

99 Электрические цепи со взаимной индуктивностью

Через взаимную индуктивность происходит перенос энергии между магнитосвязанными катушками. Катушки могут быть включены согласно, тогда энергия добавляется и индуктивное сопротивление увеличивается, либо встречно, тогда энергия вычитается и индуктивное сопротивление уменьшается.

12.1. Понятие об индуктивно связанных цепях

Электрические цепи, в которых изменение тока в одной из ветвей может вызвать появление ЭДС в другой ветви, называют *индуктивно связанными* или *цепями со взаимной индукцией*. Возникающую в этом случае ЭДС называют ЭДС взаимной индукции (взаимоиндукции).

Рассмотрим две катушки, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (рис. 12.1).

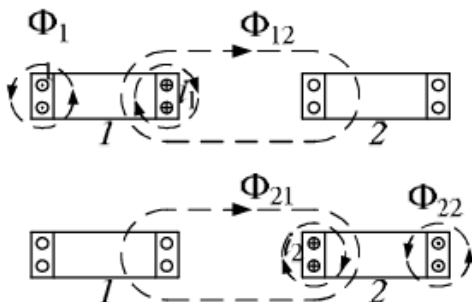


Рис. 12.1. Магнитная связь между двумя катушками

Пусть по обмотке первой катушки протекает ток i_1 , в результате возникает магнитный поток, часть которого Φ_{11} будет связана с витками первой катушки (контура), часть магнитного потока Φ_{12} пронизывает витки второй катушки.

Потокосцепление первой катушки со второй Ψ_{12} в случае неферромагнитной среды

$$\Psi_{12} = N_2 \Phi_{12},$$

где N_2 – число витков второй катушки.

Если по обмотке второй катушки проходит ток i_2 , то создается магнитный поток, часть которого Φ_{21} будет пронизывать витки обмотки первой катушки и образует потокоцепление Ψ_{21} :

$$\Psi_{21} = N_1 \Phi_{21},$$

где N_1 – число витков первой катушки.

Отношение потокоцепления второго контура (катушки) Ψ_{12} к силе тока, возбуждающего это потокоцепление i_1 , называют *взаимной индуктивностью контуров*:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{i_1}.$$

Аналогично

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{N_1 \Phi_{21}}{i_2}.$$

Для двух контуров всегда имеет место равенство на основании принципа взаимности, а именно: $M_{12} = M_{21} = M$, поэтому необходимость в написании индексов отпадает.

Взаимная индуктивность измеряется в генри (Гн).

Магнитный поток взаимной индукции является частью потока одного из контуров, поэтому *взаимная индуктивность*, как и индуктивность, зависит от свойств материалов магнитной цепи, геометрических параметров, числа витков обмоток катушек, а также от их взаимного расположения.

Магнитная связь между двумя контурами характеризуется коэффициентом связи.

Отношение потока Φ_{12} ко всему потоку Φ_{11}

$$\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{11}} = \frac{\Psi_{12}}{N_2} = \frac{\Psi_{11}}{N_1} = \frac{\Psi_{12} N_1}{\Psi_{11} N_2} = \frac{M i_1 N_1}{L_1 i_1 N_2} = \frac{M N_1}{L_1 N_2}, \quad (12.1)$$

Аналогично

$$\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{22}} = \frac{M N_2}{L_2 N_1}, \quad (12.2)$$

где L_1, L_2 – индуктивность первой и второй катушек.

Каждое из отношений (12.1), (12.2) показывает, какая часть магнитного потока, созданного током одной катушки, сцепляется с другой.

Среднее геометрическое этих отношений представляет собой коэффициент или степень индуктивной связи K двух катушек (см. также п. 5.9):

$$\sqrt{\frac{\Phi_{12}\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}}} = \sqrt{\frac{M^2 N_1 N_2}{L_1 L_2 N_2 N_1}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = K.$$

Поскольку магнитный поток Φ_{11} больше магнитного потока Φ_{12} , а Φ_{22} больше магнитного потока Φ_{21} , то коэффициент связи всегда меньше единицы: $K < 1$.

В некоторых случаях коэффициент связи приближается к единице, например у трансформаторов с замкнутым детальным магнитопроводом.

Устройство, дающее возможность изменять магнитную связь двух катушек, называется *вариометром*. Он представляет собой две катушки, из которых одна может поворачиваться. Магнитная связь таких катушек будет зависеть от взаимного расположения катушек или от способов их соединений.

12.2. Взаимоиндуктивное сопротивление

При наличии двух индуктивно связанных катушек L_1 и L_2 каждая из них будет пронизываться двумя магнитными потоками: самоиндукции, вызванным собственным током, и взаимоиндукции, вызванным током другой катушки. Следовательно, в каждой катушке индуцируются две ЭДС: самоиндукции e_L и взаимоиндукции e_M .

В первой катушке

$$e_1 = e_{L_1} + e_{M_1} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}; \quad (12.3)$$

во второй катушке

$$e_2 = e_{L_2} + e_{M_2} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}. \quad (12.4)$$

Знак «+» или «-» в выражениях (12.3), (12.4) зависит от взаимного направления потоков самоиндукции и взаимоиндукции.

Если потоки самоиндукции и взаимоиндукции совпадают по направлению, ставят знак «-», если противоположны – знак «+».

Явление взаимоиндукции учитывают в расчете реальных электрических цепей при наличии в них индуктивно связанных катушек.

Абсолютное значение напряжения, уравнивающее соответствующую ЭДС взаимоиндукции:

$$u_M = \left| M \frac{di}{dt} \right|,$$

или в комплексной форме:

$$\dot{U}_M = |j\omega M \dot{I}|,$$

где $\omega M = X_M$ – реактивное сопротивление взаимоиндукции;

$j\omega M = \underline{Z}_M$ – комплексное сопротивление взаимоиндукции.

12.3. Сogласное и встpeчное включение катушек

Для определения знака перед напряжением необходимо предварительно определить, как включены катушки: согласно или встpeчно. Правильное заключение об этом можно сделать, если известны направление намотки обмоток катушек на сердечник и направление тока в этих обмотках.

Два вывода, принадлежащих двум разным катушкам, называют *одноименными*, если при одинаковом направлении токов относительно них магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции совпадают.

Если к выводам *a* и *c* двух катушек (рис. 12.2) подвести токи i_1 и i_2 одного направления, то в этом случае потокосцепление второй катушки с первой Ψ_{21} будет совпадать по направлению с потокосцеплением Ψ_{11} первой катушки, следовательно, зажимы *a* и *c* считают одноименными (начало обмоток). Одноименными в таком случае будет и вторая пара зажимов *b* и *d* (концы обмоток).

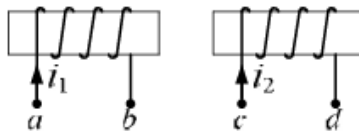


Рис. 12.2. Индуктивно связанные катушки

Обычно на схемах электрических цепей сердечники не изображают, а **одноименные зажимы (начало обмоток) помечают точками или звездочками (рис. 12.3).**

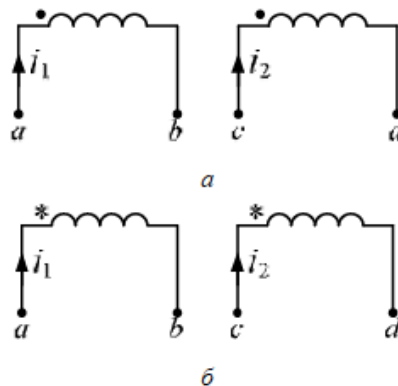


Рис. 12.3. Примеры обозначения одноименных зажимов катушек:
а – точками; б – звездочками

Индуктивно связанные элементы включены согласно, если направления магнитного потока самоиндукции и магнитного потока взаимной индукции совпадают. При этом возрастает и результирующий поток, сцепляющийся с катушкой. Это имеет место тогда, когда токи в двух катушках одинаково ориентированы относительно одноименных зажимов (рис. 12.4, а).

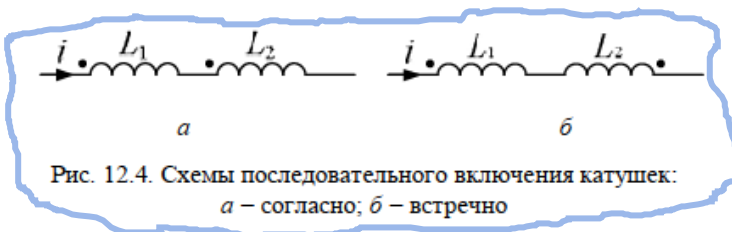


Рис. 12.4. Схемы последовательного включения катушек:
а – согласно; б – встречно

Если магнитный поток взаимной индукции направлен навстречу магнитному потоку самоиндукции, ослабляет его, такое включение индуктивно связанных элементов называют встречным. В таком случае токи в двух катушках должны быть ориентированы к разным зажимам (рис. 12.4, б).

Если в цепи будет несколько магнитно-связанных катушек, то начало и конец обмоток различают для каждой пары отдельно. Начала и концы обмоток можно определить экспериментально.

Расчет электрических цепей с индуктивно связанными катушками производят символическим методом. При этом используют метод уравнений Кирхгофа или метод контурных токов.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа учитывают падение напряжения от взаимной индукции с соответствующим знаком.

Если включение двух катушек согласное, падение напряжения от взаимной индукции берут с тем же знаком, что и падение напряжения от самоиндукции, при встречном включении – наоборот.