

Законспектировать материал. Фотоотчёт (1 файл) прислать на эл. почту по расписанию

15.10.24. (11:50 – 13.20)

### Электромагнитная индукция. ЭДС в проводнике, движущееся в магнитном поле. Правило правой руки.

Обнаружение в 1820 г. датским физиком Х. Эрстедом связи магнитного поля с электрическим током положило начало фундаментальным исследованиям открытого явления. Обладая широким научным кругозором, выдающийся физик и исследователь М. Фарадей предусмотрел возможность обратной связи магнитного поля и электрического тока, когда появление магнитного поля приводит к возникновению электрического тока.

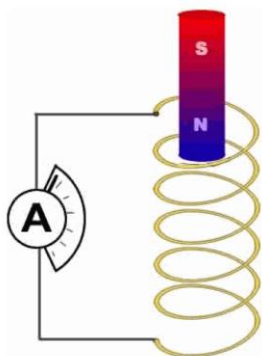


Рис. 3. Явление электромагнитной индукции

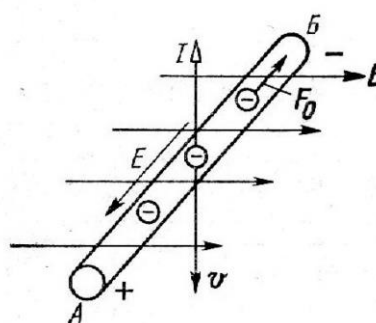


Рис. 4. Схема индуцирования ЭДС в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле

Суть закона электромагнитной индукции, открытого Фарадеем, заключается в следующем: всякое изменение магнитного поля, в котором помещен проводник произвольной формы, вызывает в последнем появление ЭДС электромагнитной индукции.

Рассмотрим этот закон с количественной стороны при движении прямолинейного проводника в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции (рис. 4).

Пусть проводник длиной  $l$  движется со скоростью  $v$ . Тогда на свободные электроны, движущиеся вместе с проводником, будет действовать сила Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки. Под действием этой силы электроны движутся вдоль проводника, что приводит к разделению зарядов: на конце А проводника накапливаются положительные заряды, на конце Б — отрицательные. Но при разделении зарядов возникает электрическое поле, препятствующее этому процессу. Когда силы поля уравнивают силу Лоренца, разделение прекратится. Определим ЭДС индукции, представляющую собой разность потенциалов на концах проводника, возникающую при разделении зарядов.

$$E = \varphi_A - \varphi_B = El = \frac{F}{q} l = \frac{qvB}{q} l = Bvl \quad (7)$$

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки: *правую руку располагают так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, отогнутый под прямым углом большой палец совмещают с направлением скорости; тогда вытянутые четыре пальца покажут направление ЭДС*

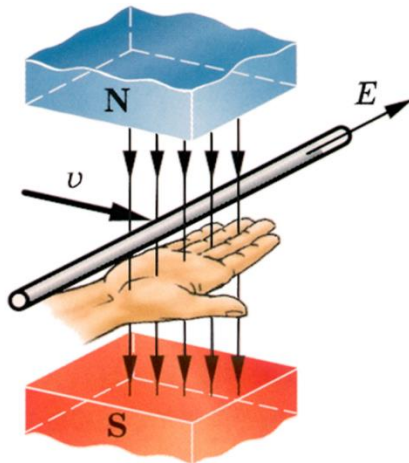


Рис. 5. Правило правой руки.

В общем случае, при движении проводника под углом  $\alpha$  к направлению вектора магнитной индукции величина ЭДС индукции определяется выражением

$$E = Bv \sin \alpha \quad (8)$$

Проанализировав результаты экспериментальных исследований электромагнитной индукции, М.Фарадей установил общую формулу для выражения особенностей этого явления, которые отражают сущность **закона электромагнитной индукции для замкнутого контура**: *при изменении магнитного потока в замкнутых проводниках возникает электрический ток, вызванный ЭДС индукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока.*

*при изменении магнитного потока в замкнутых проводниках возникает электрический ток, вызванный ЭДС индукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока.*

Русский физик немецкого происхождения Э.Х.Ленц в 1833 г., обобщив результаты многочисленных опытов по определению направления индукционного тока, пришёл к выводу: **магнитное поле индукционного тока всегда противодействует изменениям, которые вызвали этот ток.** Ленц сформулировал правило, по которому определяют направление индуктированной ЭДС: **«ЭДС индукции всегда имеет такое направление, что создаваемый ею ток своим магнитным полем противодействует основному магнитному полю, вызвавшему явление индукции».**

Правило Ленца имеет большой физический смысл. Противодействием внешнему магнитному полю своим магнитным полем индукционный ток вынуждает необходимость преодолевать определённую силу, совершая работу и затрачивая энергию.

С учётом правила Ленца закон электромагнитной индукции для замкнутого контура запишется таким образом:

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (9)$$

Эта формулировка закона электромагнитной индукции справедлива для контуров любой произвольной формы.

Для катушки, имеющей число витков  $w$ , значение ЭДС соответственно увеличивается в  $w$  раз:

$$E = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

### **Магнитные свойства веществ. Ферромагнитные материалы и их намагничивание.**

В технике широко применяются ферромагнитные материалы - материалы, содержащие области самопроизвольного намагничивания (домены), которые создают *собственное магнитное поле*. Поля отдельных доменов ориентированы хаотично, поэтому весь образец ферромагнитного материала не обладает магнитными свойствами.

Для ферромагнитных материалов характерна непропорциональная зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности  $H$ , что в 1872 г. было установлено А.Г. Столетовым. График этой зависимости называется *кривой намагничивания* (рис. 2.7, а). На участке  $I$  — линейной части кривой намагничивания - происходит ориентация доменов

вдоль внешнего поля. При этом поля доменов складываются с внешним полем, усиливая его во много раз.

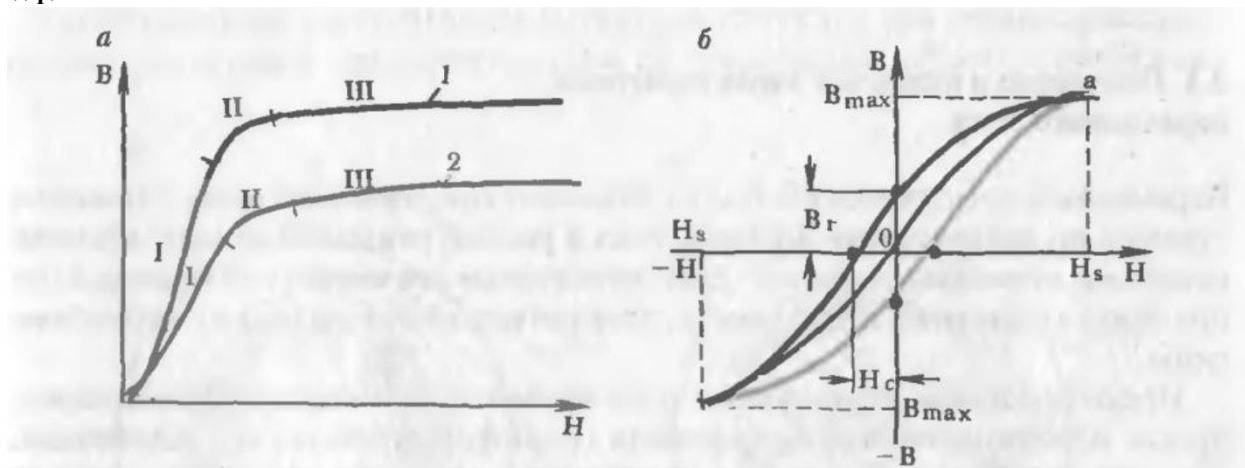
Участок II — колено кривой намагничивания — характеризуется замедлением ориентации доменов.

На участке III - в зоне насыщения - домены полностью ориентированы вдоль поля, рост магнитной индукции происходит только за счет внешнего поля.

Характерными особенностями ферромагнетиков являются, во-первых, насыщение и, во-вторых, магнитный гистерезис — неоднозначная зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  [1].

График зависимости  $B = f(H)$  при периодическом перемагничивании, называемый *петлей гистерезиса*, показан на рис. 2.7, б. Кривая  $Oa$  - начальная кривая намагничивания. Магнитная индукция  $B_r$  соответствующая  $H = 0$ , называется *остаточной индукцией*. Напряженность  $H_c$ , необходимая для изменения магнитной индукции от значения  $B_r$  до нуля, называется *коэрцитивной силой*.

При перемагничивании ферромагнитных материалов на переориентацию доменов затрачивается выделяющаяся в виде тепла энергия, называемая потерями на гистерезис  $W_H$ .



**РИС. 2.7. Кривые намагничивания (а) и петля гистерезиса (б) ферромагнитных материалов**

Энергия, выделяющаяся за один цикл перемагничивания в  $1 \text{ м}^3$  данного ферромагнитного материала, численно равна площади петли гистерезиса, выраженной в единицах величин по осям координат ( $B$  и  $H$ ), т.е. в  $\text{Тл} \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}}$ .

Поэтому для изготовления магнитопроводов электрических машин и аппаратов применяют специальные сорта стали с узкой петлей гистерезиса.

### **Явления самоиндукции и взаимной индукции.**

*Самоиндукция* представляет собой явление возникновения э.д.с. в проводнике при изменении в нем тока и, следовательно, магнитного поля, созданного этим током. Направление з.д.с. самоиндукции определяется по правилу Ленца.

Явление самоиндукции наиболее заметно проявляется в цепях, содержащих катушки. При замыкании таких цепей э.д.с. самоиндукции согласно правилу Ленца противодействует нарастанию тока, т.е. направлена против з.д.с. источника питания. При размыкании цепи катушки з.д.с. совпадает по направлению с э.д.с. источника, стремясь поддержать убывающий ток.

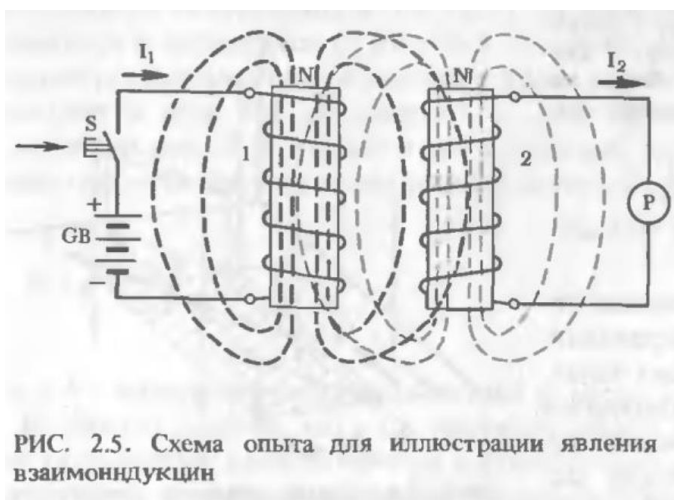
Самоиндукция является частным случаем общего явления электромагнитной индукции, поэтому з.д.с. самоиндукции, как и з.д.с. индукции, будет зависеть от скорости изменения магнитного потока  $\Delta\Phi / \Delta t$ . Однако при самоиндукции магнитный поток

создается током того же проводника, в котором возникает з.д.с. самоиндукции, значит скорость изменения потока  $\Delta\Phi/\Delta t$  будет пропорциональна скорости изменения тока  $\Delta I/\Delta t$ .

Вводя коэффициент пропорциональности  $L$ , с учетом формулы (2.10) получим формулу для определения э.д.с. самоиндукции

$$E_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Коэффициент  $L$ , называемый *собственной индуктивностью* или *индуктивностью*, зависит от параметров катушки (пропорционален площади сечения катушки и квадрату числа витков и обратно пропорционален ее длине) и наличия ферромагнитного сердечника,



т.е. от магнитной проницаемости среды. Единицу измерения индуктивности установим из выражения :

$$[L] = \left[ \frac{E_L \cdot \Delta t}{\Delta I} \right] = \frac{В \cdot с}{А} = Ом \cdot с$$

Эта единица получила название генри (Гн).

Самоиндукция проявляется, например, в виде замедленного нарастания тока в обмотках возбуждения электрических машин и обмотках реле при подаче на них напряжения постоянного тока, возникновения дуги на контактах в момент размыкания ими цепи.

### Взаимная индукция

**Взаимная индукция** — частный случай электромагнитной индукции — представляет собой явление возникновения ЭДС в проводнике (катушке) при изменении тока в расположенном вблизи него другом проводнике (катушке). Эта ЭДС называется **ЭДС взаимной индукции**, ее направление определяется по правилу Ленца.

При замыкании цепи катушки  $I$  (рис. 2.5) в находящейся рядом катушке  $2$  возникнут ЭДС взаимной индукции  $E_{M2}$  и ток  $I_2$  такого направления, что он будет препятствовать нарастанию магнитного потока. Ток  $I_2$ , изменяясь, создаст в катушке  $1$  ЭДС взаимной индукции  $E_{M1}$  :

$$E_{M1} = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}; \quad E_{M2} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t},$$

где  $M$  - коэффициент пропорциональности;  $\Delta I_1, \Delta I_2$  - изменение тока соответственно в катушках  $1$  и  $2$  за время  $\Delta t$ .

Коэффициент пропорциональности  $M$  зависит от параметров катушек, их взаимного расположения и магнитной проницаемости среды. Он называется **взаимной индуктивностью** и измеряется в генри ( $Гн$ ). Взаимной индуктивностью  $1 Гн$  обладают две магнитно связанные цепи, если при изменении в одной из них тока на  $1 А$  за  $1 с$  в другой возникает ЭДС взаимной индукции  $1 В$ .