

Процесс превращения механической энергии в электрическую можно обратить. Если через рамку, помещенную в магнитное поле, пропускать электрический ток, то в соответствии с (29.3) на нее будет действовать крутящий момент и рамка начнет вращаться. В этом случае мы получим электрический мотор. Первый электрический двигатель был сконструирован Б. С. Якоби и приводился в действие током от батареи из 320 гальванических элементов. В 1839 г. по Неве стал плавать первый в мире электроход, приводившийся в движение этим двигателем. В настоящее время многочисленные электрические двигатели самой различной мощности приводят в движение станки, электровозы, подводные лодки, электротракторы и другие агрегаты. Схемы и конструкции различных электродвигателей и генераторов тока рассматриваются в курсе электротехники.

§ 43. Взаимная индукция. Трансформаторы

Переменное магнитное поле, индуцирующее ток, само в свою очередь может создаваться переменными токами, текущими по другим проводам или в том же контуре. В этих случаях мы говорим о явлениях взаимной индукции и самоиндукции.

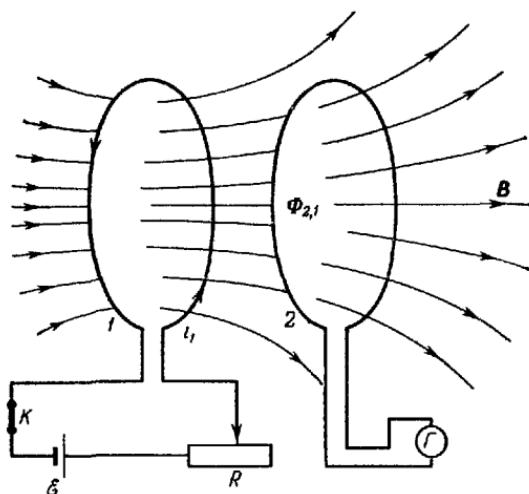


Рис. 3.65

Рассмотрим сначала взаимную индукцию двух токов. Контур I_1 , изображенный на рис. 3.65, присоединен к источнику тока \mathcal{E} . С помощью реостата R можно менять ток i_1 в этом контуре, а ключом K можно этот ток полностью выключать или включать. Ток i_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии индукции

которого пронизывают контур 2, расположенный на некотором расстоянии от контура 1. Вследствие этого с контуром 2 будет сцеплен некоторый магнитный поток $\Phi_{2,1}$. Если ток i_1 в контуре 1 увеличить, например, вдвое, то во столько же раз возрастут величины H и B во всех точках окружающего пространства, а следовательно, ровно во столько же раз увеличится и магнитный поток $\Phi_{2,1}$. Таким образом, магнитный поток $\Phi_{2,1}$, сцепленный с контуром 2, прямо пропорционален создающему этот поток току i_1 . Вводя соответствующий коэффициент пропорциональности $M_{2,1}$, зависящий от размеров, формы и взаимного расположения контуров, можно записать:

$$\Phi_{2,1} = M_{2,1} i_1. \quad (43.1a)$$

Величина $M_{2,1}$ носит название коэффициента взаимной индукции, или взаимной индуктивности обеих контуров. Из (43.1) следует, что при $i_1 = 1$ $\Phi_{2,1} = M_{2,1}$, т. е. взаимная индуктивность двух контуров равна магнитному потоку, сцепленному со вторым контуром, если ток в первом контуре равен единице.

Единица взаимной индуктивности в системе СИ носит название генри (гн). Из (43.1) можно найти размерность этой единицы:

$$1\text{ гн} = \frac{1\text{ в.сек}}{1\text{ а}}, \quad (43.2a)$$

и определить ее величину. 1 гн есть взаимная индуктивность таких двух контуров, если ток в 1 а, текущий в первом контуре, создает во втором контуре магнитный поток в 1 в.сек.

В гауссовой системе единиц коэффициент взаимной индукции вводится так:

$$\Phi_{2,1} = \frac{1}{c} M_{2,1} i_1. \quad (43.1b)$$

Из размерностей входящих в (43.1b) величин следует, что размерность $M_{2,1}$ в системе СГС есть размерность длины. Единица индуктивности в системе СГС, согласно (43.1b), есть такая индуктивность, при которой ток, равный с СГС единиц тока (10 а), образует во втором контуре магнитный поток в 1 максвелл (мкс). Эта единица индуктивности носит название сантиметр (см).

Зная соотношение между всеми единицами, входящими в (43.1a) и (43.1b), легко определить и соотношение между единицами индуктивности. Согласно (43.1b)

$$1\text{ см} = \frac{c\ 1\text{ мкс}}{1\text{ СГС ед. тока}}, \quad (43.2b)$$

откуда, используя (43.2), находим

$$\frac{1\text{ гн}}{1\text{ см}} = c \frac{1\text{ в.сек}}{1\text{ мкс}} \frac{1\text{ СГС ед. тока}}{1\text{ а}} = \frac{c \cdot 10^8}{c/10} = 10^9,$$

т. е.

$$1 \text{ гн} = 10^8 \text{ см.} \quad (43.3)$$

Как и всюду прежде, мы можем записать эти формулы в виде пригодном для обоих принятых нами систем единиц, вводя, согласно § 32, коэффициент k' (в СГС $k' = \frac{1}{c}$, в СИ $k' = 1$).

Вместо (43.1a) и (43.1b) будем писать

$$\Phi_{2,1} = k' M_{2,1} i_1. \quad (43.1\text{в})$$

Если пропускать ток i_2 через второй контур, а наблюдать магнитное поле около первого контура, то с первым контуром окажется сцепленным магнитный поток $\Phi_{1,2}$, пропорциональный току i_2 :

$$\Phi_{1,2} = k' M_{1,2} i_2. \quad (43.4)$$

При вычислении коэффициентов $M_{1,2}$ и $M_{2,1}$ надо сначала по закону Био—Савара—Лапласа найти напряженность поля, созданного одним из токов в любой точке пространства. Для этого придется вычислять линейный интеграл (30.1). По найденному H в соответствии с (29.10) находится B в любой точке пространства, после чего с помощью (34.5) рассчитывается поверхностный интеграл для Φ . Можно показать, что оба кратных интеграла $M_{2,1}$ и $M_{1,2}$ равны друг другу и для обоих контуров существует лишь один коэффициент взаимной индукции

$$M_{2,1} = M_{1,2} = M. \quad (43.5)$$

Если ток i_1 , текущий по первому контуру, будет изменяться, то пропорционально ему будет изменяться магнитный поток $\Phi_{2,1}$, сцепленный со вторым контуром, и в последнем возникнет э. д. с. взаимной индукции

$$\mathcal{E}_{2, \text{ вз инд}} = -k' \frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = -k' \frac{d}{dt} (k' Mi_1) = -k'^2 M \frac{di_1}{dt}^*. \quad (43.6)$$

Соотношение (43.6) позволяет дать второе, динамическое, определение величины M . Взаимная индуктивность двух контуров равна э. д. с. индукции возникающей в одном из этих контуров, когда ток в другом контуре убывает на $1/k'^2$ за единицу времени,

Соответственно этому определению 1 гн есть взаимная индуктивность таких двух контуров, у которых при равномерном

*) Последнее равенство имеет место только для неподвижных и недеформируемых контуров, для которых $M = \text{const}$. В общем случае $\Phi_{2,1} = k' Mi$ и

$$\mathcal{E}_{2, \text{ вз инд}} = -k' \frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = -k'^2 M \frac{di_1}{dt} - k'^2 i_1 \frac{dM}{dt}.$$

убывании тока в одном контуре на 1 а за каждую секунду в другом контуре возникает э. д. с. индукции, равная 1 в. Предлагаем читателю определить аналогичным образом единицу индуктивности СГС — 1 см.

Следует особо выделить случай многосвязных контуров, например выполненных в виде ряда последовательно соединенных витков. На рис. 3.66 изображены два таких контура. В первом случае (рис. 3.66, а) первичный контур выполнен в виде катушки с сердечником и подключен к источнику тока. Вторичный контур состоит из двух витков, надетых на первичный и подключенных к гальванометру Γ . Через сердечник и любой виток проходит один и тот же магнитный поток Φ . Этот же поток Φ пронизывает и каждый из витков вторичного контура. Поэтому полный поток через вторичный контур Ψ_a равен

$$\Psi_a = 2\Phi \quad (43.7)$$

и взаимная индуктивность обоих контуров M_a в два раза больше, чем в случае одного витка.

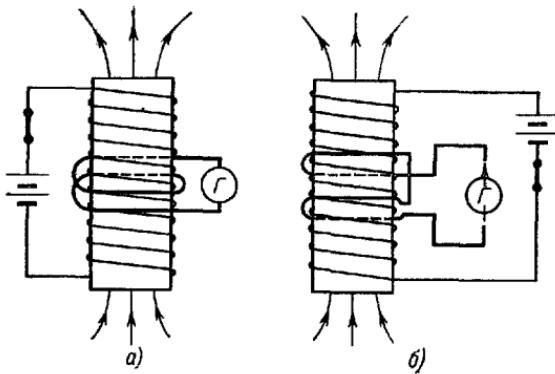


Рис. 3.66.

В другом случае (рис. 3.66, б) оба витка вторичного контура охватывают катушку в противоположных направлениях, следовательно, полный поток через этот контур

$$\Psi_b = \Phi - \Phi = 0, \quad (43.8)$$

и взаимная индуктивность обоих контуров M_b равна нулю.

При включении тока в первичный контур в случае а гальванометр покажет отброс, вдвое больший, чем для одного отдельного витка. В случае б) гальванометр не дает никакого отброса при включении тока в первичном контуре: во вторичном контуре не возникает э. д. с. индукции.

Это обстоятельство учитывается в так называемой бифильарной намотке проводов в тех случаях, когда необходимо избежать возникновения в них паразитных индукционных токов. Провод складывается вдвое и в таком виде наматывается на катушку, как это показано на рис. 3.67. Переменные магнитные поля, воздействующие на провод в каждой соседней паре витков, будут создавать э. д. с. противоположных направлений, и полная э. д. с. во всем проводе всегда будет равна нулю.

Рассчитаем очень важный для практики случай—взаимную индуктивность двух катушек, намятанных на общий сердечник (рис. 3.68). Катушка из w_1 витков намыта на замкнутый сердечник или на его часть. Когда по катушке

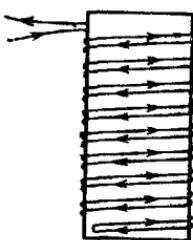


Рис. 3.67.

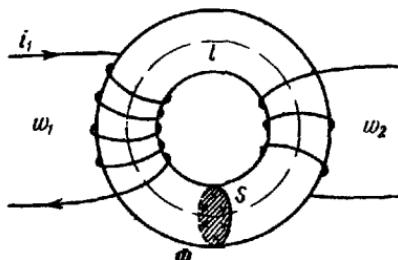


Рис. 3.68.

идет ток i_1 , в сердечнике возникает магнитное поле H , магнитная индукция B и магнитный поток Φ . Поскольку сердечник не разрезан, то в соответствии с (34.14)

$$\Phi = k \cdot 4\pi\mu_0\mu \frac{i_1 w_1}{l} S, \quad (43.9)$$

где S —площадь поперечного сечения сердечника, l —его длина по средней линии и μ —магнитная проницаемость сердечника в данном поле. Через вторичную обмотку, содержащую w_2 витков, проходит полный магнитный поток

$$\Phi_{2,1} = \Psi = w_2 \Phi = k \cdot 4\pi\mu_0\mu \frac{w_1 w_2}{l} S i_1. \quad (43.10)$$

Тогда по определению взаимная индуктивность этих двух катушек равна (см. (43.4))

$$M = \frac{\Phi_{2,1}}{k' i_1} = \frac{k}{k'} \cdot 4\pi\mu_0\mu \frac{w_1 w_2}{l} S. \quad (43.11)$$

В системе СГС $k' = k = \frac{1}{c}$, $\mu_0 = 1$, величина μ безразмерна, числа витков w_1 и w_2 тоже безразмерны, S измеряется в см^2 и l —в см

и, следовательно,

$$M = \frac{4\pi \mu_0 w_1 w_2 S}{l} \text{ см (СГС ед. индуктивности).} \quad (43.12)$$

В системе СИ $k = \frac{1}{4\pi}$, $k' = 1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, S измеряется в м², а l — в м и, следовательно,

$$M = \frac{\mu_0 \mu w_1 w_2 S}{l} \text{ Гн.} \quad (43.13)$$

Как установлено выше, $1 \text{ Гн} = 10^8 \text{ см}$ индуктивности.

Подобные две катушки, насаженные на общий стальной сердечник, образуют трансформатор переменного тока. Трансформатор был изобретен Яблочковым в 1876 г. для «дробления» света, т. е. для раздельного питания отдельных электрических источников света. Кроме первичной обмотки, трансформатор Яблочкова содержал столько отдельных катушек, сколько было независимых источников света. Размыкание или замыкание каждой из них практически не сказывалось на остальных.

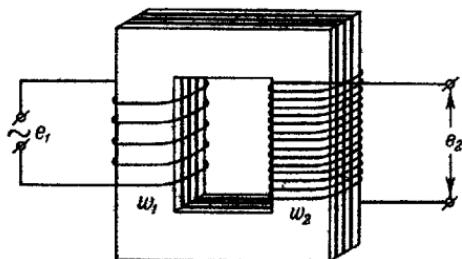


Рис. 3.69.

Трансформатор был изобретен Яблочковым в 1876 г. для «дробления» света, т. е. для раздельного питания отдельных электрических источников света. Кроме первичной обмотки, трансформатор Яблочкова содержал столько отдельных катушек, сколько было независимых источников света. Размыкание или замыкание каждой из них практически не сказывалось на остальных.

Обозначим мгновенное значение магнитного потока, пронизывающего любое сечение сердечника, через Φ . К первичной обмотке с числом витков w_1 (рис. 3.69) подключена переменная внешняя э. д. с. e_1 . По закону Ома ток i_1 в этой цепи будет определяться алгебраической суммой внешней э. д. с. и э. д. с. индукции:

$$e_1 - k' \frac{d(w_1 \Phi)}{dt} = i_1 r_1, \quad (43.14)$$

где r_1 — сопротивление обмотки. Практически в трансформаторе падение напряжения на сопротивлении $i_1 r_1$ при быстропеременных полях мало по сравнению с каждой из двух э. д. с. и

$$e_1 \approx k' w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (43.15)$$

Аналогично э. д. с. e_2 , возникающая во вторичной обмотке,

$$e_2 \approx k' w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (43.16)$$

Из (43.15) и (43.16) следует важный вывод:

$$\frac{e_2}{e_1} \approx \frac{w_2}{w_1} = \text{const.} \quad (43.17)$$

Отношение числа витков $\frac{w_2}{w_1}$, показывающее, во сколько раз э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора больше, чем в первичной, называется коэффициентом трансформации. Применяя закон сохранения энергии и пренебрегая потерями, мы можем написать, что мощность тока во вторичной обмотке практически равна мощности в первичной:

$$e_2 i_2 \approx e_1 i_1. \quad (43.18)$$

При $\frac{w_2}{w_1} > 1$ мы имеем *повышающий трансформатор, увеличивающий напряжение и понижающий величину тока*. Такое преобразование параметров переменного тока необходимо для снижения потерь в проводах при передаче электроэнергии на большие расстояния. Передаваемая мощность $W = \overline{I^2}$ (черта означает среднее за период). Потери на джоулево тепло при данном сопротивлении сети R составляют $\Delta W = \overline{R^2 I^2}$. Поэтому уменьшение потерь связано с уменьшением тока I в сети, что при данном W возможно за счет увеличения $\frac{w_2}{w_1}$.

При электросварке в электрической дуге необходимо получать большие токи при сравнительно низких напряжениях. Поэтому электросварочные агрегаты подключают к сети с помощью понижающих трансформаторов, у которых $\frac{w_2}{w_1} < 1$.

§ 44. Самоиндукция. Вихревые токи

Ток i в замкнутом контуре создает вокруг себя магнитное поле, пропорциональное току. Поэтому магнитный поток Φ , сцепленный с контуром, тоже прямо пропорционален току i . Вводя соответствующий коэффициент пропорциональности L , можно записать

$$\Phi = k' L i, \quad (44.1)$$

где величина L носит название *коэффициента самоиндукции, или просто индуктивности контура*. Из этого соотношения следует, что *индуктивность контура равна магнитному потоку, сцепленному с контуром, когда ток, создающий этот поток, равен единице*.

Единицы измерения L , естественно, те же, что и для M : в системе СИ — гн, а в системе СГС — см.

Индуктивность соленоида с числом витков w может быть получена из следующих простых соображений. При изменении потока вектора индукции через соленоид в нем возникает э. д. с. совершенно независимо от того, обусловлен этот поток электрическим током в этом же соленоиде или же поток связан с другими токами.