

Тема 15. Электромагнитная индукция (ЭМИ)

1. Открытие явления ЭМИ

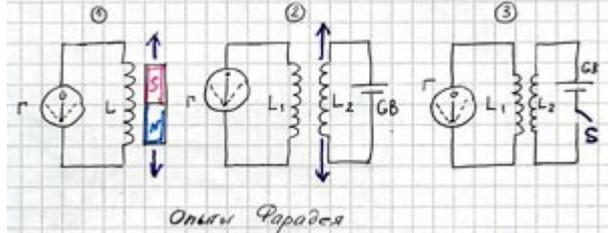
До сих пор речь шла о том, что:

а) ЭП создается неподвижными электрическими зарядами;

б) МП создается упорядоченно движущимися электрическими зарядами - электрическим током;

Возникает вопрос: а нельзя ли создать электрический ток с помощью МП? Именно такую задачу сформулировал для себя в 1821 г. великий английский физик Майкл Фарадей. Десять лет он искал решение этой задачи, проделал тысячи опытов, попутно сделал несколько выдающихся открытий и в 1831 г, наконец-то, получил ответ на свой вопрос.

Суть многочисленных опытов Фарадея сводится к трем основным:



Как видно, во всех опытах использована совершенно одинаковая часть, которая находится слева.

Выражаясь современным языком, это индикатор, который состоит из катушки (обозначена **L** или **L1**) и гальванометра - прибора для обнаружения слабых токов.



Этот прибор имеет нулевую отметку в середине шкалы. При протекании тока стрелка отклоняется вправо или влево от нуля в зависимости от направления тока. Гальванометр с катушкой образуют так называемый **замкнутый контур**, который *не содержит источника тока*.

1-ый опыт. Катушка неподвижна. К ней подносят или удаляют от нее постоянный магнит - стрелка гальванометра отклоняется вправо или влево => в контуре возникает электрический ток. Если магнит неподвижен, то и тока нет. Можно поставить магнит и двигать катушку - в контуре снова возникнет ток.

2-ой опыт. Постоянный магнит заменен катушкой **L2**, соединенной с источником тока => вокруг катушки **L2** создано МП. Если эту катушку подносить или удалять от катушки контура **L1**, то гальванометр показывает возникновение электрического тока. Если катушка **L2** неподвижна, то не показывает наличие тока в контуре. Можно поставить катушку **L2** и двигать катушку **L1** - в контуре снова возникнет ток.

3-й опыт. Обе катушки **L1** и **L2** неподвижны. Теперь во второй цепи замыкают и размыкают выключатель **S** - именно в моменты включения/выключения гальванометр отмечает возникновение тока в контуре.

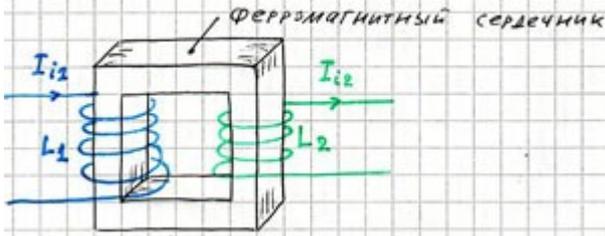
Все вышеописанные опыты демонстрируют один и тот же эффект - явление электромагнитной индукции (ЭМИ).

Суть ЭМИ состоит в том, что в замкнутом проводнике (контуре) возникает **индукционный ток I_i** , если этот проводник движется в постоянном МП или покоится в переменном МП. Значит, самое главное условие для возникновения **I_i** - это изменение МП, в котором находится проводник. При этом совершенно не имеет значения, каким именно способом достигается это изменение. Если же МП не меняется (постоянно), то индукционный ток **I_i** не возникает.

2. Трансформатор

В своих опытах Фарадей использовал, как принято теперь называть, прототип современных трансформаторов.

Трансформатор - это электротехническое устройство, которое состоит из ферромагнитного сердечника и помещенных на нем двух и более проволочных катушек (обмоток).



3-й опыт Фарадея получается более наглядным, если катушки **L1** и **L2** поместить на ферромагнитный стержень - это и будет самый примитивный трансформатор. В своих опытах Фарадей использовал и такой трансформатор, и трансформатор с кольцевым сердечником. Как оказалось, применение кольцевого ферромагнитного сердечника является более эффективным, чем применение простого стержня по той причине, что все МП сосредоточено внутри кольца, а не рассеивается на концах, как у стержня.

Современные трансформаторы могут иметь разную форму, но их сердечник всегда замкнут.

Принцип действия трансформатора (если не вдаваться в технические детали) довольно прост: по первичной обмотке **L1** протекает переменный ток **I1**, который создает в сердечнике переменное МП. Это переменное МП, в свою очередь, создает в обмотке **L1** переменный индукционный ток **I2**.

В зависимости от соотношения количества витков в катушках трансформаторов, различают:

n_1 - к-во витков в L_1

n_2 - к-во витков в L_2

$n_1 > n_2$ - понижающий трансформатор

$n_1 = n_2$ - разделительный — и —

$n_1 < n_2$ - повышающий — и —

Если не учитывать потерь энергии на нагревание проводов катушек и на рассеяние МП в окружающем пространстве, мы получим *идеальный* трансформатор, **к.п.д.** которого = 100% => вся электроэнергия, которая поступает на первичную обмотку **L1** полностью передается во вторичную обмотку **L2**:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow I_1 U_1 = I_2 U_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad \begin{array}{l} \text{ФОРМУЛА} \\ \text{ТРАНС-РА} \end{array}$$

$$k = \frac{U_2}{U_1} \quad - \text{коэф-ент трансформации}$$

$$\left(\text{или } k = \frac{n_2}{n_1} \right)$$

К.п.д. современных трансформаторов составляет более 99%.

3. Направление индукционного тока и закон ЭМИ

Рассмотрим более детально, например, 1-ый опыт Фарадея. При перемещении магнита относительно неподвижной катушки :

первое, что бросается в глаза - стрелка гальванометра отклоняется вправо или влево от нуля в зависимости от того, приближают или удаляют магнит => направление индукционного тока меняется в зависимости от того, возрастает (магнит приближается к катушке) и убывает (магнит отдаляется от катушки) МП;

второе - это то, что угол отклонения стрелки тем больше (значит больше величина индукционного тока), чем быстрее двигают магнит => чем быстрее меняется МП.

Согласно правилу, установленному русским физиком Ленцем:

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что его собственное МП стремится скомпенсировать изменение внешнего МП.

Это значит, что, когда магнит приближают к катушке, индукционный ток в ней направлен так, что его собственное МП направлено против внешнего - ведь внешнее МП возрастает. Когда магнит удаляют от катушки, индукционный ток в ней меняет направление на противоположное так, что его собственное МП направлено так же как и внешнее - ведь внешнее МП ослабевает.

Скорость движения магнита связана со скоростью изменения магнитного потока:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} - \text{скорость изменения магнитного потока}$$

$$I_i \sim \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\left[\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right] - 1 \text{ Вб/с}$$

т.е. величина индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Не следует забывать, что ЭДС - это работа сторонних сил. Действие МП на заряженные частицы - это

именно действие сторонних сил => речь идет об ЭДС индукции \mathcal{E}_i :

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{закон ЭМИ}$$

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока.

4. ЭДС индукции в движущихся проводниках

Если двигать проводник длиной l в МП с индукцией B со скоростью v посредством некоторой внешней силы, то вместе с проводником будут двигаться и свободные носители заряда => их движение происходит под действием внешней силы => совершается работа по перемещению зарядов по всей длине проводника => возникает ЭДС индукции:

\vec{B} - индукция МП
 l - длина проводника
 \vec{v} - скорость движения проводника

$$F_A = q_0 v B \sin \alpha$$

$$A = q_0 v B l \sin \alpha \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = q_0 v B l \sin \alpha,$$

где $q_0 = q_0 N$ - заряд всех частиц

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{q} \Rightarrow \mathcal{E}_i = v B l \sin \alpha \quad \text{ЭДС инд. в движ. проводнике}$$

Если проводник имеет n витков $\Rightarrow \mathcal{E}_i = n \cdot \mathcal{E}_i$
 \mathcal{E}_i - ЭДС инд. с 1-ым витком

Почти вся электроэнергия на планете вырабатывается с помощью генераторов электрического тока, в которых проволочная катушка вращается в МП.

5. Самоиндукция. Индуктивность

Иногда становится заметным странное явление, которое получило название **самоиндукция**. Суть его состоит в следующем. Если по проводнику протекает переменный ток, то он создает вокруг проводника переменное МП, которое создает в этом же проводнике индукционный ток! Получается, что такой

проводник как бы влияет сам на себя. Это и есть **самоиндукция**. Ток самоиндукции I_{is} направлен так, что его собственное МП стремится скомпенсировать изменение внешнего МП, которое этот ток вызывает. Поэтому, когда ток в проводнике возрастает, ток самоиндукции направлен против него, а когда уменьшается - по нему. Как известно, магнитный поток пропорционален магнитной индукции, которая пропорциональна индукционному току:

$$\Phi \sim B \sim I \Rightarrow \Phi \sim I \Rightarrow \Phi = LI, \text{ где}$$

L - индуктивность

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока самоиндукции.

$$\mathcal{E}_{is} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \text{ но } \Delta \Phi = L \cdot \Delta I \Rightarrow \mathcal{E}_{is} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} - \text{ скорость изменения силы тока}$$

$$\left[\frac{\Delta I}{\Delta t} \right] = 1 \text{ A/c}$$

L - индуктивность - коэффициент пропорциональности. Индуктивность зависит от геометрической формы и магнитных свойств проводника. [**L**] - **1 Гн (Генри)**

Чем больше индуктивность проводника, тем больше в нем может возникнуть ЭДС самоиндукции. Индуктивность непосредственно связана с потенциальной энергией МП:

$$E_{пмп} = \frac{LI^2}{2} \quad \begin{array}{l} \text{энергия МП проводника} \\ \text{с током} \end{array}$$

Наибольшей индуктивностью обладают катушки с ферромагнитными сердечниками (дроссели). Чем больше витков имеет катушка, тем больше ее индуктивность.

Контрольные вопросы:

1. Чем создается ЭП и чем создается МП?
2. Что можно измерить и определить с помощью гальванометра?
3. Опишите 1-ый опыт Фарадея.
4. Опишите 2-ой опыт Фарадея.
5. Опишите 3-ий опыт Фарадея.
6. В чем состоит суть явления ЭМИ?
7. Какое устройство называют трансформатором?
8. В чем состоит принцип действия трансформатора?
9. Как тип трансформатора связан с количеством витков его обмоток?
10. Какой трансформатор называют идеальным?
11. Как записывается формула трансформатора?
12. Что такое «коэффициент трансформации»?
13. Как зависит величина индукционного тока от скорости движения магнита в опытах Фарадея?
14. Как зависит направление индукционного тока от направления движения магнита относительно катушки в опытах Фарадея?
15. Чему пропорциональна величина индукционного тока?
16. Сформулируйте и запишите закон ЭМИ.
17. Что происходит в проводнике, если его перемещать в МП?
18. В чем состоит суть явления самоиндукции?
19. От чего зависит ЭДС самоиндукции?
20. Какая физическая величина называется индуктивностью?
21. Как связаны между собой ЭДС самоиндукции и индуктивность проводника?
22. От каких величин зависит потенциальная энергия МП проводника?
23. Как зависит потенциальная энергия МП проводника от его индуктивности?