

99-100 Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного 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

$$P_3 = \sigma_3 f^2 B_x^2 m,$$

где σ_3 – коэффициент вихревых токов, зависящий от сорта стали и толщины стальных листов;

f – частота тока;

B_x – 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 σ_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 Φ , большая часть которого Φ_0 (основной магнитный поток) замыкается по сердечнику из-за магнитной проницаемости в стали, которая в тысячи раз превышает магнитную проницаемость воздуха. Небольшая часть потока Φ_p замыкается полностью или частично по воздуху. Эту часть потока называют потоком рассеяния, каждый из которых индуцирует в обмотке ЭДС.

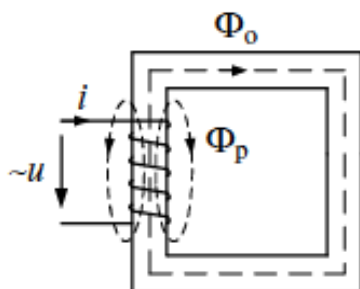


Рис. 17.11. Схема распределения магнитных потоков в катушке с ферромагнитным сердечником

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:

$$d\Phi_o = \frac{U_m}{N} \sin \omega t dt;$$

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

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:

$$\Phi_{om} = \frac{U_m}{N\omega}$$

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.

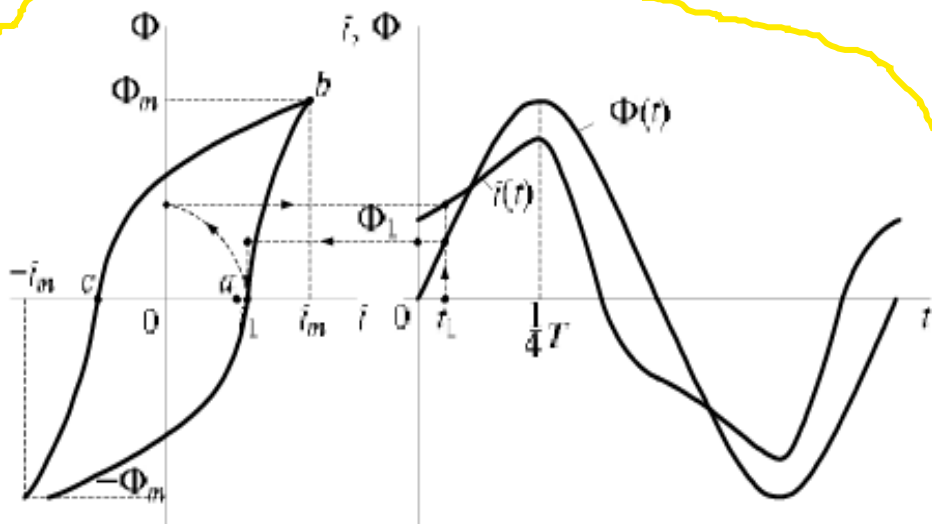


Рис. 17.12. Построение графика изменения намагничивающего тока во времени на основании петли гистерезиса ферромагнитного материала

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.

Уравнение, векторная диаграмма и схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником. При анализе общего характера процесса подключения индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником к источнику синусоидального напряжения пренебрегали потоком рассеяния и активным сопротивлением обмотки катушки. Для уточнения представления о тех явлениях, которые сопровождают протекание тока по обмотке катушки, нужно отметить следующее. Основной магнитный поток, как было указано выше, нелинейно связан с током. Он пронизывает все витки обмотки и индуцирует ЭДС:

$$e_0 = -N \frac{d\Phi_0}{dt}.$$

При синусоидальном основном магнитном потоке индуцируемая им ЭДС тоже синусоидальная и отстает от потока на 90° :

$$e_{om} = -N \frac{d(\Phi_{om} \sin \omega t)}{dt} = -N\omega\Phi_{om} \cos \omega t = N\omega\Phi_{om} \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Действующее значение ЭДС

$$E_o = 2\pi f N \frac{\Phi_{om}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N \Phi_{om}.$$

Поток рассеяния замыкается полностью или частично по воздуху. Поскольку сопротивление воздуха магнитному потоку во много раз превышает сопротивление потоку в стали, магнитная проницаемость в воздухе μ_0 постоянная, то можно считать, что потокосцепление рассеяния ψ_p линейно зависит от намагничивающего тока:

$$\psi_p = L_p i,$$

где L_p – индуктивность, обусловленная потоком рассеяния, который, пронизывая витки обмотки катушки, индуцирует ЭДС:

$$e_p = -\frac{d\psi_p}{dt} = -L_p \frac{di}{dt}.$$

Обмотка катушки обладает активным сопротивлением R . Таким образом, напряжение, приложенное к зажимам катушки, должно иметь три составляющие: первая уравнивает ЭДС, наводимую основным магнитным потоком $u_o = -e_o$; вторая – ЭДС рассеяния

$u_p = -e_p = L_p \frac{di}{dt}$; третья компенсирует падение напряжения в активном сопротивлении $u_R = iR$.

Уравнение электрического состояния, учитывающее эти три составляющие, имеет следующий вид:

$$u = u_o + u_p + u_R.$$

При наличии ферромагнитного сердечника ток в обмотке индуктивной катушки изменяется по несинусоидальному закону. Однако в расчетах цепей, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, в большинстве случаев допустимо существенное упрощение реальных условий, заключающихся в замене действительного несинусоидального тока эквивалентным синусоидальным. Условием эквивалентности токов является равенство действующих значений этих токов и равенство вызываемых ими потерь мощности. Такая замена существенно упрощает расчеты, так как позволяет применять методы расчета цепей синусоидального тока.

Уравнения электрического состояния катушки можно записать для действующих значений в комплексной форме:

$$\dot{U} = \dot{U}_o + \dot{U}_p + R\dot{I}.$$

Поскольку $u_p = -e_p = L_p \frac{di}{dt} = I_m \omega L_p \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, то комплекс действующего значения

$$\dot{U}_p = I \omega L_p e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_p \dot{I},$$

где X_p – индуктивное сопротивление, обусловленное потокосцеплением рассеяния.

Уравнение катушки в комплексной форме запишет вид

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + j\omega L_p \dot{I} + \dot{I}R. \quad (17.4)$$

Соотношения напряжения и тока катушки наглядно иллюстрирует ее векторная диаграмма (рис. 17.13).

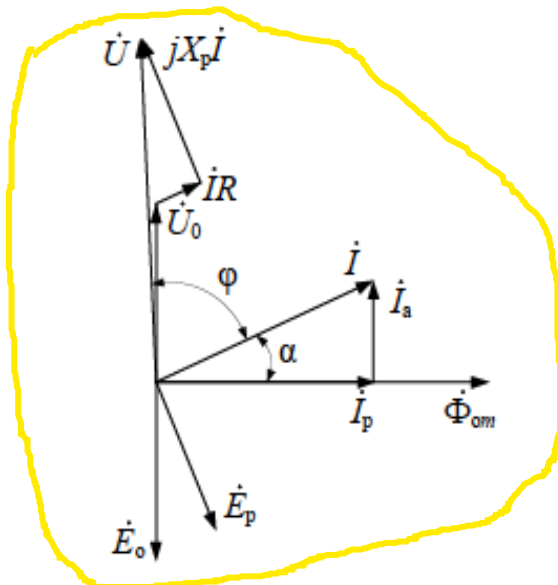


Рис. 17.13. Векторная диаграмма катушки с ферромагнитным сердечником

При построении за исходный вектор удобно взять вектор амплитуды основного магнитного потока $\dot{\Phi}_{om}$. Вектор тока \dot{I} , как уже было показано выше, должен опережать вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_{om}$ на угол α , угол магнитного запаздывания, из-за потерь мощности в сердечнике. Исходя из этого, можно считать, что ток состоит из двух составляющих, одна из них представляет реактивный ток $I_p = \cos \alpha$, возбуждающий основной магнитный поток и совпадающий с ним по фазе, другая – активный ток $I_a = \sin \alpha$, обусловленный потерями мощности в ферромагнитном сердечнике от гистерезиса и вихревых токов.

Таким образом,

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (17.5)$$

Вектор ЭДС \dot{E}_0 , индуцируемой основным потоком, отстает от него на 90° , а вектор ЭДС \dot{E}_p , индуцируемой потоком рассеяния, отстает от вектора тока \dot{I} на 90° .

Вектор напряжения U , приложенного к катушке, определяют на основании уравнения (17.4) путем суммирования трех составляющих: \dot{U}_0 , $\dot{I}R$ и $jX_p\dot{I}$. Уравнениям (17.4), (17.5) и векторной диаграмме должна соответствовать схема замещения, при построении которой уравнение можно рассматривать как первый и второй закон Кирхгофа для схемы со смешанным соединением сопротивлений, представленной на рисунке 17.14, а.

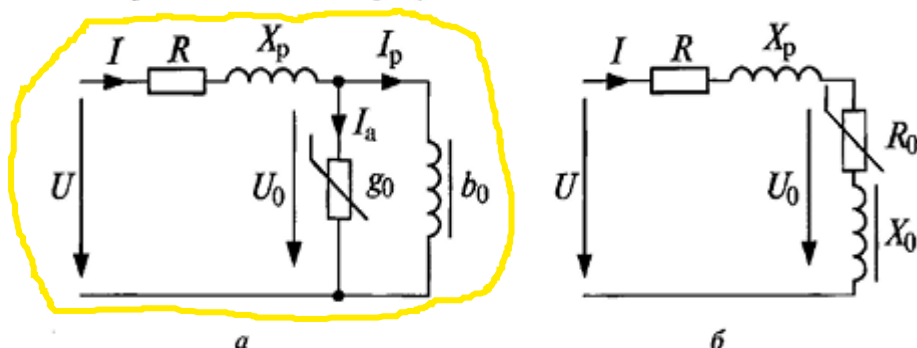


Рис. 17.14. Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником при смешанном (а) и последовательном (б) соединении сопротивлений

Поскольку ток состоит из двух составляющих, то одна из параллельных ветвей – ветвь намагничивающего тока, обладает только реактивной проводимостью, другая обладает только активной проводимостью, обусловленной потерями мощности в сердечнике, и эти проводимости непостоянны.

Проводимости можно определить следующим образом. Активная проводимость

$$g_0 = \frac{I_a}{U_0}.$$

Если учесть, что $U \approx U_0$, то

$$g_0 = \frac{I}{U} = \frac{IU}{U^2} = \frac{P_{\text{ст}}}{U^2},$$

где $P_{\text{ст}}$ – потеря мощности в стали.

Реактивная проводимость

$$b_0 = \frac{I_p}{U_p} = \frac{I_p U}{U^2} = \frac{Q_{\text{ст}}}{U^2},$$

где $Q_{\text{ст}}$ – реактивная мощность, необходимая для возбуждения основного магнитного потока.

Разветвленный участок схемы замещения (рис. 17.14, а) можно заменить неразветвленным с последовательным соединением эквивалентных сопротивлений (рис. 17.14, б):

$$R_0 = \frac{P_{\text{ст}}}{I^2} = \frac{g_0}{g_0^2 + b_0^2};$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{\frac{U_0}{I^2} - R_0^2} \quad \text{или} \quad X_0 = \frac{b_0}{g_0^2 + b_0^2}.$$

На ток катушки влияет размер воздушного зазора в ее сердечнике. Как известно, магнитная проницаемость воздуха значительно меньше магнитной проницаемости стали, поэтому воздушный зазор имеет значительно большее магнитное сопротивление, чем участок той же длины из ферромагнитного материала. **Наличие воздушного зазора приводит к увеличению магнитного сопротивления сердечника.** Это значит, что при одном и том же токе I магнитный поток Φ_0 будет меньше. Соответственно уменьшится и наводимая этим потоком ЭДС E_0 и равное ей напряжение U_0 . Как видно из уравнения индуктивной катушки (17.4), при неизменном напряжении U уменьшение напряжения U_0 вызовет увеличение падений напряжения RI и $\omega L_p I$ вследствие увеличения тока.

Влияние зазора на ток катушки имеет определенное практическое значение. Например, в сварочных трансформаторах изменением зазора в сердечнике регулируют величину требуемого сварочного тока. Повышенная вибрация и гул катушки магнитного пускателя указывают на неплотное примыкание частей магнитопровода вследствие образования ржавчины, попадания инородных частей и на необходимость профилактического обслуживания.