

## 45-46 ЭДС самоиндукции и взаимной индукции

При изменении собственного потокосцепления в контуре или катушке наводится ЭДС самоиндукции  $e_L$ , а при изменении взаимного потокосцепления – ЭДС взаимной индукции.

Изменение собственного потокосцепления обычно является следствием изменения собственного тока катушки:

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt},$$

или

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (7.8)$$

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока  $\frac{di}{dt}$ . Она противодействует изменению тока, т. е. при увеличении тока препятствует его росту, а при уменьшении задерживает его падение (правило Ленца).

Если изменение тока в катушке является следствием изменения приложенного к ней напряжения, то ЭДС самоиндукции направлена против приложенного напряжения, когда ток растет, и совпадает по направлению с напряжением, когда ток уменьшается.

Чем быстрее изменяется ток, тем больше противодействие его росту или падению. Однако это противодействие зависит не только от скорости изменения тока, но и от конструкции катушки, что в формуле (7.8) выражается множителем  $L$ , т. е. индуктивностью катушки.

Для системы магнитно-связанных катушек (см. рис. 5.6) ЭДС взаимной индукции

$$e_{2м} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt}; \quad e_{1м} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt}.$$

Изменение взаимного потокосцепления может быть следствием изменения тока в одной из катушек или изменения коэффициента связи. Предположим, ток  $i_1$  изменяется в первой катушке. ЭДС взаимной индукции  $e_{2м}$  во второй катушке пропорциональна скорости изменения этого тока:

$$e_{2\text{м}} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}. \quad (7.9)$$

Аналогично при изменении тока  $i_1$  ЭДС взаимной индукции в первой катушке

$$e_{1\text{м}} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt}. \quad (7.10)$$

В том и в другом случае коэффициентом пропорциональности является взаимная индуктивность системы  $M$ .

**Правило Ленца** в применении к такой системе указывает на то, что изменение тока в одной катушке встречает противодействие со стороны другой катушки.

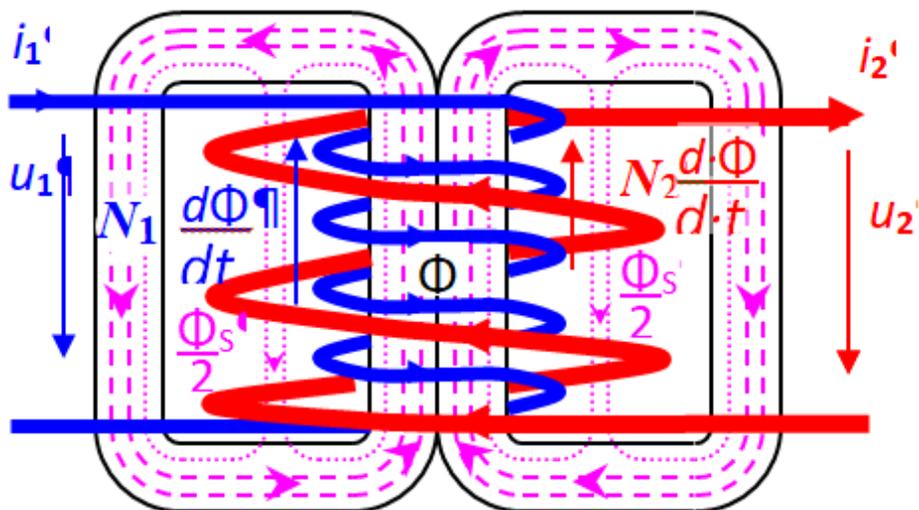
Выражение (7.8) показывает, что ЭДС самоиндукции появляется в контуре или катушке при изменении собственного тока контура.

Выражения (7.9) и (7.10) показывают, что ЭДС взаимной индукции появляется в контуре при изменении тока в соседнем контуре.

## 7.6. Принцип действия трансформатора

Наглядный пример практического использования явления взаимной индукции – работа трансформатора напряжения. Трансформатор – статический электромагнитный аппарат для изменения значения напряжения электрического тока.

Принципиальная схема трансформатора напряжения (рис. 7.4) имеет магнитопровод из электротехнической стали и две обмотки на магнитопроводе: первичную с числом витков  $N_1$  и вторичную с числом витков  $N_2$ . Обмотки выполнены из медного провода.



Первичной обмоткой трансформатор включается в сеть переменного напряжения  $u_1$ , и в ней возникает переменный ток  $i_1$ . К вторичной обмотке подключается приемник электрической энергии.

Рассмотрим трансформатор с разомкнутой цепью вторичной обмотки, т. е. в режиме холостого хода.

При переменном токе в первичной обмотке создается переменный магнитный поток  $\Phi$ , который замыкается по стальному сердечнику и образует потокоцепление с обеими обмотками. Таким образом, в трансформаторе обмотки электрически между собой не связаны, а связаны переменным магнитным потоком.

В обеих обмотках наводится ЭДС:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношение ЭДС

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = n.$$

Отношение количества витков обмоток трансформатора называется коэффициентом трансформации.

Знак «-» показывает, что когда магнитный поток нарастает ( $d\Phi/dt > 0$ ), ЭДС самоиндукции  $e_1 = -N_1 d\Phi/dt$  направлена навстречу создающему его току, это учтено в направлении стрелки на схеме замещения. При подключении потребителя к вторичной обмотке  $N_2$  по ней протекает ток  $i_2$ , создающий, магнитодвижущую силу  $N_2 i_2$  (положительное направление на рисунке, по правилу буравчика, вниз), которая стремится ослабить магнитный поток связи  $\Phi$ . Однако снижение  $\Phi$  приводит к уменьшению ЭДС  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ , мешающей току первичной обмотки. Ток  $i_1$  увеличивается.

Увеличение первичного тока  $i_1$  вызывает подмагничивание сердечника, и, в результате, магнитный поток  $\Phi$  уменьшается незначительно.

Отбор энергии от трансформатора по вторичной обмотке автоматически увеличивает её поступление из сети по первичной, а пульсирующий магнитный поток  $\Phi$  обеспечивает передачу этой энергии с мощностью  $S = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$  и преобразование с коэффициентом трансформации  $k = N_1/N_2$  (уменьшение напряжения с одновременным увеличением тока).

Отношение ЭДС при холостом ходе можно заменить отношением напряжений на зажимах обмоток, учитывая, что  $u_2 = e_2$  и  $u_1 \approx e_1$  ( $u_1 > e_1$  на величину падения напряжения в обмотке, которое при холостом ходе мало). Следовательно,

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1}.$$

Таким образом, при  $N_2 > N_1$  ( $u_2 > u_1$ ) трансформатор повышает, а при  $N_2 < N_1$  ( $u_2 < u_1$ ) понижает напряжение.

Если к вторичной обмотке подключить приемник энергии, то в её цепи возникает ток  $i_2$ , и в приемник будет поступать электрическая энергия из сети через трансформатор. При этом передача энергии из первичной обмотки во вторичную осуществляется посредством магнитного поля.

## 7.7. Вихревые токи

При протекании переменного тока по обмотке катушки возникает переменный магнитный поток, под действием которого в результате электромагнитной индукции будет наводиться ЭДС во всех контурах, пронизываемых магнитным потоком, а следовательно, и в стальном сердечнике. В результате возникают токи, которые замыкаются по сердечнику (рис. 7.5, а), их называют вихревыми или токами Фуко.

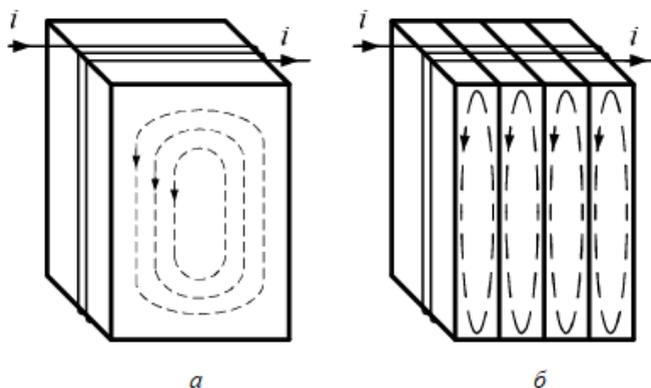


Рис. 7.5. Схематическое изображение прохождения вихревых токов: *а* – в сплошном сердечнике; *б* – в изолированных листах сердечника

Согласно закону Джоуля – Ленца, **вихревые токи вызывают нагрев сердечника**, т. е. имеет место **потеря электрической энергии**. Кроме того, токи Фуко создают свой магнитный поток, который согласно правилу Ленца будет направлен против основного магнитного потока, вызвавшего вихревые токи, т. е. **оказывает размагничивающее действие**.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов и снижения размагничивающего действия **магнитопроводы изготавливают из тонких листов стали, изолированных друг от друга лаком** (рис. 7.5, б). Уменьшение токов Фуко в этом случае происходит за счет повышения электрического сопротивления, поскольку токи замыкаются в тонких листах по узким вытянутым путям.

**Плоскость листов** должна быть **параллельна направлению магнитного потока**, чтобы не увеличивалось магнитное сопротивление.

Для различных частот существуют свои оптимальные толщины листов. В частности, **при промышленной частоте 50 Гц** применяют листы толщиной **0,35–0,5 мм**, при частотах порядка **тысяч герц** – листы толщиной **0,02–0,05 мм**, а при более высоких частотах толщина листов доходит до 0,005 мм.

**С целью повысить электрическое сопротивление при производстве электротехнической стали добавляют до 4,8 % кремния**.

При высоких частотах (30–50 МГц) применяют сердечники, выполненные из магнитодиэлектриков или ферритов, которые обладают большим удельным электрическим сопротивлением.

На практике вихревые токи используются для нагрева металлов (плавление стали, нагрев под закалку и для других целей).

### 7.8. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля

Рассмотрим энергию уединенной индуктивной катушки. Пусть катушка с сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  подключена к источнику энергии с ЭДС  $e$ . Тогда по второму закону Кирхгофа имеем

$$e = Ri + \frac{d\Psi}{dt},$$

где  $\Psi$  – потокосцепление индуктивной катушки;

$\frac{d\Psi}{dt}$  – падение напряжения, уравновешивающее ЭДС самоиндукции.

Работу источника энергии за время  $dt$  определим, умножив уравнение второго закона Кирхгофа на  $idt$ :

$$eidt = ri^2dt + id\Psi.$$

Первое слагаемое правой части равенства есть энергия, теряемая в виде теплоты в активном сопротивлении  $R$ , второе слагаемое есть энергия, создающая магнитное поле катушки, обозначим ее  $dW_{\text{м}}$ :

$$dW_{\text{м}} = id\Psi.$$

Полная энергия, запасенная в магнитном поле катушки, при изменении потокосцепления от 0 до  $\Psi$

$$W_{\text{м}} = \int_0^{\Psi} id\Psi.$$

Для катушек с неферромагнитным сердечником  $\Psi = Li$  и  $d\Psi = Ldi$ , поэтому

$$W_{\text{м}} = L \int_0^i i di = \frac{Li^2}{2},$$

или

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi i}{2}.$$

Объемную плотность энергии магнитного поля определим на примере катушки с кольцевым сердечником (см. п. 5.9), у которой магнитное поле в сердечнике можно считать равномерным:

$$\Psi = BSN; \quad i = \frac{Hl}{N},$$

где  $l$  – средняя длина сердечника.

Тогда

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi i}{2} = \frac{BSN}{2N} Hl = \frac{BHV}{2},$$

где  $V = Sl$  – объем сердечника.

**Энергия магнитного поля в единице объема**

$$\frac{W_{\text{м}}}{V} = \frac{BH}{2}.$$

Здесь энергия выражена через характеристики магнитного поля, что свидетельствует о ее принадлежности к магнитному полю.



### Вопросы и задачи для самоконтроля

1. Расскажите, в чем суть электромагнитной индукции.
2. Запишите, чему равна ЭДС, индуцированная в контуре (катушке).
3. Сформулируйте правило Ленца.
4. Запишите, чему равна ЭДС, индуцированная в проводнике, пересекающем магнитное поле.
5. Сформулируйте правило правой руки.
6. Запишите, чему равна электромагнитная сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.

7. Дайте определение ЭДС самоиндукции и запишите, чему она равна.

8. Расскажите, как наводится ЭДС взаимной индукции. Запишите, чему она равна.

9. Объясните принцип действия трансформатора.

10. Расскажите, как возникают вихревые токи, как добиваются снижения их вредного действия.

11. Запишите, чему равна энергия магнитного поля и объемная плотность энергии магнитного поля.

12. В равномерном магнитном поле, где  $B = 1,8$  Тл, перпендикулярно линиям магнитной индукции движется прямолинейный проводник длиной  $0,5$  м со скоростью  $20$  м/с. Концы проводника присоединены к резистору с сопротивлением  $R = 1,6$  Ом так, что образуется замкнутый контур. Сопротивление движущегося проводника и соединительных проводов составляет  $R_0 = 0,2$  Ом. Определите ток в цепи и механическую мощность, необходимую для преодоления реакции магнитного поля. Ответ:  $10$  А;  $180$  Вт.

13. Индуктивность соленоида (цилиндрической катушки) при длине  $l = 0,1$  м и площади поперечного сечения  $S = 2$  см<sup>2</sup> равна  $4$  МГн. Определите силу тока в обмотке, при которой объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида равна  $1$  Дж/м<sup>3</sup>. Ответ:  $0,1$  А.

14. Катушка с сопротивлением  $R = 10$  Ом и индуктивностью  $L = 0,1$  Гн включена на постоянное напряжение  $U = 100$  В. Каким количеством энергии магнитного поля обладает катушка и какова мощность тепловых потерь? Ответ:  $5$  Дж;  $1000$  Вт.

15. Катушка с индуктивностью  $L = 0,2$  Гн подключается к источнику постоянного напряжения  $U = 20$  В. Определите скорость нарастания тока в момент включения катушки. Ответ:  $100$  А/с.

16. На кольцевой сердечник намотаны две обмотки. При изменении тока в первой обмотке со скоростью  $200$  А/с во второй обмотке наводится ЭДС  $e_2 = 30$  В. Определите взаимную индуктивность обмоток. Ответ:  $0,15$  Гн.

17. Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий катушку с числом витков  $N = 15$ , за время  $t = 0,01$  с изменялся с постоянной скоро-

стью от 0 до 0,1 Вб. Определите модуль ЭДС в наведенной катушке. Ответ: 150 В.

18. Определите скорость  $v$ , с которой нужно перемещать проводник в равномерном магнитном поле, перпендикулярно линиям магнитной индукции, чтобы в нем наводилась ЭДС  $E = 18$  В, если магнитная индукция поля  $B = 1,5$  Тл, длина проводника  $l = 60$  см. Ответ: 20 м/с.