

### 133 Уравнение, векторная диаграмма и схема замещения катушки

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  $90^\circ$ :

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

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  $\mu_0$  постоянная, то можно считать, что потокосцепление рассеяния  $\psi_p$  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 потокоцеплением 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).

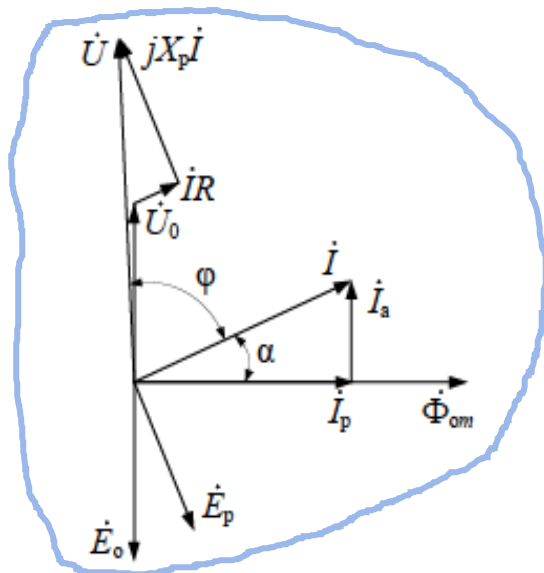


Рис. 17.13. Векторная диаграмма катушки с ферромагнитным сердечником

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  $\alpha$ , 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  $I_p = I \cos \alpha$ , возбуждающий основной магнитный поток и совпадающий с ним по фазе, другая – активный ток  $I_a = I \sin \alpha$ , 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  $90^\circ$ , а вектор ЭДС  $\dot{E}_p$ , индуцируемой потоком рассеяния, отстает от вектора тока  $\dot{I}$  на  $90^\circ$ .

Вектор напряжения  $\dot{U}$ , 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.

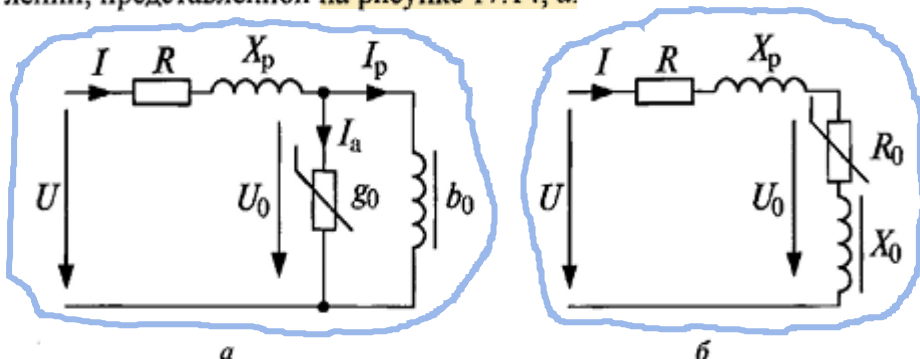


Рис. 17.14. Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником при смешанном (а) и последовательном (б) соединении сопротивлений

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):

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

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

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  $\Phi_0$  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.