

## 132 Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока. Построение графика тока

**Напряжение, ток и магнитный поток в катушке с ферромагнитным сердечником.** Один из наиболее распространенных нелинейных элементов в цепях переменного тока – индукционная катушка с ферромагнитным сердечником, применяемая при создании электрических машин переменного тока и разнообразной электрической аппаратуры. Ферромагнитные сердечники применяются для усиления магнитного поля и придания ему требуемой конфигурации.

Одной из особенностей катушек с ферромагнитными сердечниками является то, что токи в обмотках и магнитные потоки в сердечнике взаимосвязаны, т. е. магнитный поток зависит от тока в обмотке, а токи зависят от характера изменения магнитного потока, что усложняет анализ таких цепей. Кроме того, наряду с активной мощностью, потребляемой активным сопротивлением обмотки катушки, имеет место потеря энергии, расходуемая на нагрев сердечника. Это обусловлено явлением гистерезиса и вихревыми токами. Активную мощность, идущую на нагрев сердечника, часто называют потерями мощности в стали  $P_{ст}$ .

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 вихревые токи, которые замыкаются по сердечнику (токи Фуко).

Вихревые токи (см. гл. 7) вызывают, согласно закону Джоуля – Ленца, 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, тем самым оказывая размагничивающее действие.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов и снижения размагничивающего действия магнитопровод изготавливают из тонких листов стали, изолированных друг от друга. Плоскость листов должна быть параллельна направлению магнитного потока, чтобы не увеличивалось магнитное сопротивление. Уменьшение токов Фуко в этом случае происходит за счет повышения электрического сопротивления, так как токи замыкаются в тонких листах по узким вытянутым путям (см. рис. 7.5, б).

Для различных частот существует своя оптимальная толщина листов. В частности, при промышленной частоте 50 Гц применяют листы толщиной 0,35–0,5 мм, при частоте порядка тысяч герц – листы толщиной 0,02–0,05 мм, а при более высокой частоте толщина листов доходит до 0,005 мм.

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

При высоких частотах (до 30–50 МГц) применяют сердечники, выполненные из магнитодиэлектриков или ферритов, которые обладают большим удельным электрическим сопротивлением. *Магнитодиэлектрики* состоят из спрессованных зерен ферромагнитного вещества и связывающего их диэлектрика. *Ферриты* – магнитные материалы полупроводникового типа, изготовленные из опресованных порошков с последующим обжигом.

Если пренебречь неравномерностью распределения магнитного тока в поперечном сечении листов магнитопровода, то **мощность потерь от вихревых токов** можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{в}} = \sigma_{\text{в}} f^2 B_{\text{м}}^2 m,$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – коэффициент вихревых токов, зависящий от сорта стали и толщины стальных листов;

$f$  – частота тока;

$B_{\text{м}}$  – амплитуда магнитной индукции;

$m$  – масса сердечника.

Как отмечалось ранее, ферромагнитным материалам присущ гистерезис, из-за которого в сердечнике теряется мощность, описываемая эмпирической формулой:

$$P_r = \sigma_r f B_m^n m,$$

где  $\sigma_r$  – гистерезисный коэффициент, зависящий от сорта стали и размеров стальных листов (определяется экспериментально);

$n$  – показатель степени ( $n = 1,6$  при  $B_m < 1$  Тл,  $n = 2$  при  $B_m = 1 \dots 1,6$  Тл).

Для уменьшения потерь на гистерезис сердечники электрических устройств переменного тока изготавливают из магнитомягких ферромагнетиков с узкой петлей гистерезиса.

Суммарную потерю мощности в сердечнике можно определить по формуле

$$P_{\Sigma} = P_{уд} m,$$

где  $P_{уд}$  – удельные потери мощности на 1 кг массы сердечника (Вт/кг), которые приводятся в справочной литературе;

$m$  – масса сердечника, кг.

Если катушка с ферромагнитным сердечником (рис. 17.11) с числом витков  $N$  подключена к источнику синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$ , то переменный ток, протекающий по ее обмотке, возбуждает переменный магнитный поток  $\Phi$ , большая часть которого  $\Phi_0$  (основной магнитный поток) замыкается по сердечнику из-за магнитной проницаемости в стали, которая в тысячи раз превышает магнитную проницаемость воздуха. Небольшая часть потока  $\Phi_p$  замыкается полностью или частично по воздуху. Эту часть потока называют *поток рассеяния*, каждый из которых индуцирует в обмотке ЭДС.

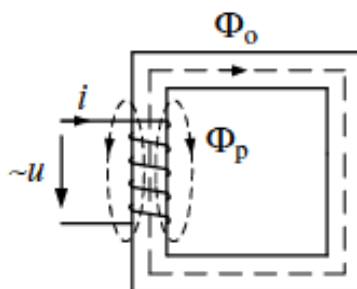


Рис. 17.11. Схема распределения магнитных потоков в катушке с ферромагнитным сердечником

Таким образом, ток в обмотке есть результат совместного действия приложенного напряжения  $u$  и ЭДС  $e_o$  и  $e_p$ , индуцируемых основным потоком и потоком рассеяния:

$$i = \frac{u + e_o + e_p}{R}, \quad (17.2)$$

где  $R$  – активное сопротивление обмотки.

Из выражения (17.2) следует, что

$$u = -e_o - e_p + iR.$$

Активное падение напряжения  $iR$  обычно относительно мало, равно как и ЭДС рассеяния, и для анализа общего характера процесса ими можно пренебречь и считать, что  $u = -e_o$ .

Поскольку ЭДС, возбуждаемая основным магнитным потоком,

$$e_o = -N \frac{d\Phi}{dt},$$

то

$$U_m \sin \omega t = N \frac{d\Phi_o}{dt}. \quad (17.3)$$

На основании равенства (17.3) можно найти закон изменения основного магнитного потока во времени:

$$\begin{aligned} d\Phi_o &= \frac{U_m}{N} \sin \omega t dt; \\ \Phi_o &= \frac{U_m}{N} \int \sin \omega t dt = -\frac{U\sqrt{2}}{\omega N} \cos \omega t + A = \frac{U\sqrt{2}}{2\pi f N} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + A. \end{aligned}$$

Постоянная интегрирования  $A$  изображает некоторый постоянный магнитный поток, который в сердечниках переменного тока в установившихся режимах отсутствует, т. е.  $A = 0$ . Таким образом, с достаточной степенью точности можно считать, что основной магнитный поток изменяется по синусоидальному закону при подключении катушки к источнику синусоидального напряжения:

$$\Phi_o = \frac{U}{4,44Nf} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

В расчетных формулах используется понятие амплитуды магнитного потока, так как понятие действующего значения физического смысла не имеет:

$$\Phi_{\text{ам}} = \frac{U_m}{N\omega}.$$

Между основным магнитным потоком и током, возбуждающим этот поток, существует нелинейная зависимость. Это является причиной того, что при синусоидальном напряжении источника ток в обмотке будет несинусоидальным, что несложно показать при помощи графических построений (рис. 17.12).

При построении зависимости  $i(t)$  ординаты кривой тока для первой четверти периода определяются на основании восходящей ветви петли гистерезиса (участок  $ab$ ), для второй четверти периода на основании нисходящей ветви (участок  $bc$ ) и т. д. Таким образом, ток и магнитный поток одновременно достигают своих максимальных значений, но ток опережает магнитный поток по фазе.

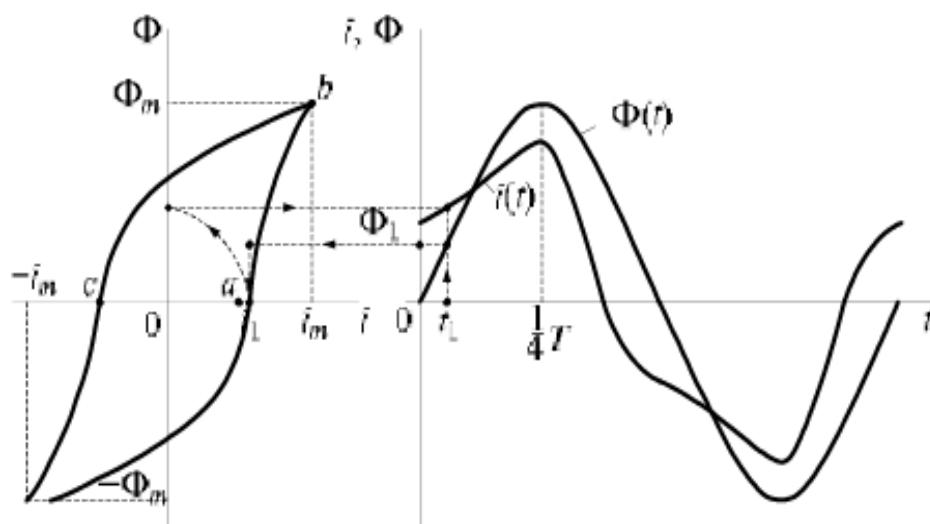


Рис. 17.12. Построение графика изменения намагничивающего тока во времени на основании петли гистерезиса ферромагнитного материала

Насыщение ферромагнетика вызывает возникновение пика в кривой тока, соответствующего четверти периода. Чем больше магнитная индукция в сердечнике, тем выше и острее этого тока. Зависимость тока от времени является несинусоидальной.

График тока в катушке зависит от вида петли гистерезиса, по которой перемагничивается материал сердечника. Нелинейная зависимость индукции от напряжённости, а, следовательно, и тока от магнитного потока является причиной несинусоидальности тока. Высшие гармоники тока тем больше, чем сильнее проявляется насыщение материала сердечника при его намагничивании.