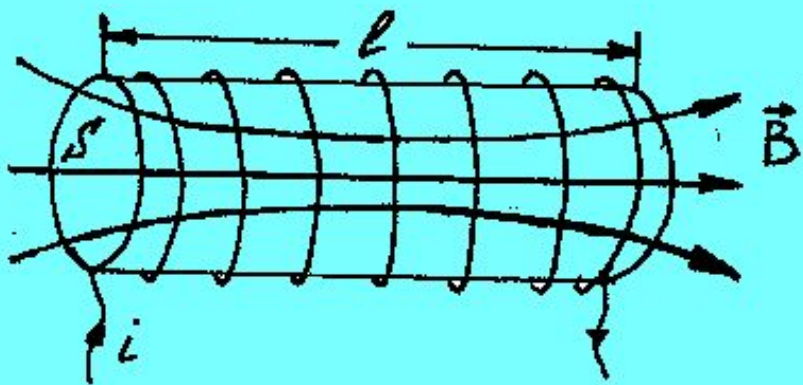


Рис.19.8.

$$dA = i d\Phi \quad (19.12)$$

$$\Phi = Li, \text{ т о}$$

$$dA = L i di$$

Проинтегрировав,

$$A = \int_0^i L i di = L \int_0^i i di = \frac{Li^2}{2} \quad (19.13)$$

По закону сохранения и превращения энергии совершенная работа равна энергии магнитного поля соленоида, т. е.

$$A = W_m = \frac{L i^2}{2} \quad \left( W_{эл} = \frac{C U^2}{2} \right)$$

Используя формулу для индуктивности соленоида для энергии магнитного поля имеем:

$$W_M = \frac{\mu_0 \mu i^2 n^2}{2} I S = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V, \quad (19.14)$$

где  $V = I S$  - объем соленоида.

Тогда плотность энергии магнитного поля:

$$w_M = \frac{W_M}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{(\mu_0 \mu H) H}{2} = \frac{B H}{2}$$

В изотропной среде вектора  $B$  и  $H$  коллинеарны.

Для анизотропной среды плотность энергии магнитного поля:

$$w_M = \frac{B H}{2} \quad (19.15)$$